

doi: 10.3788/gzxb20164510.1014003

# 用双滤波反馈半导体激光器产生低延时特征的混沌信号

卢东, 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)

**摘 要:** 将两个法布里-珀罗干涉仪作为双外腔构成双滤波反馈半导体激光器, 获取低延时特征混沌信号, 理论研究了反馈时间、反馈强度、滤波器带宽以及滤波器中心频率与激光器中心频率之间的频率失谐对双滤波反馈半导体激光器混沌输出延时特征的影响. 研究表明: 当两个腔的反馈延迟时间之差约等于激光器弛豫振荡周期的一半时, 输出混沌信号的延时特征抑制效果相对较好. 在此基础上, 通过合理选择反馈强度、滤波器带宽、滤波器中心频率与激光器中心频率之间的频率失谐, 双滤波反馈半导体激光器输出混沌信号的延时特征被进一步抑制. 最后, 绘制混沌延时特征在滤波器带宽和频率失谐构成的参量空间的分布图, 确定获取低延时特征的混沌信号所需的反馈参量范围.

**关键词:** 半导体激光器; 非线性光学; 数值仿真; 双滤波光反馈; 混沌; 延时特征

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)10-1014003-6

## Chaotic Signal Generation with Low Time-delay Signature Based on a Semiconductor Laser Subject to Double Filtered Optical Feedback

LU Dong, ZHONG Zhu-qiang, XIA Guang-qiong, WU Zheng-mao

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

**Abstract:** Two Fabry-Perot interferometers were taken as double external cavities to construct a Double Filtered Optical Feedback Semiconductor Laser (DFOF-SL) for achieving chaotic signal with low time-delay signature, and the influences of feedback time, feedback strength, filter bandwidth, and the frequency detuning between the central frequency of the filter and the solitary laser on the time-delay signature evolution were theoretically investigated. The results show that, when the difference of the feedback time between the two external cavities approximately equals to a half of the relaxation oscillation period of the laser, the chaotic signal with relatively weak time-delay signature can be obtained. Moreover, through suitably selecting feedback strength, filter bandwidth, and the frequency detuning between the central frequency of the filter and the solitary laser, the time-delay signature can be further suppressed. Finally, based on the map of time-delay signature evolution in the parameter space of filter bandwidth and frequency detuning, the optimal feedback parameter regions for achieving chaotic signal with low time-delay signature have been determined.

**Key words:** Semiconductor lasers; Nonlinear optics; Numerical simulation; Double filtered optical feedback; Chaos; Time-delay signature

**OCIS Codes:** 140.5960; 190.4360; 140.1540

## 0 引言

自半导体激光器 (Semiconductor Laser, SL) 问世

以来, SL 的非线性动力学行为及其应用受到相关领域学者的广泛关注<sup>[1-3]</sup>. 当引入外腔反馈时, 通过合理选择反馈参量, SL 可产生高维混沌光输出<sup>[4-6]</sup>. 当前, 基

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61275116, 61475127, 61575163) 资助

第一作者: 卢东 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体激光非线性动力学. Email: 506144925@qq.com

导师 (通讯作者): 吴正茂 (1970-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为半导体激光非线性动力学及相关应用. Email: zmwu@swu.edu.cn

收稿日期: 2016-04-13; 录用日期: 2016-05-27

<http://www.photon.ac.cn>

于外腔反馈 SL 输出的激光混沌已经在光混沌保密通信<sup>[7-8]</sup>、高速物理随机数获取<sup>[9-10]</sup>、混沌雷达<sup>[11]</sup>、以及超宽带信号<sup>[12]</sup>的产生等方面展现出巨大的应用前景。然而,光在外腔往返过程中会产生光反馈,SL 输出的混沌信号具有明显的延时特征<sup>[13]</sup>,这将影响外腔反馈 SL 在相关领域的应用。若将外腔反馈 SL 应用于光混沌保密通信,入侵者可通过时间序列分析技术,提取混沌延时特征,重构光反馈 SL 系统,从而威胁混沌保密通信的安全<sup>[14-15]</sup>;若将外腔反馈 SL 应用于获取高速真随机数,混沌延时特征会导致提取的随机数具有一定周期性,从而降低随机数的统计性能<sup>[9-10]</sup>;若应用于激光混沌雷达,混沌延时特征会导致相关曲线出现明显的旁瓣,这将影响激光混沌雷达测量结果的准确性<sup>[11]</sup>。因此,对光反馈 SL 系统混沌输出的延时特征进行抑制在学术和应用层面均有重要意义。

近年来,多种抑制光反馈 SL 系统混沌输出延时特征的方案相继被报道。Rontani 等对单外腔反馈 SL 输出混沌信号的延时特征进行了详细的理论研究,发现:在反馈强度较弱的条件下,反馈时间约等于 SL 弛豫振荡周期时,混沌信号的延时特征能被有效抑制<sup>[13,16]</sup>。但通常 SL 的弛豫振荡周期较小( $\sim 0.1$  ns),这就要求 SL 外腔腔长较短( $\sim 3$  cm),导致系统搭建难度较高。Lee 等利用双外腔共同作用抑制混沌延时特征,实验得到了基于双外腔反馈 SL 系统的延时特征被抑制的混沌信号<sup>[17]</sup>。本课题组理论和实验研究了双外腔反馈 SL 混沌输出延时特征,发现:即便不采用腔长很短的外腔,通过合理设置两外腔的长度差异,双外腔反馈 SL 系统就能输出延时特征得到较好抑制的混沌信号<sup>[18]</sup>。

目前,在双外腔反馈 SL 混沌系统中,两个外腔均是平面镜,而单外腔 SL 的相关研究结果已证实:采用具有色散特性的滤波器如光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)<sup>[19-20]</sup>或者法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉仪<sup>[21-23]</sup>取代平面镜构成单滤波反馈 SL 系统,滤波器的色散效应有助于更好地抑制系统延时特征。基于此,本文采用两个法布里-珀罗干涉仪构成双滤波反馈半导体激光器(Double Filtered Optical Feedback Semiconductor Laser, DFOF-SL)系统来获得低延时特征混沌信号。该系统利用双外腔的共同作用以及 F-P 干涉仪的色散效应对混沌信号的延时特征进行最大限度的抑制。借助混沌时间序列的自相关函数,通过分析外腔反馈时间、反馈强度、滤波器带宽以及滤波器中心频率与 SL 中心频率之间的频率失谐对 DFOF-SL 系统混沌延时特征的影响,确定获取低延时特征的混沌信号所需的参量范围。

## 1 理论模型

图 1 为双滤波反馈 SL(DFOF-SL)系统结构示意图

图。图中 Laser 表示半导体激光器,BS 表示分束器,NDF 表示中性密度衰减片,Filter 表示法布里-珀罗干涉仪。SL 输出的光通过分束器 BS<sub>2</sub> 和 BS<sub>1</sub> 后,分别被 Filter<sub>2</sub> 和 Filter<sub>1</sub> 反馈回 SL 中,构成双滤波反馈(Double Filtered Optical Feedback, DFOF)。中性密度衰减片 NDF<sub>2</sub> 和 NDF<sub>1</sub> 控制两反馈回路的反馈强度。为方便讨论反馈时间对混沌延时特征的影响,在接下来的研究中,反馈腔 1 的反馈时间  $\tau_1$  固定在 3 ns,而反馈腔  $\tau_2$  的反馈时间可调节。同时,假定反馈腔 1 的中心频率位于激光器的中心频率处。

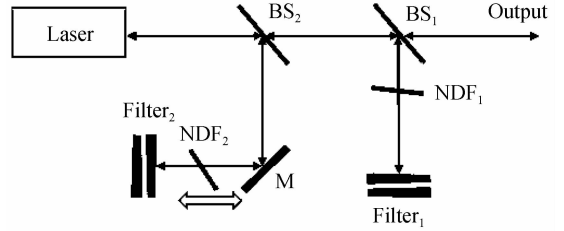


图 1 双滤波反馈半导体激光器系统结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of SL subject to DFOF

基于光反馈 SL 的 Lang-Kobayashi (L-K) 模型<sup>[1]</sup>,并考虑法布里-珀罗干涉仪所提供的滤波反馈<sup>[22]</sup>,DFOF-SL 系统的速率方程表示为

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1+i\alpha) \left\{ \frac{g[N(t) - N_0]}{1 + \epsilon|E(t)|^2} - \tau_p^{-1} \right\} \cdot E(t) + \frac{\eta_1}{\tau_{in}} F_1(t) + \frac{\eta_2}{\tau_{in}} F_2(t) \quad (1)$$

$$\frac{dF_1(t)}{dt} = \Delta_1 E(t - \tau_1) e^{-i\omega_0 \tau_1} + (i2\pi\Delta f_1 - \Lambda_1) F_1(t) \quad (2)$$

$$\frac{dF_2(t)}{dt} = \Delta_2 E(t - \tau_2) e^{-i\omega_0 \tau_2} + (i2\pi\Delta f_2 - \Lambda_2) F_2(t) \quad (3)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{N(t)}{\tau_N} - \frac{g[N(t) - N_0]}{1 + \epsilon|E(t)|^2} |E(t)|^2 \quad (4)$$

式中,下标 1,2 分别代表反馈腔 1 和反馈腔 2, $E$  表示慢变电场振幅, $\alpha$  表示线宽增强因子, $g$  表示微分增益系数, $N$  表示载流子密度, $N_0$  表示透明载流子密度, $\epsilon$  表示增益饱和系数, $\tau_p$  表示光子寿命, $\tau_N$  表示载流子寿命, $\tau_{in}$  表示腔内往返时间, $\eta$  表示反馈强度, $F(t)$  表示反馈光场振幅, $\Delta$  表示滤波器带宽, $\tau$  表示外腔反馈时间, $\omega_0$  表示 SL 中心角频率, $\Delta f$  表示滤波器中心频率与 SL 中心频率之间的频率失谐, $I$  表示偏置电流。

对 SL 混沌延时特征的分析主要有自相关函数(Self-correlation Function, SF)<sup>[24-25]</sup>,互信息(Mutual Information, MI)<sup>[18]</sup>以及排列熵(Permutation Entropy, PE)<sup>[26]</sup>。本文选用自相关函数来评估 DFOF-SL 系统混沌延时特征,自相关函数的定义为

$$c(\Delta t) = \frac{\langle (I(t + \Delta t) - \langle I \rangle)(I(t) - \langle I \rangle) \rangle}{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle} \quad (5)$$

式中  $I(t)$  表示混沌时间序列强度, $\Delta t$  表示时间延迟, $\langle \cdot \rangle$  表示对时间求平均。本文用 DFOF-SL 系统混沌输

出的自相关函数  $c(\Delta t)$  在  $\Delta t$  位于反馈延时时间附近的最大值  $\sigma$  来定量描述延时特征的明显程度.

## 2 模拟结果和分析

利用四阶龙格-库塔法对式(1)~(4)进行数值求解. SL 参量设置为:  $\alpha=4$ ,  $g=2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ ,  $N_0=1.25 \times 10^8$ ,  $\epsilon=1.5 \times 10^{-7}$ ,  $\tau_p=4.2 \text{ ps}$ ,  $\tau_N=1.6 \text{ ns}$ ,  $\tau_{in}=8.5 \text{ ps}$ ,  $\omega_0=1.216 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ ,  $I=1.6 I_{th}$ . 假定反射腔 1 的部分反馈参量保持固定, 分别为:  $\Delta f_1=0$ ,  $\tau_1=3 \text{ ns}$ ,  $\Delta_1=20 \text{ GHz}$ , 讨论反射腔 2 的反馈参量对 DFOF-SL 输出混沌信号延时特性的影响.

由于双外腔反馈 SL 系统混沌延时特征对反馈时间十分敏感, 因此首先讨论反馈时间对混沌延时特征的影响. 图 2 为 DFOF-SL 系统输出混沌时间序列的自相关函数随  $\tau_2$  的演化, 其中  $\eta_1=\eta_2=0.17$ ,  $\Delta_2=20 \text{ GHz}$ ,  $\Delta f_2=0 \text{ GHz}$ . 由于反馈腔 1 的反馈时间固定在  $3 \text{ ns}$ , 因此  $\Delta t \approx 3 \text{ ns}$  处的垂直线表示反馈腔 1 的混沌延时特征, 而反馈腔 2 的反馈时间  $\tau_2$  在  $[1 \text{ ns}, 6 \text{ ns}]$  范围内变化, 所以图中斜线反映了反馈腔 2 的混沌延时特征. 深灰色区域说明自相关函数值在  $0.1$  以下. 如图所示,  $\tau_2$  在区间  $[1 \text{ ns}, 6 \text{ ns}]$  变化时, 仅当  $\tau_2=2.92 \text{ ns}$  或  $\tau_2=3.08 \text{ ns}$  时, 自相关函数值在  $\Delta t$  接近于  $\tau_2$  的区域内均小于  $0.1$ , 表明混沌延时特征被有效抑制. 此时, 两个腔的反馈时间差的绝对值  $|\tau_1-\tau_2|=0.08 \text{ ns} \approx 1/2\tau_{ro}$ ,  $\tau_{ro}=(2\pi(gE^2/\tau_p))^{-1/2}$  为 SL 弛豫振荡周期, 这与双外腔镜面反馈 SL 的情形一致<sup>[18]</sup>. 下文讨论其

它工作参量对 DFOF-SL 系统输出混沌信号延时特征的影响时, 分  $\tau_2=2.92 \text{ ns}$  以及  $\tau_2=3.08 \text{ ns}$  两种情形进行讨论.

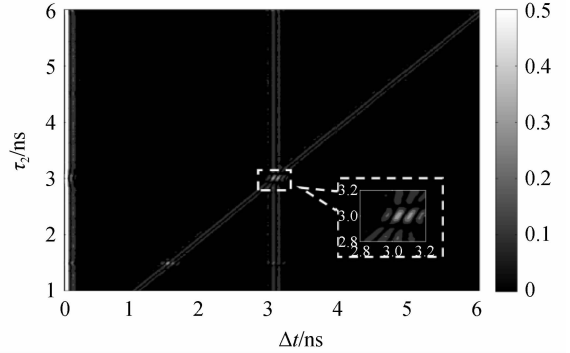


图 2 DFOF-SL 输出混沌时间序列的自相关函数随  $\tau_2$  的演化

Fig. 2 Evolution map of self-correlation function of chaotic time series output of DFOF-SL with  $\tau_2$

图 3 为  $\eta_1=0.04$ ,  $\eta_2=0.10$  时, DFOF-SL 系统输出信号的时间序列、功率谱和自相关函数曲线, 第一行和第二行分别对应  $\tau_2=2.92 \text{ ns}$  以及  $\tau_2=3.08 \text{ ns}$  两种情形. 如图所示, 在这两种情形下 DFOF-SL 输出信号的时间序列图 3(a)、(d) 均呈现不规则振荡, 其功率谱图 3(b)、(e) 连续而平滑, 表明此时 DFOF-SL 的输出为混沌态. 同时, 两种情形下输出混沌信号的自相关函数曲线图 3(c)、(f) 在  $\Delta t \approx \tau$  附近的最大值约为  $0.1$ , 说明此时混沌信号的延时特征已被较好抑制.

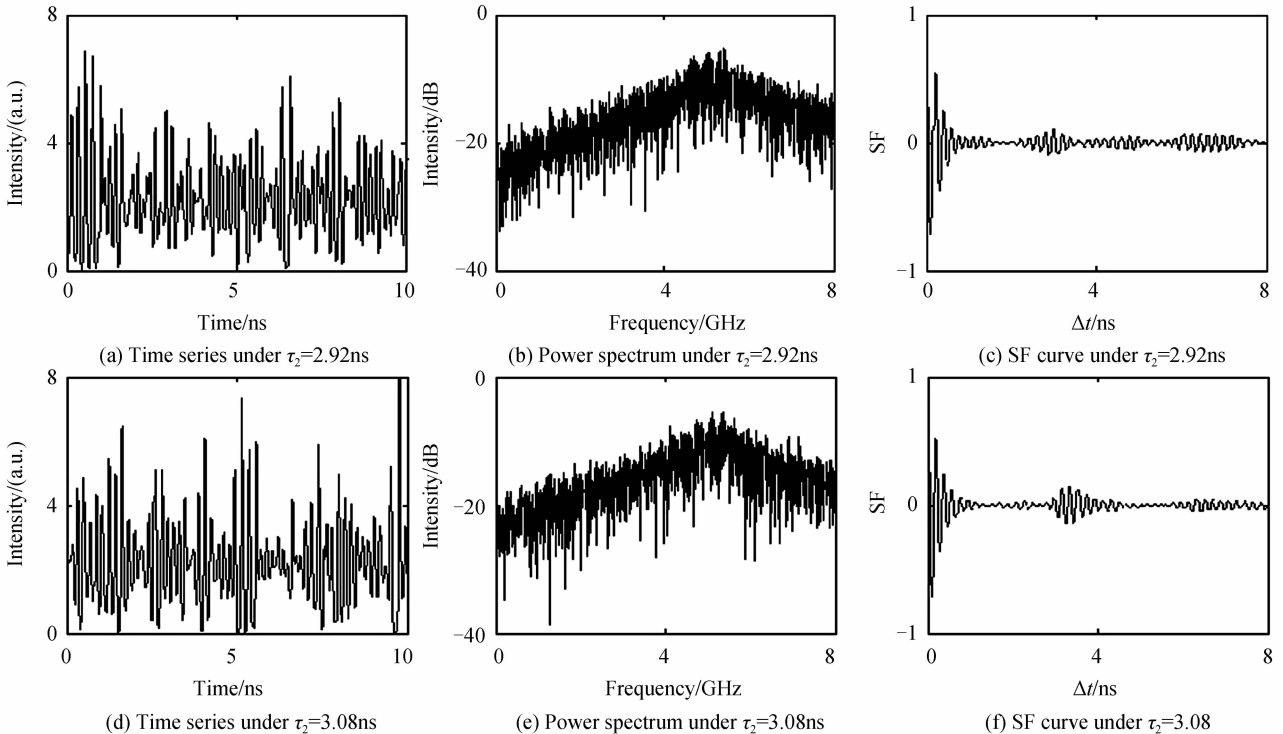


图 3  $\eta_1=0.04$ ,  $\eta_2=0.10$  时, DFOF-SL 的输出特性

Fig. 3 Output characteristics of DFOF-SL under  $\eta_1=0.04$  and  $\eta_2=0.10$

图4为 $\eta_1$ 取不同值, $\tau_2$ 分别为2.92 ns(第一行),3.08 ns(第二行)时DFOF-SL系统(实线)输出混沌延时特征 $\sigma$ 随反馈强度 $\eta_2$ 的变化曲线,反馈腔2的反馈参量为 $\Delta_2=20$  GHz, $\Delta f_2=0$  GHz.为了便于比较,双镜面反馈SL(DMOF-SL)的相应结果也给出,如图中虚线所示.从图中可以看出, $\tau_2$ 分别取2.92 ns,3.08 ns时,混沌延时特征随 $\eta_2$ 的变化趋势大体相近.当 $\eta_1=0.04$ 时(图4(a)、(d)),混沌延时特征首先随 $\eta_2$ 的增大迅速减小并达到最小值,然后随 $\eta_2$ 的增大缓慢增加.这是由于在刚开始阶段, $\eta_1$ 和 $\eta_2$ 都较小,系统还未进入混沌态.随着 $\eta_2$ 的增大,SL从准周期进入混沌,因此混沌延时特征随 $\eta_2$ 的增大而迅速减小.但当系统进入混沌以后,继续增加 $\eta_2$ 导致反馈回SL腔的光强度逐渐增加,因此SL混沌输出的延时特征呈现上升趋势.对比 $\eta_1=0.04$ 时,DMOF-SL和DFOF-SL系统延时特征随 $\eta_2$ 的变化可以发现,当 $\eta_2$ 较小时,DMOF-SL系统对混沌延时特征的抑制效果与DFOF-SL相当,某些情况下甚至更好.其原因在于,滤波反馈由于受到滤

波器带宽的限制,使得有效的反馈光强度比同等条件下DMOF的反馈光强度要弱,导致DMOF-SL在更大的反馈强度下才能使激光器进入相似的混沌状态,这也是延时特征峰出现极值点后移的原因.但当 $\eta_1=0.17$ 时(图4(b)、(e)),单独的反馈腔1已经使SL进入混沌态,反馈腔2的引入可使延时特征减弱,当 $\eta_2$ 处于 $[0,0.2]$ 范围内时,DFOF-SL系统混沌延时特征始终小于DMOF-SL系统,并且在 $\eta_2=0.11$ (图4(b))和 $\eta_2=0.17$ (图4(e))时分别达到最小值0.02和0.09.当 $\eta_1=0.30$ 时(图4(c)、(f)),虽然DMOF-SL和DFOF-SL混沌延时特征均较大,但DFOF-SL的混沌延时特征总是小于DMOF-SL并且几乎不随 $\eta_2$ 变化.这是因为此时 $\eta_1$ 比较大,当 $\eta_2$ 在 $[0,0.2]$ 范围内时,SL混沌延时特征的主要取决于反馈腔1,滤波器的色散特性使得延时特征峰得到展宽从而得到更小的 $\sigma$ ,这是DFOF-SL系统混沌延时特征相对于DMOF-SL较弱的原因.

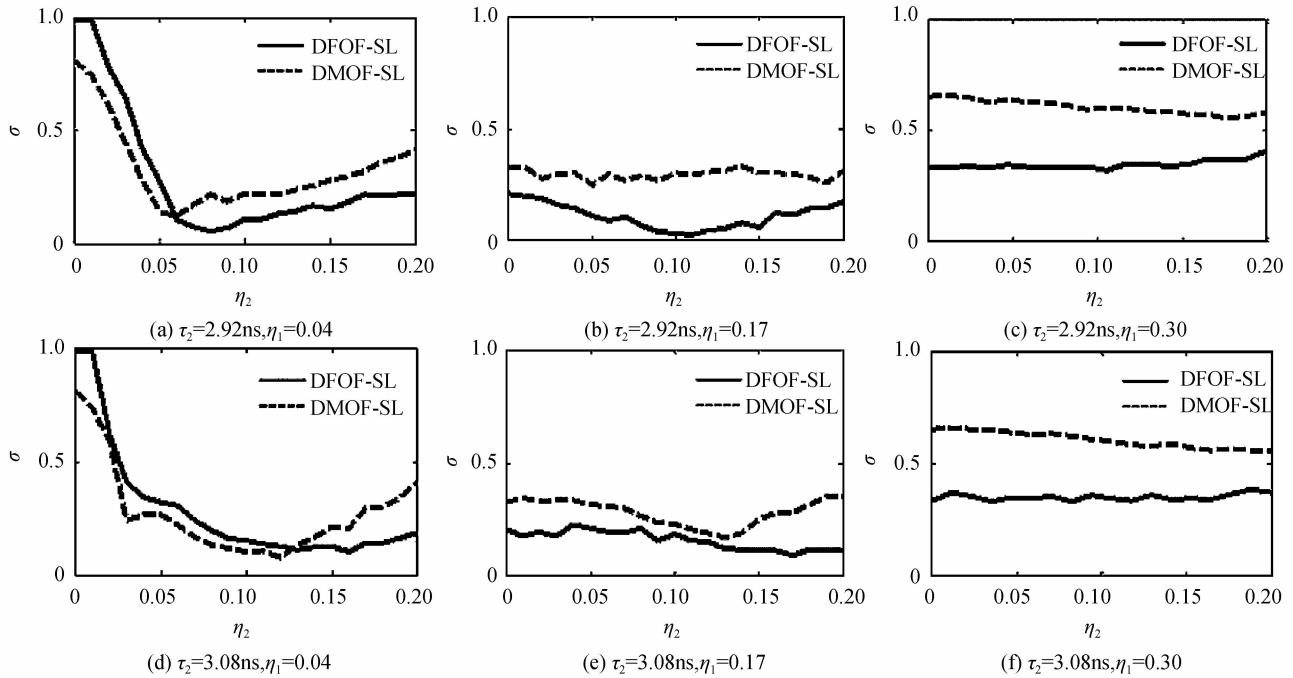


图4 DFOF-SL和DMOF-SL输出混沌信号的延时特征 $\sigma$ 随 $\eta_2$ 的变化

Fig. 4 Variation of the time-delay signature  $\sigma$  with  $\eta_2$  for DFOF-SL and DMOF-SL

讨论滤波器带宽和滤波器的中心频率相对于激光器中心频率的失谐对DFOF-SL系统混沌延时特征的影响.首先,假定两个滤波器的中心频率均位于激光器的中心频率,即 $\Delta f_1=\Delta f_2=0$  GHz,讨论反射腔2的带宽 $\Delta_2$ 对DFOF-SL输出混沌信号延时特征的影响.此处,除 $\Delta_2$ 以外,其余的参量和图4(b)、(e)中使DFOF-SL输出混沌信号延时特征达到极小值时的参量对应,即 $\tau_2=2.92$  ns, $\eta_1=0.17$ , $\eta_2=0.11$ ,以及 $\tau_2=3.08$  ns, $\eta_1=\eta_2=0.17$ 两种情况进行讨论.图5为DFOF-SL输出混沌信号延时特征 $\sigma$ 随反馈腔2带宽 $\Delta_2$ 的变化曲

线.图5(a)中,随 $\Delta_2$ 的增大,混沌延时特征 $\sigma$ 先快速减小,当 $\Delta_2=22$  GHz时达到最小值,然后缓慢增加,最后趋于稳定(约0.22).这样的变化趋势是因为:对于太小的 $\Delta_2$ ,SL输出光中经过滤波器2后几乎被滤除,导致这一反馈支路提供的反馈很小,大部分的光反馈由滤波器1提供,此时DFOF-SL系统混沌延时特征较大.随着 $\Delta_2$ 的增加,滤波器2的作用越来越明显,两外腔的扰动与激光器弛豫振荡之间的非线性耦合导致延时特征的抑制效果越来越明显.当 $\Delta_2=22$  GHz,抑制效果最佳.继续增大 $\Delta_2$ ,则滤波器2提供的色散作用逐

渐减弱,尤其当  $\Delta_2$  增大到可视为与平面镜作用类似时,  $\sigma$  趋于稳定值. 在图 5(b)中,混沌延时特征  $\sigma$  随  $\Delta_2$  的变化趋势与图 5(a)相似,但此时混沌延时特征在  $\Delta_2 = 26$  GHz处最弱.

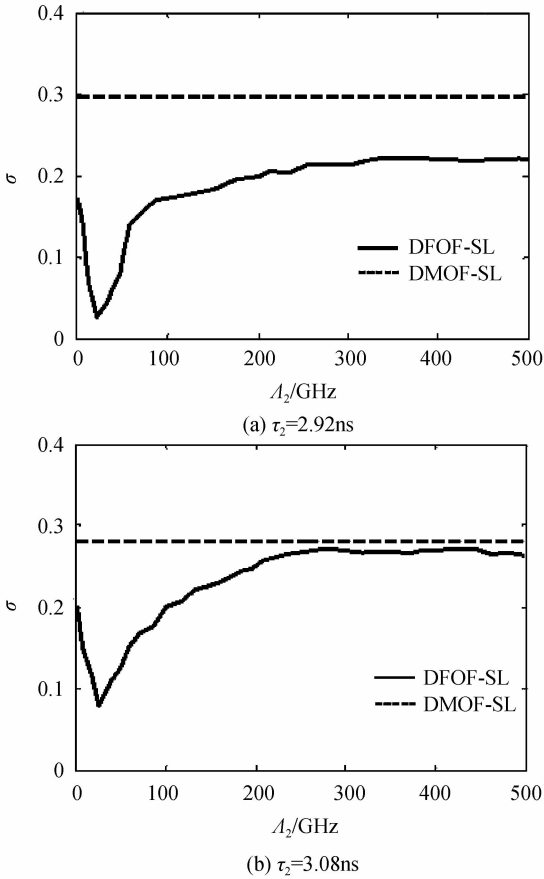


图 5 DFOF-SL 输出混沌信号延时特征  $\sigma$  随  $\Delta_2$  的变化,虚线表示 DMOF-SL 输出混沌的延时特征  $\sigma$  值  
 Fig. 5 Variation of the time-delay signature  $\sigma$  of chaotic signal output from DFOF-SL with  $\Delta_2$ , where the dotted lines is  $\sigma$  of the chaotic signal output from DMOF-SL

除滤波器的带宽以外,滤波器中心频率的变化也会影响 DFOF-SL 输出混沌信号延时特征. 为了确定混沌延时特征能被有效抑制所需的滤波器参量范围,图 6 给出了 DFOF-SL 系统混沌延时特征  $\sigma$  在滤波器 2 带宽  $\Delta_2$  和频率失谐  $\Delta f_2$  构成的参量空间的分布,图中  $\sigma$  值的大小由不同灰度表示,白色实线包围的区域对应  $\sigma < 0.08$ ,即延时特征得到较好抑制的区域. 从图中可以看出:混沌延时特征被有效抑制的区域并不是关于频率失谐  $\Delta f_2 = 0$  GHz 呈对称分布的,负  $\Delta f_2$  更有利于获得延时特征较弱的混沌信号. 另外,  $\tau_2 = 2.92$  ns (图 6(a))与  $\tau_2 = 3.08$  ns(图 6(b))这两种情形所获得弱延时特征混沌信号输出的区域存在差异. 对于  $\tau_2 = 2.92$  ns,延时特征得到较好抑制的区域近似呈“<”型分布;而对于  $\tau_2 = 3.08$  ns,延时特征被抑制区域主要集中在两个区域,一个区域位于  $0 \text{ GHz} < \Delta f_2 <$

$4 \text{ GHz}$ ,  $35 \text{ GHz} < \Delta_2 < 50 \text{ GHz}$ ,另一区域则位于  $-14 \text{ GHz} < \Delta f_2 < -6 \text{ GHz}$ ,  $1 \text{ GHz} < \Delta_2 < 30 \text{ GHz}$ .

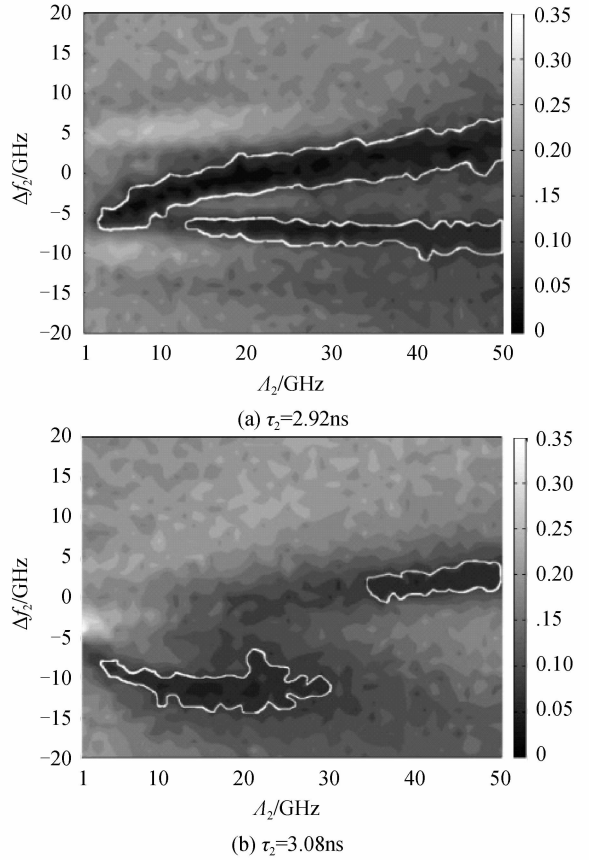


图 6 DFOF-SL 系统输出混沌延时特征  $\sigma$  在  $\Delta_2$  和  $\Delta f_2$  构成的参量空间的分布  
 Fig. 6 Maps of the time-delay signature evolution in the parameter space of  $\Delta_2$  and  $\Delta f_2$

### 3 结论

本文采用双滤波反馈半导体激光器 (DFOF-SL) 获取低延时特征混沌信号,对反馈时间、反馈强度、滤波器带宽、滤波器中心频率与 SL 中心频率之间的频率失谐等系统参量对 DFOF-SL 输出混沌信号延时特征的影响进行了数值仿真和理论分析,确定了获取低延时特征混沌信号所需的参量范围. 研究表明:当两个腔反馈时间差约等于 SL 弛豫振荡周期的一半时,混沌延时特征抑制效果相对较好;在此基础上,通过优化其它反馈参量,系统的混沌延时特征能够被进一步抑制. 依据绘制的混沌延时特征在滤波器带宽和频率失谐构成的参量空间的分布图,确定了能使 DFOF-SL 系统输出延时特征被有效抑制的混沌信号所需的参量范围,本文研究可望为基于 SL 的低延时特征光混沌信号的产生提供一种可行的获取方案.

#### 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, **QE-16**(3): 347-355.

- [2] TOOMEY J P, KANE D M, LEE M W, *et al.* Nonlinear dynamics of semiconductor lasers with feedback and modulation [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(16): 16955-16972.
- [3] TAN Jian-Feng, ZHANG Qing-Hai, YU Wei, *et al.* Chaotic dynamic behaviors of vertical cavity surface emitting laser with delayed optical feedback[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 272-276.  
谭建锋, 张胜海, 王伟, 等. 延迟光反馈 VCSEL 的混沌动力学特性[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 272-276.
- [4] MORK J, TROMBORG B, MARK J. Chaos in semiconductor lasers with optical feedback: theory and experiment[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, **28**(1): 93-108.
- [5] OLIVER N, JÜNGLING T, FISCHER I. Consistency properties of a chaotic semiconductor laser driven by optical feedback[J]. *Physical Review Letters*, 2015, **114**(12): 123902.
- [6] WANG An-bang, WANG Yun-cai, HE Hu-cheng. 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.
- [7] 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.
- [8] LIU Hui-jie, FENG Jiu-chao, REN Bin. Structure of fiber channel in open-loop all-optical chaotic communication system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1267-1273.  
刘慧杰, 冯久超, 任斌. 开环全光混沌通信系统中的光纤信道结构[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1267-1273.
- [9] 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.
- [10] LI Xiao-zhou, LI Song-sui, ZHUANG Jun-ping, *et al.* Random bit generation at tunable rates using a chaotic semiconductor laser under distributed feedback[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(17): 3970-3973.
- [11] WANG Bing-jie, WANG Yun-cai, KONG Ling-qin, *et al.* Multi-target real-time ranging with chaotic laser radar[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, **6**(11): 868-870.
- [12] ZHANG Ming-jiang, LIU Tie-gen, LI Pu, *et al.* Generation of broadband chaotic laser using dual-wavelength optically injected Fabry-Pérot laser diode with optical feedback[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(24): 1872-1874.
- [13] 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.
- [14] VOSS H, KURTHS J. Reconstruction of nonlinear time-delayed feedback models from optical data[J]. *Chaos Solitons & Fractals*, 1999, **10**(4): 805-809.
- [15] 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.
- [16] RONTANI D, LOCQUET A, SCIAMANNA M, *et al.* Time-delay identification in a chaotic semiconductor laser with optical feedback: a dynamical point of view [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, **45**(7): 879-891.
- [17] LEE M W, REES P, SHORE K A, *et al.* Dynamical characterisation of laser diode subject to double optical feedback for chaotic optical communications [J]. *IEEE Proceedings*, 2005, **152**(2): 97-102.
- [18] WU Jia-gui, XIA Guang-qiong, WU Zheng-mao. Suppression of time delay signatures of chaotic output in a semiconductor laser with double optical feedback[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(22): 20124-20133.
- [19] ZHONG Zhu-qiang, LI Song-sui, CHAN Sze-chun, *et al.* Polarization-resolved time-delay signatures of chaos induced by FBG-feedback in VCSEL[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(12): 15459-15468.
- [20] LI Song-sui, LIU Qing, CHAN Sze-chun. Distributed feedbacks for time-delay signature suppression of chaos generated from a semiconductor laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, **4**(5): 1930-1935.
- [21] YOUSEFI M, LENSTRA D, VEMURI G. Nonlinear dynamics of a semiconductor laser with filtered optical feedback and the influence of noise[J]. *Physical Review E*, 2003, **67**(4): 046213.
- [22] WU Yuan, WANG Bing-jie, ZHANG Jian-zhong, *et al.* Suppression of time delay signature in chaotic semiconductor lasers with filtered optical feedback [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, **2013**(4): 571393.
- [23] ZHOU Li, XIA Guang-qiong, ZHONG Zhu-qiang, *et al.* Time-delay signature concealment of polarization-resolved chaos outputs in vertical-cavity surface-emitting lasers with variable-polarization filtered optical feedback [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, **13**(9): 091401.
- [24] ZHU Ning, ZHANG Hui, LI Han. Ultra-compact stub-type wavelength filter based on hybrid plasmonic waveguide structure improved for fabrication[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(7): 883-888.  
朱凝, 张辉, 李浩. 基于一种易于制作的混合型表面等离子体波导结构的超紧凑截线滤波器[J]. *发光学报*, 2014, **35**(7): 883-888.
- [25] UDALTSOV V S, LARGER L, GOEDGEBUER J P, *et al.* Time delay identification in chaotic cryptosystems ruled by delay-differential equations [J]. *Journal of Optical Technology*, 2005, **72**(5): 373-377.
- [26] CHRISTOPH B, BERND P. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series [J]. *Physical Review Letters*, 2002, **88**(17): 1741.