

光电反馈半导体激光器输出光的混沌特性

张依宁¹, 徐艾诗², 冯玉玲^{1*}, 赵振明¹, 姚治海¹

¹长春理工大学物理系, 吉林 长春 130022;

²吉林大学动物科学学院, 吉林 长春 130062

摘要 外腔延时特征(TDS)和带宽是影响混沌激光应用的两个重要参量。将一个具有相位调制光反馈的半导体激光器输出的激光注入到另一个具有光电反馈的半导体激光器中,构成一个具有外光注入的光电反馈半导体激光器系统,即主从激光器系统,用于降低混沌激光的 TDS 并提高其带宽。数值研究了外光注入系数、反馈强度和抽运因子对 TDS 的影响,并研究了主激光器输出混沌光的 TDS 对从激光器输出混沌光 TDS 的影响。然后在 TDS 被有效抑制的基础上研究了系统输出混沌激光的带宽,结果表明:该方案可以有效地降低混沌激光的 TDS,外光注入系数、反馈强度和抽运因子的增大都能拓宽混沌激光的带宽。

关键词 激光器; 半导体激光器; 混沌激光; 光电反馈; 延时特征; 带宽

中图分类号 O415

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1214001

Chaos Characteristics of the Output from a Semiconductor Laser Subject to Optoelectronic Feedback

Zhang Yining¹, Xu Aishi², Feng Yuling^{1*}, Zhao Zhenming¹, Yao Zhihai¹

¹Department of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²College of Animal Science, Jilin University, Changchun, Jilin 130062, China

Abstract Time delay signature (TDS) of an external cavity and bandwidth are two important parameters that affect the applications of chaotic lasers. In this work, the output laser from a semiconductor laser with phase-modulated optical feedback was injected into another semiconductor laser with optoelectronic feedback. The two lasers thus formed an optically injected semiconductor laser subject to optoelectronic feedback, i. e., a master-slave laser system, which can be used to reduce the TDS of a chaotic laser and increase its bandwidth. The effects of external light injection coefficient, feedback intensity, and pumping factor on the TDS of the chaotic laser output from the system were numerically studied, and the influence of the TDS of the chaotic laser output from the master laser on the TDS of the chaotic laser output from the slave laser was investigated. Moreover, the bandwidth of the chaotic laser output was investigated based on the effective suppression of TDS. Results show that this scheme can effectively reduce the TDS of the chaotic laser, and increasing the external light injection coefficient, feedback intensity, and pumping factor can widen the bandwidth of the chaotic laser.

Key words lasers; semiconductor lasers; chaotic laser; optoelectronic feedback; time-delay signature; bandwidth

OCIS codes 140.5960; 140.1540; 060.4510

1 引 言

半导体激光器(SL)在光注入、光反馈或光电反馈等外部扰动下均可以输出混沌激光^[1-4]。SL输出的混沌激光在高速真随机数生成与应用^[5-6]、光时域反射仪^[7]、混沌保密通信^[8]和混沌激光雷达^[9]等领域得到了广泛的应用。外腔反馈 SL 输出的混沌激

光是较好的混沌熵源之一^[10-15]。但由于外腔反馈等作用,导致 SL 输出的混沌激光中产生明显的外腔延时特征(TDS),制约了混沌激光的应用,另一方面,混沌激光的带宽决定了保密通信的传输速率,因此研究混沌激光的 TDS 和带宽对混沌激光的应用具有重大意义。Xiang 等^[16]数值研究表明相位调制光反馈对混沌激光的 TDS 具有抑制作用。Wang

收稿日期: 2020-01-06; 修回日期: 2020-01-17; 录用日期: 2020-03-16

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20190201135JC)

* E-mail: FYLCUST@163.com

等^[17]数值和实验研究发现外光反馈 SL 输出混沌激光的非相干延迟自干涉(DSI)能够产生高带宽的混沌信号。此外,DSI 还抑制了由外腔模式引起的延时特征。Zhang 等^[18]利用实验和模拟研究了光注入半导体激光器系统的 TDS 随主激光器参数的变化。Schires 等^[19]实验证实长短反馈相结合的混合分布反馈半导体激光器系统可以用于提高混沌激光的带宽。Zhao 等^[20]利用实验和仿真研究了一个具有自相位调制的光反馈半导体激光器系统混沌输出的有效带宽和 TDS。结果发现在相位调制引起的频谱扩展和延迟干涉的非线性滤波的共同作用下,可以在宽动态工作范围内产生具有平坦频谱并具有优异 TDS 抑制特性的宽带混沌。Uchida 等^[21]研究表明通过光注入方式半导体激光器可以实现混沌信号带宽增强。Li 等^[22]数值研究了相位调制光反馈半导体激光器输出混沌光的延时特征和带宽。Lin 等^[2]数值研究了具有光电反馈的半导体激光器混

合系统的动力学特性。结果表明该混合系统在宽区域内都处于混沌状态,并且混沌状态的带宽随着注入强度的增加显著增强。基于此,本文提出了一个主从激光器系统,该系统将一个相位调制光反馈半导体激光器产生的激光注入到另一个光电反馈的半导体激光器中,数值验证了具有外光注入的光电反馈半导体激光器系统可以有效地抑制混沌输出的延时特征,并进一步研究了主激光器反馈腔的 TDS 对从激光器反馈腔 TDS 的影响,最后通过改变系统参数,证实了该方案可以拓宽混沌激光的带宽。

2 理论模型

将具有相位调制光反馈的分布反馈半导体激光器(DFB-SL)作为主激光器,将具有光电反馈的 DFB-SL 作为从激光器,提出方案的系统示意图如图 1 所示。

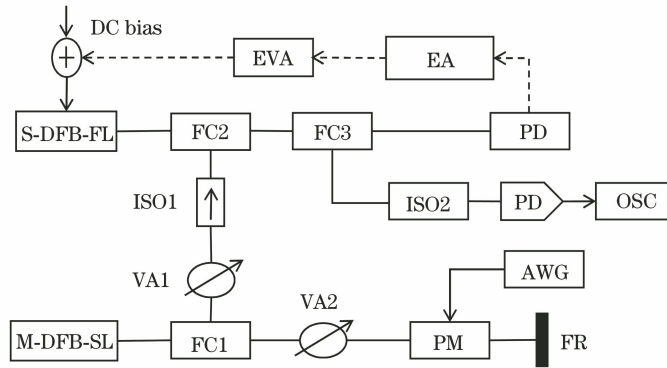


图 1 具有外光注入光电反馈的半导体激光器系统示意图

Fig. 1 System diagram of an optically injected semiconductor laser subject to optoelectronic feedback

图 1 中 M-DFB-SL 和 S-DFB-SL 分别代表主从激光器;M-DFB-SL 产生的激光通过光纤耦合器 1(FC1)之后分成两束,一束经过可调衰减器 1(VA1)、光隔离器 1(ISO1)以及 FC2 注入到 S-DFB-SL 中,形成外光注入,另一束光经过 VA2、相位调制器(PM)以及光纤反射镜(FR)再反馈回 M-DFB-SL 中,这里驱动相位调制器的方法是利用任意波发生器(AWG)所产生的伪随机信号,改变主激光器外腔反馈光的相位并消除弱周期性;S-DFB-SL

产生的激光经过 FC2 和 FC3 后分成两束,其中一束经过光电探测器(PD),将光信号转换成电信号,之后再经过电信号放大器(EA)以及电信号可调衰减器(EVA)后反馈回 S-DFB-SL 中,形成光电反馈,DC 为外加直流偏置电流,从 FC3 发出的另一束光通过 ISO2 后,利用 PD 转换成电信号,之后再输入到用于观察和记录混沌波型的示波器(OSC)中;其中虚线为电路。用于描述图 1 所示的半导体激光器系统^[2,23]的动力学方程可表示为

$$\frac{dE_m(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha_m) \left[\frac{g_m(N_m(t) - N_{0m})}{1 + \epsilon_m |E_m(t)|^2} - \tau_p^{-1} \right] E_m(t) + \frac{\xi_{fm}}{\tau_{in}} E_m(t - \tau_m) \exp(-i\omega_m \tau_m) \exp[i\varphi_{PM}(t)], \quad (1)$$

$$\frac{dN_m(t)}{dt} = P_m J_{th} - \frac{N_m(t)}{\tau_N} - \frac{g_m(N_m - N_{0m})}{1 + \epsilon_m |E_m(t)|^2} |E_m(t)|^2, \quad (2)$$

$$\frac{dE_s(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha_s) \left[\frac{g_s(N_s(t) - N_{0s})}{1 + \epsilon_s |E_s(t)|^2} - \tau_p^{-1} \right] E_s(t) + \frac{k_{in}}{\tau_{in}} E_m(t) \exp(i2\pi\Delta ft), \quad (3)$$

$$\frac{dN_s(t)}{dt} = P_s J_{th} \left[1 + \frac{\xi_{fs} |E_s(t - \tau_s)|^2}{|E_s(t)|^2} \right] - \frac{N_s(t)}{\tau_N} - \frac{g_s(N_s - N_{0s})}{1 + \epsilon_s |E_s(t)|^2} |E_s(t)|^2, \quad (4)$$

式中： $E_m(t)$ 和 $E_s(t)$ 分别表示主从激光器的慢变电场复振幅，其中脚标 m 和 s 分别代表主从激光器； $N(t)$ 是载流子密度； P_m 和 P_s 分别为主从激光器的抽运因子； $\Delta f = (\omega_m - \omega_s)/2\pi$ 表示主从激光器中心场频率之间的频率失谐， ω_m 和 ω_s 分别为主从激光器的中心场角频率； g_m 和 g_s 分别为主从激光器的微分增益系数； α_m 和 α_s 分别是主从激光器的线宽增强因子； k_{in} 为外光注入系数； ϵ_m 和 ϵ_s 分别是主从激光器的饱和增益系数； N_{0m} 和 N_{0s} 分别是主从激光器的透明载流子密度； τ_p 为激光腔内光子寿命； τ_N 为激光腔内载流子寿命； J_{th} 是阈

值电流密度，且 $J_{th} = N_{th}/\tau_N$ ， $N_{th} = N_0 + 1/g\tau_p$ ； τ_{in} 是光子在激光腔内的往返时间； τ_m 是主激光器的外腔延迟时间； ξ_{fm} 是主激光器反馈腔的反馈强度； τ_s 是从激光器的外腔延迟时间； ξ_{fs} 是从激光器反馈腔的反馈强度； φ_{PM} 是系统中PM产生的相移，并且 $\varphi_{PM} = \pi V_{RF} f_m(t)/V_\pi$ ，其中 $f_m(t)$ 为二进制的伪随机信号序列，这里定义 $B = V_{RF}/V_\pi$ 来描述相位调制器的调制深度^[16]， $V_{RF} f_m(t)$ 为AWG施加在PM上的调制电压， V_π 为相位调制器的半波电压。

本文采用的自相关函数(ACF)定义为^[16]

$$C_I(\Delta t) = \frac{\langle [I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle] [I(t) - \langle I(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle]^2 \rangle \langle [I(t) - \langle I(t) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (5)$$

式中： $I(t) = E(t)^2$ 表示混沌光强度时间序列； $\langle \cdot \rangle$ 表示对时间求平均； Δt 表示时移。从激光器输出混沌光的延时特征值 β 是根据输出光的自相关函数曲线中的局部最大值来进行定量描述的。根据现有研究，一般认为延时特征值 β 小于0.2时，即认为TDS得到了较好的隐藏^[24]。

3 TDS的数值研究与分析

首先研究外光注入系数 k_{in} 、反馈强度 ξ_{fs} 和抽运因子 P_s 对S-DFB-SL输出混沌光TDS的影响。数值计算中的 $f_m(t)$ 用伪随机序列代替，伪随机序列的码率为1 Gbit/s，伪随机数的取值区间为 $[-1, 1]$ ^[23]。参数取值如下^[25-26]： $\alpha = 5.0$ ， $g = 8.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ， $N_0 = 1.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ， $\tau_p = 1.927 \times 10^{-12} \text{ s}$ ， $\tau_N = 2.04 \times 10^{-9} \text{ s}$ ， $\epsilon = 2.5 \times 10^{-23} \text{ m}^3$ ， $P_m = 1.2$ ， $P_s = 1.5$ ， $\xi_{fm} = 0.1$ ， $\tau_m = 2.8 \text{ ns}$ ， $k_{in} = 0.05$ ， $\xi_{fs} = 0.01$ ， $\Delta f = 3.0 \text{ GHz}$ ， $B = 1.0$ 。用以上参数数值求解方程(1)~(4)式，其中数值计算利用了四阶龙格-库塔法，得到 τ_s 分别为2.9, 3.0, 3.1 ns时，从激光器输出混沌光的时间序列以及自相关函数曲线，如图2所示。

在图2(a1)~(a3)中，光强的幅值随时间的变化呈现无规则的起伏，说明此时系统输出的是混沌激光；由图2(b1)~(b3)可见，左边第一个尖峰几乎

和纵轴重合，这是由激光器的弛豫振荡引起的^[17]，其余的尖峰即为延时特征峰。通过观察对比图2(b1)~(b3)，可见延时特征峰的峰值都小于0.2，并且图2(b2) ($\tau_s = 3.0 \text{ ns}$)中峰值最小，所以当 $\tau_s = 3.0 \text{ ns}$ 时，TDS得到了较好的抑制。这是由于此时两个反馈腔的延时差 $\tau_s - \tau_m = 0.2 \text{ ns}$ 等于半导体激光器的弛豫振荡周期 $\tau_{RO} \approx 2\pi (gE^2/\tau_p)^{-1/2} \approx 0.2 \text{ ns}$ ^[27]。

3.1 外光注入系数 k_{in} 和反馈强度 ξ_{fs} 对TDS的影响

取对TDS具有较好抑制的延迟时间 $\tau_s = 3.0 \text{ ns}$ ，其他参数取值与图2(b2)保持一致，数值求解方程(1)~(4)式，得到图3所示的系统输出混沌光的延时特征值 β 随外光注入系数 k_{in} 和反馈强度 ξ_{fs} 变化的二维图。

由图3可见：当外光注入系数 k_{in} 在区间(0.002, 0.12)，反馈强度 ξ_{fs} 在区间(0, 0.03)时， β 值都是较小的，都小于0.2，即TDS已被很好地抑制；在 k_{in} 保持不变的情况下，随着 ξ_{fs} 在区间(0, 0.20)内的逐渐增大，系统输出混沌激光的 β 值也逐渐增大。其原因是：随着 ξ_{fs} 的逐渐增大，增益饱和现象会使系统输出光的光强逐渐减弱，导致系统由于光电反馈产生的弱周期性趋于增强，所以 β 值逐渐增大。

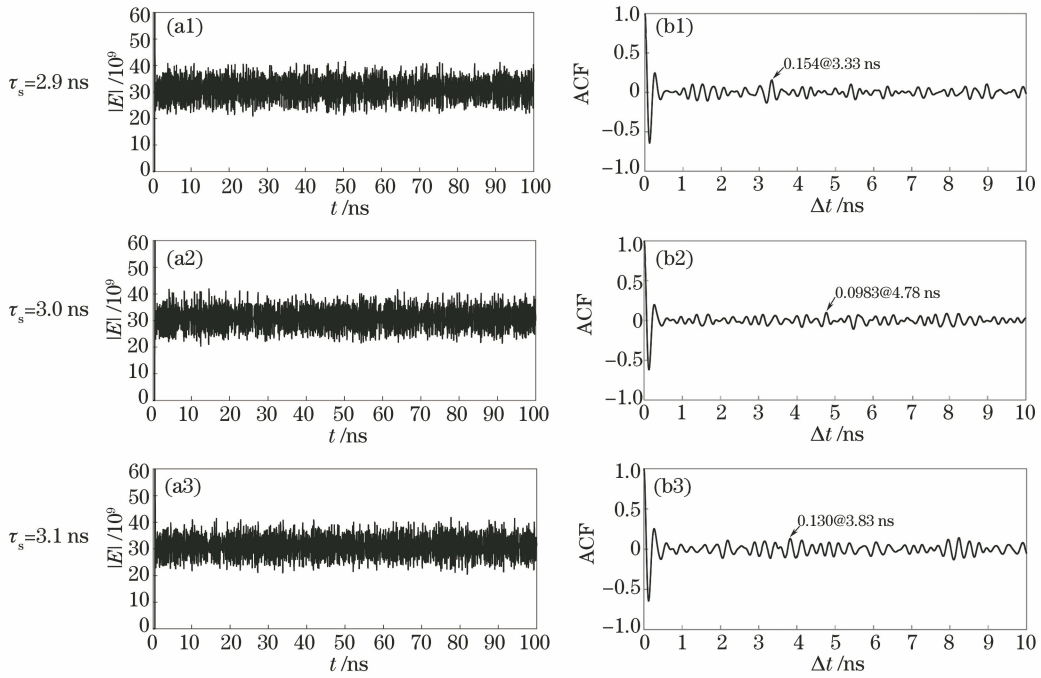


图 2 不同延迟时间 τ_s 下系统输出混沌激光的时间序列和自相关函数曲线。(a1)~(a3)时间序列;(b1)~(b3)自相关函数曲线
 Fig. 2 Time series and the corresponding ACF curves of chaotic laser output from the system under the different delay time. (a1)–(a3) Time series; (b1)–(b3) ACF curves

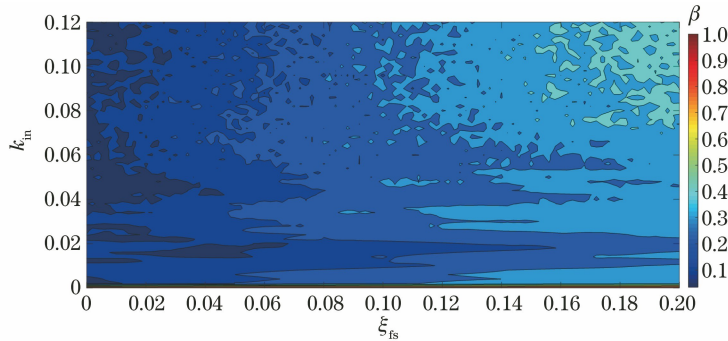


图 3 系统输出混沌激光的延时特征值 β 随参数 k_{in} 和 ξ_{is} 变化的二维图
 Fig. 3 Two-dimensional map of the time delay characteristic value β in the parameter space of k_{in} and ξ_{is} of chaotic laser from the system

3.2 抽运因子 P_s 对 TDS 的影响

取对 TDS 抑制效果较好的参数 ($k_{in} = 0.04$, $\xi_{is} = 0.01$, 其他的参数取值保持不变), 研究抽运因子 P_s 对 TDS 的影响, 数值求解方程(1)~(4)式, 得到如图 4(a)所示的系统输出混沌激光的延时特征值 β 随 P_s 的变化曲线; 为了将这个曲线和无外光注入时从激光器输出混沌光的 β 值进行对比, 取 $k_{in} = 0$, 其他参数取值与图 4(a)相同, 数值求解方程(1)~(4)式, 得到无光注入时从激光器输出混沌光的 β 值随 P_s 的变化曲线, 如图 4(b)所示。

通过观察对比图 4(a)与(b)可见: 在所选的控制参数区间范围内, 无光注入时从激光器输出混沌

光的延时特征值 β 远大于有光注入时的 β 值, 其原因是: 外部光注入对从激光器状态的干扰可以有效抑制混沌激光的 TDS^[18]; 并且发现系统在有光注入时输出混沌光的 β 值都小于 0.2, 即 TDS 已被很好地抑制。通过与无光注入系统进行对比, 说明本文所提出的方案(具有外光注入的光电反馈半导体激光器系统)对 TDS 抑制的有效性。由图 4(a)可见: 当 P_s 在区间(1.2, 1.7)内逐渐增大时, β 值先逐渐减小, 在 $P_s = 1.5$ 时达到一个极小值后再逐步增大, 其原因是: 当 P_s 在(1.2, 1.5)内增加时, 反转粒子数的增加使系统输出光的光强逐渐变大, 导致系统输出混沌光的混沌程度逐渐增强, β 值减小; 随着

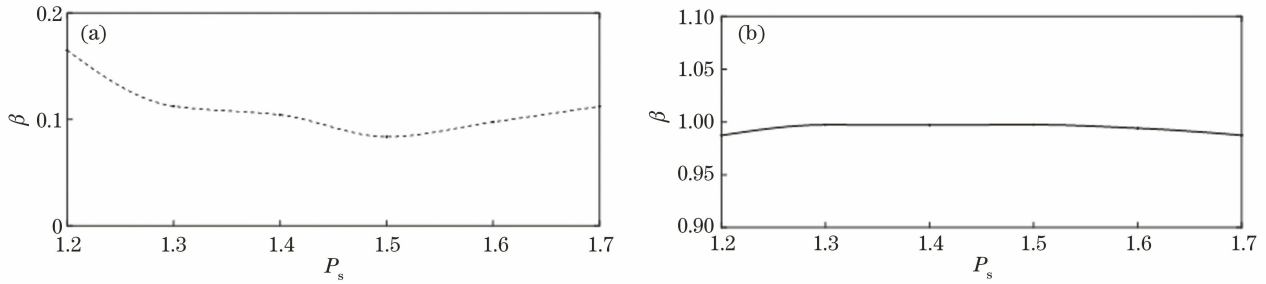


图 4 有无光注入时从激光器输出混沌光的延时特征值 β 随 P_s 的变化。(a) 有光注入时; (b) 无光注入时

Fig. 4 Variations of the time delay characteristic value β versus P_s of chaotic laser output from the slave laser with and without optical injection. (a) With optical injection; (b) without optical injection

P_s 在(1.5,1.7)内继续增加时,增益饱和现象会使系统输出光的光强逐渐减弱,系统输出激光的混沌程度也逐渐减弱,从而导致 β 值逐渐增大。

3.3 主激光器输出混沌光的 TDS 对系统输出混沌光 TDS 的影响

取 $P_s=1.5$,其他的参数取值与图 4(a)一致,通过改变主激光器的抽运因子 P_m ,研究主激光器输出混沌光的 TDS 对从激光器输出混沌光 TDS 的影响。

由图 5(a)可见:在有相位调制器的情况下主激光器输出混沌光的 β 值在所选的参数区间内都远小于无相位调制器时的 β 值,这是由于主激光器反馈腔中的相位调制器产生的相移 φ_{PM} 随伪随机信号的无规律变化,可以对主激光器反馈腔所产生的弱周

期性起到消除的作用,从而使得主激光器输出混沌光的 β 值随 P_m 的变化平缓,且都小于 0.2,即 TDS 得到了较好地抑制。由图 5(b)可见:在主激光器带有相位调制器的情况下从激光器输出混沌光的 β 值在所选的参数区间内也都小于主激光器中无相位调制器时从激光器输出混沌激光的 β 值,且从激光器的 β 值随 P_m 的变化平缓,在所选择的参数范围内 β 值都小于 0.1,即 TDS 得到了更好地抑制,其原因是当主激光器中带有相位调制器时,由图 5(a)已知主激光器注入到从激光器的激光的弱周期性较小,使从激光器输出混沌光的弱周期性也较小,TDS 得到了较好的抑制。由此证明当主激光器输出混沌光的 TDS 被有效抑制时,从激光器输出混沌光的 TDS 也因此得到较好的抑制。

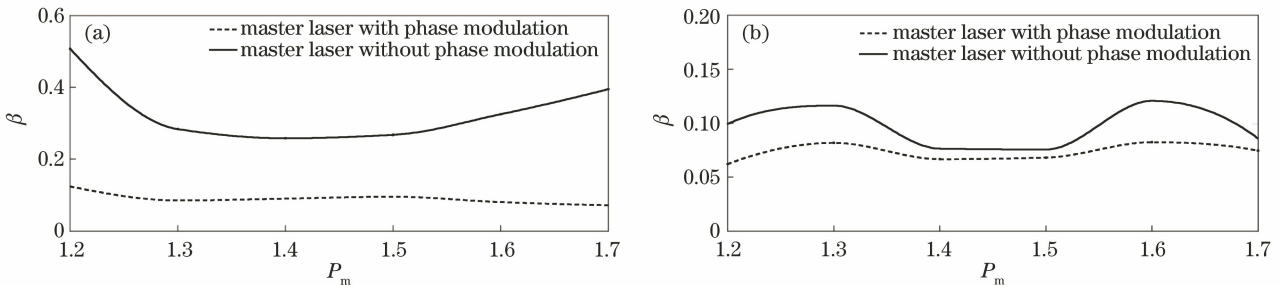


图 5 主激光器中具有相位调制和主激光器中无相位调制时主从激光器输出混沌光延时特征值 β 随 P_m 的变化。

(a)主激光器;(b)从激光器

Fig. 5 Variations of the time delay characteristic value β versus P_m of the chaotic laser output from the master laser and the slave laser. (a) Master laser; (b) slave laser

4 带宽的数值研究与分析

图 6(a)-(d)给出了当 $\tau_s=3.0$ ns, $P_s=1.5$ 时,随外光注入系数 k_{in} 和反馈强度 ξ_{fs} 变化的系统输出混沌激光的功率谱,白色曲线表示的是拟合平滑后的功率谱,其中:图 6(a)为从激光器 $k_{in}=0.04, \xi_{fs}=0$ (无光电反馈)时混沌激光的功率谱,经计算此时的 3 dB 带宽为 4.28 GHz;图 6(b)为 $k_{in}=0.08, \xi_{fs}=$

0.06 时混沌激光的功率谱,经计算此时的 3 dB 带宽为 5.88 GHz;图 6(c)为 $k_{in}=0.15, \xi_{fs}=0.12$ 时混沌激光的功率谱,此时的带宽为 6.58 GHz;图 6(d)为 $k_{in}=0.20, \xi_{fs}=0.18$ 时混沌激光的功率谱,此时的带宽为 7.57 GHz,与图 6(a)无光电反馈相比,带宽显著增强。通过对比图 6(a)~(d)发现混沌激光的带宽逐渐增大,这是由于:随着 k_{in} 的增大,主激光器对从激光器的状态扰动增强,使从激光器输出混沌激光信号

所包含的不同频率成分所在的频率范围变大,即带宽增加^[28-29];由方程(4)式可知,随着 ξ_{fs} 的增大,相当于

从激光器的 P_s 增大,弛豫振荡频率随着 P_s 的增大而增大,使得系统输出混沌光的带宽增加^[28]。

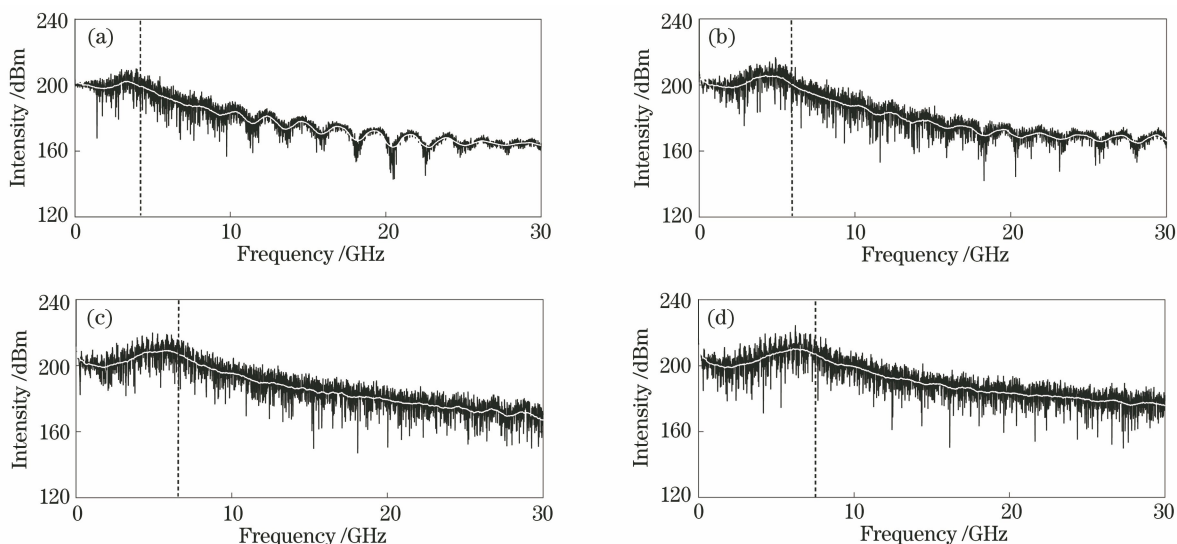


图 6 不同参数下系统输出混沌激光的功率谱(虚线表示混沌激光的 3 dB 带宽)。(a) $k_{in}=0.04, \xi_{fs}=0$;
(b) $k_{in}=0.08, \xi_{fs}=0.06$; (c) $k_{in}=0.15, \xi_{fs}=0.12$; (d) $k_{in}=0.20, \xi_{fs}=0.18$

Fig. 6 Power spectra of chaotic laser from the system under different parameters (the dotted line indicates the 3 dB bandwidth of the chaotic laser). (a) $k_{in}=0.04, \xi_{fs}=0$; (b) $k_{in}=0.08, \xi_{fs}=0.06$; (c) $k_{in}=0.15, \xi_{fs}=0.12$;
(d) $k_{in}=0.20, \xi_{fs}=0.18$

下面研究抽运因子 P_s 对系统输出混沌激光带宽的影响,取 $k_{in}=0.04, \xi_{fs}=0.10$,数值求解方程(1)~(4)式,得到带宽随 P_s 的变化曲线如图 7 所示。

5 结 论

采用外光注入和光电反馈半导体激光器系统用于抑制混沌激光的 TDS 并研究了其带宽。首先对外光注入系数 k_{in} 、反馈强度 ξ_{fs} 和抽运因子 P_s 对系统输出混沌光 TDS 的影响进行数值研究和理论分析。给出系统输出混沌光的延时特征值 β 随 k_{in} 和 ξ_{fs} 变化过程中 TDS 被有效抑制的取值参数区间;发现当 ξ_{fs} 逐渐增大时, β 值随之增大;随着 P_s 的增大,系统输出混沌光的 β 值先逐渐减小到一个极小值后再逐渐增大。研究了主激光器输出混沌光的 TDS 对从激光器输出混沌光 TDS 的影响,结果表明:当主激光器输出混沌光的 TDS 被有效抑制时,从激光器输出混沌光的 TDS 也因此得到较好的抑制。最后研究了系统输出混沌激光的带宽随上述三个参量的变化,结果表明:随外光注入系数 k_{in} 、反馈强度 ξ_{fs} 和抽运因子 P_s 在所选参数区间内逐渐增大,系统输出混沌光的带宽增大。其原因是: k_{in} 的增大使主激光器对从激光器状态的扰动增强,从而使其输出混沌光的带宽增加; ξ_{fs} 和 P_s 的增大,都会使从激光器的弛豫振荡频率增大,从而使其输出混沌光的带宽增加。本研究获得了最大值约为 7.57 GHz 的混沌激光。综上所述,本文所提出的系统可以较好地抑制混沌激光的延时特征并提高其带

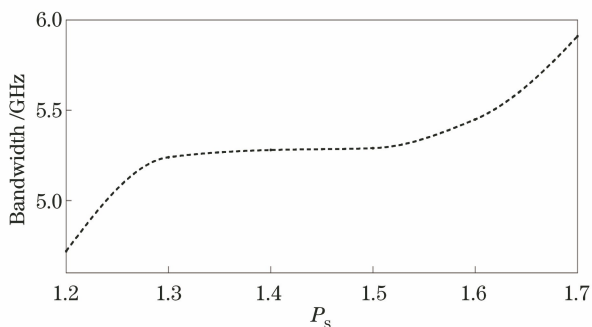


图 7 系统输出混沌激光的带宽随 P_s 的变化

Fig. 7 Variations of bandwidth versus P_s of chaotic laser from the system

由图 7 可见:当 P_s 在区间(1.2, 1.7)内逐渐增大时,带宽也逐渐增大,这是由于:随着 P_s 在区间(1.2, 1.7)内的增大,从激光器的弛豫振荡频率变大,从激光器输出混沌光的频谱变得平坦,即带宽增加^[28]。

综上所述,在所选的参数区间内,本文所提出的方案可以有效提高混沌激光的带宽。

宽,数值研究证明了该方案的可行性。以上的研究成果可以用于混沌激光的应用领域。

参 考 文 献

- [1] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A, et al. Period-doubling cascades and chaos in a semiconductor laser with optical injection[J]. *Physical Review A*, 1995, 51(5): 4181-4185.
- [2] Lin F Y, Liu J M. Nonlinear dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser subject to optoelectronic feedback [J]. *Optics Communications*, 2003, 221(1/2/3): 173-180.
- [3] Yan S L. Study of dynamics and generalized chaotic synchronization in lasers due to opto-electronic conversion[J]. *Journal of Optical Communications*, 2009, 30(1): 20-28.
- [4] Deng T, Xia G Q, Cao L P, et al. Bidirectional chaos synchronization and communication in semiconductor lasers with optoelectronic feedback [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(11): 2243-2249.
- [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] Metropolis N, Ulam S. The Monte Carlo method [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1949, 44(247): 335-341.
- [7] Wang Y C, Wang B J, Wang A B. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(19): 1636-1638.
- [8] 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.
- [9] Lin F Y, Liu J M. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(6): 815-820.
- [10] Zhang J B, Zhang J Z, Yang Y B, 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] Wu J G, Xia G Q, Tang X, et al. Time delay signature concealment of optical feedback induced chaos in an external cavity semiconductor laser [J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 6661-6666.
- [12] Jafari A, Sedghi H, Mabhouti K, et al. Slave-master dynamics of semiconductor laser with short external cavity[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(12): 3018-3029.
- [13] 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.
- [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] Vicente R, Dauden J, Colet P, et al. Analysis and characterization of the hyperchaos generated by a semiconductor laser subject to a delayed feedback loop [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, 41(4): 541-548.
- [16] Xiang S Y, Pan W, Zhang L Y, et al. Phase-modulated dual-path feedback for time delay signature suppression from intensity and phase chaos in semiconductor laser [J]. *Optics Communications*, 2014, 324: 38-46.
- [17] Wang A B, Yang Y B, Wang B J, et al. Generation of wideband chaos with suppressed time-delay signature by delayed self-interference [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8701-8710.
- [18] Zhang L Y, Pan W, Mu P H, et al. The role of master laser with feedback in time-delay signature suppression of semiconductor laser subject to chaotic optical injection [J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2017, 27(11): 1750169.
- [19] Schires K, Gomez S, Gallet A, et al. Passive chaos bandwidth enhancement under dual-optical feedback with hybrid III-V/Si DFB laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(6): 1-9.
- [20] Zhao A K, Jiang N, Liu S Q, et al. Wideband complex-enhanced chaos generation using a semiconductor laser subject to delay-interfered self-phase-modulated feedback [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12336-12348.
- [21] 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.
- [22] Li Z, Feng Y L, Wang X Q, et al. Time delay characteristics and bandwidth of chaotic laser from semiconductor laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(14): 140501.
李增, 冯玉玲, 王晓茜, 等. 半导体激光器输出混沌光的延时特性和带宽[J]. *物理学报*, 2018, 67(14): 140501.
- [23] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback

- effects on semiconductor injection laser properties [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(3): 347-355.
- [24] 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): 3733-3777.
- [25] Mikami T, Kanno K, Aoyama K, et al. Estimation of entropy rate in a fast physical random-bit generator using a chaotic semiconductor laser with intrinsic noise [J]. Physical Review E, 2012, 85: 016211.
- [26] Li S S, Chan S C. Chaotic time-delay signature suppression in a semiconductor laser with frequency-detuned grating feedback [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(6): 541-552.
- [27] Jiang L, Xia G Q, Wu J G, et al. Optimization analysis on complex degree of optical chaos in a semiconductor laser with double optical feedback [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 1202003.
- 蒋龙, 夏光琼, 吴加贵, 等. 双光反馈半导体激光混沌高复杂度优化分析 [J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1202003.
- [28] Wang Y S, Zhao T, Wang A B, et al. Design and dynamic characteristics of an external-cavity semiconductor laser generating wide bandwidth chaos [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111401.
- 王永胜, 赵彤, 王安帮, 等. 一种可产生高带宽混沌的外腔半导体激光器的设计及其动态特性 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 111401.
- [29] Wang Y C, Zhang G W, Wang A B, 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.