

半导体激光器输出混沌光的自相关性及其带宽研究

李增, 冯玉玲, 姚治海

长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 提出一种可用于降低半导体激光器(SL)输出混沌光的自相关性并增加其带宽的方案。该方案将具有单路相位调制光反馈的SL作为主激光器,将具有双路滤波光反馈的SL作为从激光器,并将主激光器输出的激光注入到从激光器中。数值研究了抽运因子、外光注入系数和主从激光器之间的频率失谐对从激光器输出混沌光的自相关性及其带宽的影响。结果表明:在所选的参数条件下,该方案能有效地降低从激光器输出混沌光的自相关性并增加其带宽,混沌激光带宽的极大值达到18.45 GHz。

关键词 激光器; 半导体激光器; 混沌激光; 自相关性; 带宽; 延时特性

中图分类号 O415

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.021405

Autocorrelation and Bandwidth Research of Chaotic Laser from Semiconductor Lasers

Li Zeng, Feng Yuling, Yao Zhihai

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract A scheme for eliminating the autocorrelation and broadening the bandwidth of chaotic laser from semiconductor lasers (SL) is proposed. In this scheme, a SL with single-channel phase modulation optical feedback is taken as the master laser, and a SL with double-channel filter optical feedback is taken as the slave laser. The laser from the master laser is injected into the slave laser. We numerically investigate the influences of parameters, such as the pumping factor, external light injection coefficient and frequency detuning between master and slave lasers, on the autocorrelation and bandwidth of chaotic laser from slave laser. The results show that the proposed scheme can effectively reduce the autocorrelation and broaden the bandwidth of chaotic laser from slave laser under the selected parameter conditions. The bandwidth maximum value of chaotic laser can reach 18.45 GHz.

Key words lasers; semiconductor lasers; chaotic laser; autocorrelation; bandwidth; time delay characteristic

OCIS codes 140.1540; 190.3100; 140.5960; 060.4510

1 引言

分布反馈半导体激光器(DFB-SL)输出的混沌激光可广泛应用在高速保密通信^[1]、高速真随机数的产生与应用^[2-6]、混沌激光雷达^[7]和光时域反射仪^[8]等方面,因此受到广大学者的重视并成为研究热点。外腔反馈半导体激光器(SL)能输出高维度的混沌激光,被认为是较好的混沌熵源^[9-15],但是其输出混沌激光信号的带宽仅为2~4 GHz。一方面,

提高混沌激光的带宽是实现高速混沌保密通信的必经之路;另一方面,激光在激光器的外腔往返过程中会产生明显的外腔延时特性(TDS),这会对混沌激光的应用产生负面影响。对于将混沌激光作为物理熵源的随机数发生器而言,外腔TDS的出现会导致混沌激光呈现弱周期性,降低了混沌激光的无序性,从而弱化了生成的真随机数的统计性能^[2]。因此,在混沌激光的应用领域中,采取相应的措施来抑制或消除混沌激光的TDS并增加其带宽是很有意义

收稿日期: 2017-08-15; 收到修改稿日期: 2017-08-29

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目(20160204020GX)

作者简介: 李增(1994—),男,硕士研究生,主要从事混沌激光及其应用方面的研究。E-mail: 2414758260@qq.com

导师简介: 冯玉玲(1965—),女,博士,教授,主要从事混沌及其应用和量子信息方面的研究。

E-mail: FYLCUST@163.com(通信联系人)

的。Wang 等^[16]利用马赫-曾德尔干涉仪并通过延时自干涉的方法增加半导体激光器输出混沌光的带宽,同时抑制其 TDS。冯野等^[17]提出基于两个半导体激光器进行互注入产生宽带混沌信号的方案,利用不同的频率失谐产生带宽可调的宽带混沌信号。Li 等^[18]的实验和数值结果表明通过调节注入光强度和主从激光器之间的频率失谐,从激光器可输出具有大宽带的混沌光,同时 TDS 也能被很好地抑制。Rontani 等^[19]在适当的反馈条件下改变半导体激光器的抽运因子,数值结果证明延时特征峰在一定程度上得到了抑制。Wu 等^[11,20]通过实验研究发现对于相干和非相干单光反馈的半导体激光器而言,选择适当的反馈强度和注入电流,可抑制 TDS。Lee 等^[21]提出在传统的单光反馈方案的基础上引入第二个反馈腔,虽然系统的复杂度增加了,但是 TDS 得到了抑制。张建忠等^[22]通过在反馈腔中加入利用伪随机信号驱动的相位调制器(PM),抑制了半导体激光器输出混沌光的 TDS。Xiang 等^[23]研究了具有双路光反馈的半导体激光器输出混沌光的 TDS。孙巍阳等^[24]研究了双光反馈、双光注入混沌半导体激光器系统的延时特征峰。张建忠等^[25]提出利用布里渊散射抑制外腔 TDS 的方案。本文基于双路滤波反馈和外光注入的方法降低半导体激光器输出混沌激光的自相关性并增加其带宽,并且通过数值研究验证了该方法的有效性。

2 理论模型

将具有双路滤波光反馈的 DFB-SL 作为从激光器,将具有单路相位调制光反馈的 DFB-SL 作为主激光器。用任意波信号发生器(AWG)产生的伪随机信号驱动主激光器中的相位调制器,使光通过相位调制器产生的相移变化无规律,则主激光器注入到从激光器中的激光能更好地干扰从激光器的动力学状态,使从激光器输出混沌光的带宽得到扩展的同时,外腔反馈引起的弱周期性也能得到抑制,即 TDS 得到了抑制。所提方案的结构示意图如图 1 所示。

图 1 中主激光器(M-DFB-SL)的反馈腔中含有一个相位调制器。用任意波信号发生器产生的伪随机信号驱动相位调制器。图中 FC 是光纤耦合器,VOA 是可调衰减器,ISO 是光隔离器。光纤反射镜(FR)将光反馈回 M-DFB-SL 中,M-DFB-SL 产生的激光通过 VOA0、ISO1 以及 FC1 注入到从激光器(S-DFB-SL)中,S-DFB-SL 输出的激光经过 FC1 和 FC2 后分成两束,其中一束通过 FC3 后又分成两束,分别通过 VOA2 和 VOA3 以及滤波器 1 和滤波器 2 再反馈回 S-DFB-SL 中。从 FC2 输出的另一束光经过 ISO2 后,利用光电探测器(PD)转换成电信号,将电信号输入到示波器(OSC)中。

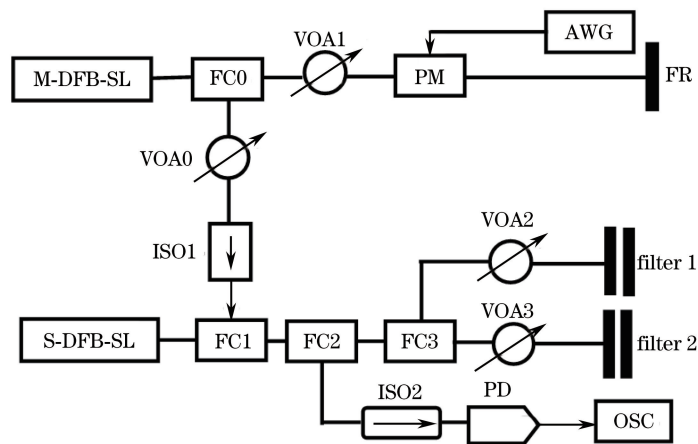


图 1 所提方案的示意图

Fig. 1 Schematic of proposed scheme

图 1 所示系统的动力学速率方程为^[26-27]

$$\frac{dE_m(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha) \left\{ \frac{g [N_m(t) - N_0]}{1 + \epsilon |E_m(t)|^2} - \tau_p^{-1} \right\} E_m(t) + \frac{k_f}{\tau_m} E_m(t - \tau) \exp(-i\omega_m \tau) \exp[i\varphi_{PM}(t)], \quad (1)$$

$$\frac{dN_m(t)}{dt} = PJ_{th} - \frac{N_m(t)}{\tau_N} - \frac{g [N_m(t) - N_0]}{1 + \epsilon |E_m(t)|^2} |E_m(t)|^2, \quad (2)$$

$$\frac{dE_s(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha) \left\{ \frac{g [N_s(t) - N_0]}{1 + \epsilon |E_s(t)|^2} - \tau_p^{-1} \right\} \times E_s(t) + \frac{k_{f_1}}{\tau_{in}} F_1(t) + \frac{k_{f_2}}{\tau_{in}} F_2(t) + \frac{k_{in}}{\tau_{in}} E_m(t) \exp(i2\pi\Delta f t), \quad (3)$$

$$\frac{dN_s(t)}{dt} = PJ_{th} - \frac{N_s(t)}{\tau_N} - \frac{g [N_s(t) - N_0]}{1 + \epsilon_0 |E_s(t)|^2} |E_s(t)|^2, \quad (4)$$

$$\frac{dF_1(t)}{dt} = \Lambda_1 E_s(t - \tau_1) \exp(-i\omega_s \tau_1) + (i2\pi\Delta f_1 - \Lambda_1) F_1(t), \quad (5)$$

$$\frac{dF_2(t)}{dt} = \Lambda_2 E_s(t - \tau_2) \exp(-i\omega_s \tau_2) + (i2\pi\Delta f_2 - \Lambda_2) F_2(t), \quad (6)$$

式中 m 和 s 分别代表主、从激光器; $E_m(t)$ 和 $E_s(t)$ 分别为主、从激光器的慢变电场复振幅; $N_m(t)$ 和 $N_s(t)$ 分别为主、从激光器的载流子数密度; ω_m 和 ω_s 分别为主、从激光器的中心场角频率; $\Delta f = (\omega_m - \omega_s)/(2\pi)$ 为主、从激光器的中心场频率之间的频率失谐; k_f 为主激光器反馈腔的反馈系数; τ 为主激光器的外腔延迟时间; φ_{PM} 为主激光器中相位调制器产生的相移, $\varphi_{PM} = \pi V_{RF} f_m(t)/V_\pi$, 其中 $V_{RF} f_m(t)$ 为 AWG 施加在相位调制器上的调制电压, V_π 为相位调制器的半波电压; α 为激光器的线宽增强因子; k_{in} 为从激光器外光注入系数; g 为激光器的微分增益系数; N_0 为透明载流子数密度; ϵ

为激光器的饱和增益系数; τ_p 为激光器的光子寿命; τ_N 为激光器的载流子寿命; P 为抽运因子; J_{th} 为阈值电流密度, $J_{th} = N_{th}/\tau_N$, $N_{th} = N_0 + 1/(g\tau_p)$; τ_{in} 为光子在激光腔中的往返时间; 脚标 1 和 2 分别代表从激光器反馈腔 1 和反馈腔 2, τ_1 和 τ_2 分别为两个反馈腔的延迟时间; k_{f_1} 和 k_{f_2} 分别为两个反馈腔的反馈系数; Δf_1 和 Δf_2 分别为两个反馈腔内的滤波器的中心频率与从激光器中心频率之间的频率失谐; Λ_1 和 Λ_2 分别为两个滤波器的带宽; $F_1(t)$ 和 $F_2(t)$ 分别为两个反馈腔中反馈光的电场。

自相关函数(ACF)可定义为^[28]

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

式中 $I(t)$ 为从激光器输出光的强度, Δt 为移动时间, $\langle \rangle$ 表示对时间求平均。利用从激光器输出光的自相关函数曲线中延时特征值 β 来定量描述输出混沌光的自相关性, 即 TDS。一般认为 $\beta < 0.2$ 时, 混沌激光无弱周期性, 即 TDS 被较好地抑制^[29], 且混沌激光的自相关性降低。

3 数值研究

首先研究抽运因子 P 、外光注入系数 k_{in} 和主从激光器之间的频率失谐 Δf 对 S-DFB-SL 输出混沌光的 TDS 的影响, 然后在最佳的参数条件下研究以上参数对从激光器输出混沌光带宽的影响。

3.1 外光注入系数、主从激光器的频率失谐、抽运因子对外腔 TDS 的影响

数值研究中取相位调制器产生的相移 $\varphi_{PM} = \pi V_{RF} f_m(t)/V_\pi$ 中的 $V_{RF}/V_\pi = 1.0$, 其中 $f_m(t)$ 在数值研究中用伪随机序列代替。伪随机序列的码率为

1 Gbit/s, 伪随机序列的取值区间为 $[-1, 1]$ 。参数取值如下^[30]: $\alpha = 5.0$, $g = 8.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $N_0 = 1.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $\tau_p = 1.927 \times 10^{-12} \text{ s}$, $\tau_{in} = 8.0 \times 10^{-12} \text{ s}$, $\tau_N = 2.04 \times 10^{-9} \text{ s}$, $\epsilon = 2.5 \times 10^{-23} \text{ m}^3$, $P = 1.44$, $k_f = 0.1$, $\tau = 2.88 \text{ ns}$, $\Delta f_1 = \Delta f_2 = 20 \text{ GHz}$, $\Lambda_1 = \Lambda_2 = 20 \text{ GHz}$, $k_{f_1} = k_{f_2} = 0.2$, $\tau_2 = 3 \text{ ns}$, $k_{in} = 0.2$, $\Delta f = 3.0 \text{ GHz}$ 。用以上参数值通过 4 阶龙格-库塔法对(1)~(6)式进行数值求解, 得到 τ_1 分别为 2.78 ns 和 2.88 ns, 从激光器输出激光的时间序列图和自相关函数曲线如图 2.3 所示。

图 2(a)和图 3(a)中光强幅值随时间的变化呈现无规则的起伏, 说明此时激光器输出的是混沌激光。图 2(b)和图 3(b)左边第一个尖峰是由弛豫振荡引起的^[16], 其余的尖峰即为延时特征峰。随着 Δt 的逐渐增加, 延时特征峰的峰值逐渐下降, 并且都小于 0.2, 可见输出混沌光的延时特征峰被有效抑制。通过比较图 2(b)与图 3(b), 可得图 3(b)中尖

峰的峰值较小,当 $\tau_1=2.88$ ns时,TDS的抑制效果较好。

下面取 $\tau_1=2.88$ ns,其他参数的取值与图3的

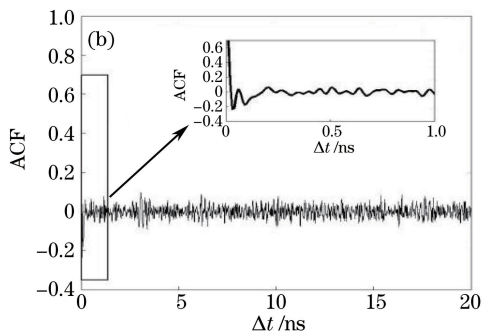
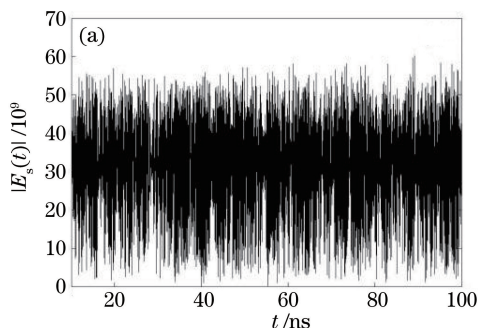


图2 当 $\tau_1=2.78$ ns时 S-DFB-SL 输出混沌光的时间序列图和对应的自相关函数曲线。(a)时间序列图;(b)自相关函数曲线

Fig. 2 Time series and corresponding ACF curve of chaotic laser from S-DFB-SL

when $\tau_1=2.78$ ns. (a) Time series; (b) ACF curve

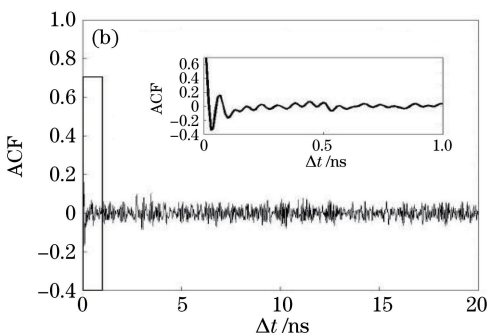
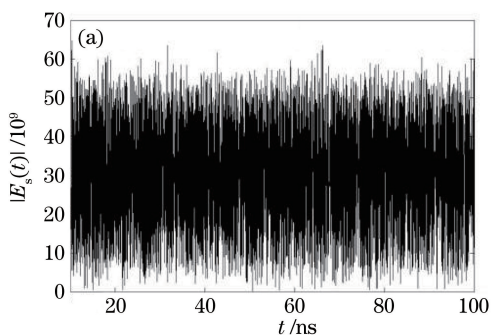


图3 当 $\tau_1=2.88$ ns时 S-DFB-SL 输出混沌光的时间序列图和对应的自相关函数曲线。(a)时间序列图;(b)自相关函数曲线

Fig. 3 Time series and corresponding ACF curve of chaotic laser from S-DFB-SL

when $\tau_1=2.88$ ns. (a) Time series; (b) ACF curve

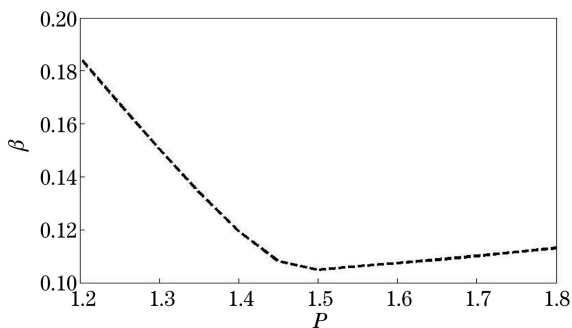


图4 β 随 P 的变化

Fig. 4 Variation of β with P

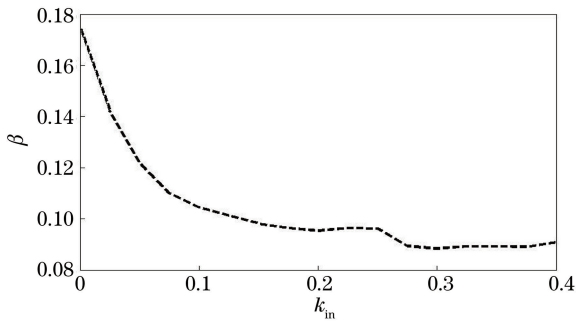
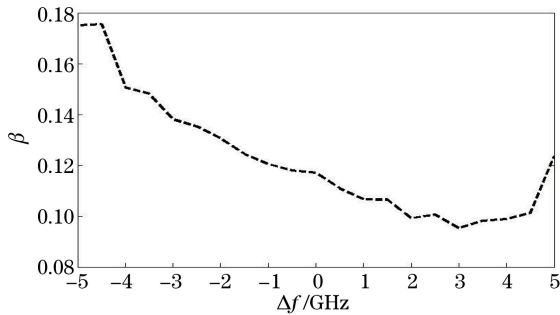
由图4可知,随着 P 的增加, β 先逐渐减小,之后开始缓慢地增加,当 $P=1.5$ 时 β 达到极小值。产生该现象的主要原因是:随着 P 在区间(1.2,1.5)内的逐渐增加,主激光器输出的光强逐渐增大,对从激光器的扰动作用逐渐变大,使得对从激光器输出光的弱周期性的消除作用逐渐增强, β 逐渐减小,当 $P=1.5$ 时, β 有极小值;随着 P 在区间(1.5,1.8)内逐

渐增加,增益饱和现象使主激光器输出的光强逐渐平稳并且趋于减弱,主激光器的输出光对从激光器的扰动作用也逐渐平稳并且趋于减弱,则对弱周期性的消除作用逐渐减弱, β 又开始很缓慢地增大。总之,在所选择的参数范围内, β 都小于0.2,实现了对TDS的有效抑制,减弱了其自相关性。

根据图4, β 取极小值时 $P=1.5$,其他参数的取值与图3相同。以外光注入系数 k_{in} 作为控制参数,数值求解(1)~(6)方程组,得到拟合平滑后的 β 随 k_{in} 的变化趋势曲线如图5所示。

由图5可知,随着 k_{in} 的增加, β 整体上逐渐减小,当 $k_{in}=0.32$ 时 β 最小。总之,当 k_{in} 在区间(0,0.4)内变化时, β 都小于0.2,即实现了对TDS的有效抑制。

根据图5, β 最小时 $k_{in}=0.32$,其他参数的取值与图5对应相同。以主从激光器之间频率失谐 Δf 作为控制参数,数值求解(1)~(6)方程组,得到拟合平滑后 β 随 Δf 的变化趋势,如图6所示。

图 5 β 随 k_{in} 的变化Fig. 5 Variation of β with k_{in} 图 6 β 随 Δf 的变化Fig. 6 Variation of β with Δf

由图6可知,随着 Δf 的增加,从激光器输出混

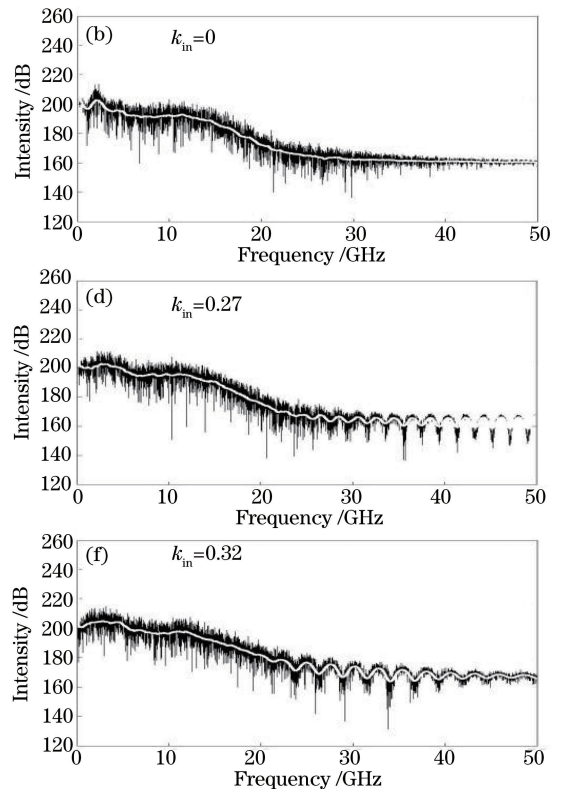
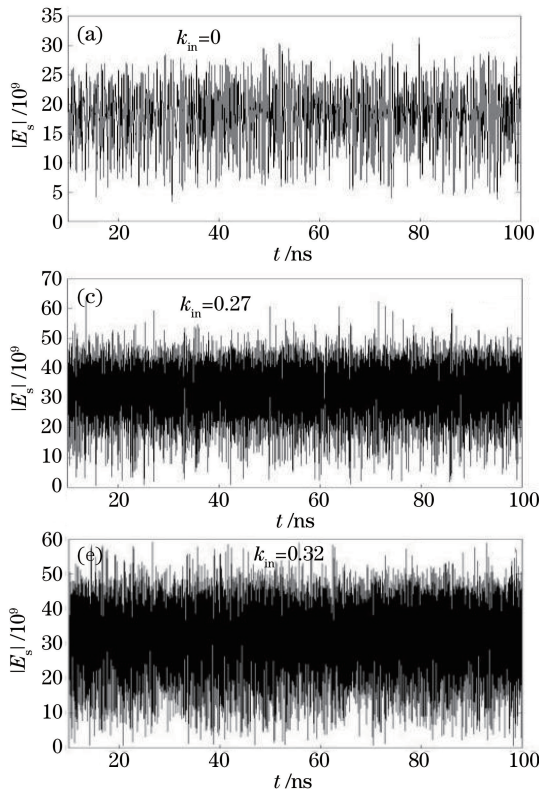


图 7 S-DFB-SL 输出混沌激光的(a)(c)(e)时间序列图和(b)(d)(f)对应的功率谱

Fig. 7 (a)(c)(e) Time series plots and (b)(d)(f) corresponding power spectra of chaotic laser from S-DFB-SL

沌激光的 β 逐渐减小,当 $\Delta f=3$ 时 β 达到最小值。之后,随着 Δf 的增加, β 又逐渐增大。总之, Δf 在区间 $(-5.0 \text{ GHz}, 5.0 \text{ GHz})$ 内变化时, β 都小于0.2,即实现了对TDS的有效抑制。

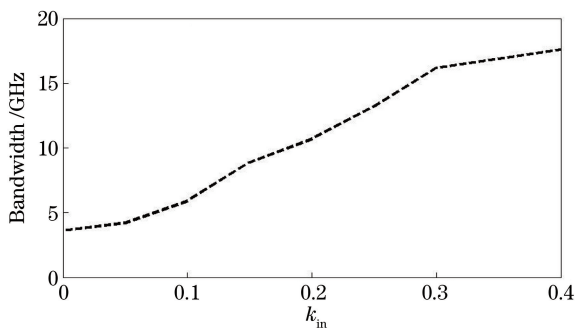
3.2 外光注入系数、主从激光器的频率失谐和抽运因子对带宽的影响

在以上得到的对TDS具有最佳抑制效果的参数条件下,研究从激光器输出混沌光的带宽。

根据图4、6,取 $P=1.5$, $\Delta f=3 \text{ GHz}$, k_{in} 分别取0, 0.27, 0.32,其他参数值与图3对应相同。数值求解(1)~(6)方程组,得到 k_{in} 取3个不同值时从激光器输出混沌激光的时间序列图和功率谱,如图7所示。

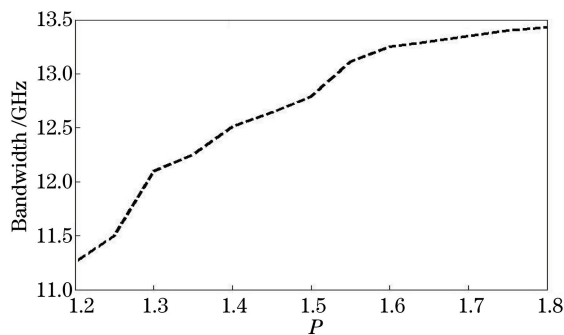
对图7中的功率谱进行拟合,得到平滑后的功率谱曲线(功率谱图中的白色曲线)。经过分析得到图7(b)、(d)、(f)对应的3 dB带宽分别为3.6, 13.2, 15.2 GHz。由此可见,在有外光注入的条件下,通过选取合适的外光注入系数,从激光器输出混沌激光的带宽相对于无外光注入时得到了拓宽。

为了更好地描述混沌激光的带宽与外光注入系数 k_{in} 的关系,以 k_{in} 作为控制参数,其他参数值与图7对应相同,数值求解(1)~(6)方程组,混沌激光的带宽随外光注入系数的变化如图8所示。

图 8 混沌激光的带宽随 k_{in} 的变化Fig. 8 Variation of bandwidth of chaotic laser with k_{in}

由图 8 可见,随着 k_{in} 的增大,混沌激光的带宽也随之增大,当 $k_{in}=0.4$ 时,带宽可达到 17.6 GHz,约为 $k_{in}=0$ 时带宽的 4.9 倍。

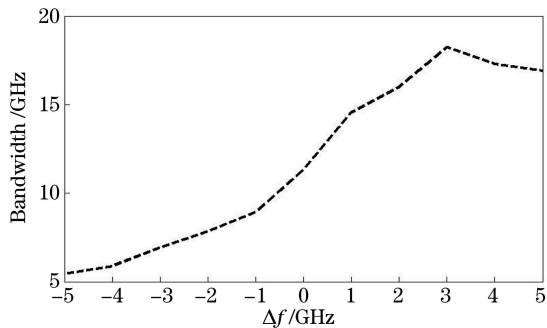
为研究 P 对从激光器输出混沌激光带宽的影响,取 $k_{in}=0.2$, $\tau_1=2.88$ ns, $\Delta f=4$ GHz,其他参数值与图 7 对应相同,数值求解(1)~(6)方程组,混沌激光的带宽随 P 的变化如图 9 所示。

图 9 混沌激光的带宽随 P 的变化Fig. 9 Variation of bandwidth of chaotic laser with P

由图 9 可知,当激光器的 P 小于 1.55 时,随着 P 的增大带宽随之增加;当 P 大于 1.55 时,随着 P 的增大,带宽的增加很缓慢。以上现象的主要原因是:随着 P 在区间(1.2, 1.55)内逐渐增加,主激光器输出的光强逐渐增大,对从激光器的扰动作用逐渐增大,从激光器输出光的混沌程度增强,从而使其带宽随之增加;当 P 大于 1.55 时,继续增大 P 对从激光器输出光带宽的影响并不明显^[31]。综合图 4 可知,当激光器的 P 取 1.5 时,从激光器可输出低 TDS(即低自相关性)和较大带宽的混沌激光。

此外,主、从激光器之间的频率失谐 Δf 也会影响混沌激光的带宽。根据图 8 和图 9,取 $k_{in}=0.4$, $P=1.5$,其他参数值与图 9 对应相同,数值求解(1)~(6)方程组可得混沌激光的带宽随 Δf 的变化关系,如图 10 所示。

由图 10 可知,在光注入系数一定的情况下,混

图 10 混沌激光的带宽随 Δf 的变化Fig. 10 Variation of bandwidth of chaotic laser with Δf

沌激光的带宽随着 Δf 的增加先增加后减小,当 $\Delta f=3.5$ GHz 时激光器输出的混沌激光的带宽达到极大值,约为 18.45 GHz。这是由于随着 Δf 的变化,主激光器对从激光器的扰动作用的强弱也发生变化,从激光器输出光的混沌程度随之变化,从而使输出混沌激光的带宽发生变化,即随着从激光器输出激光混沌程度的增强,其带宽变大。

4 结 论

采用在主激光器的外部反馈腔中加入由伪随机信号驱动的相位调制器的方法来降低从激光器(即具有双路滤波光反馈的半导体激光器)输出混沌激光的自相关性,并且增加其带宽。数值研究了抽运因子、外光注入系数和主、从激光器之间的频率失谐对从激光器输出混沌激光的自相关曲线中的延时特征峰值和混沌光带宽的影响。结果表明:延时特征峰值 β 随着以上三个控制参数的增加,都是先逐渐减小到最小值后再逐渐增大,并且在所选控制参数的范围内,延时特征峰值 β 都小于 0.2,即实现了对 TDS 的有效抑制。在延时特征值 β 被最大程度抑制的参数条件下,研究了外光注入系数、抽运因子和主、从激光器之间的频率失谐对从激光器输出混沌光带宽的影响。结果表明:随着外光注入系数的增大,混沌激光的带宽也随之增加;当外光注入系数和频率失谐一定时,混沌激光的带宽随着抽运因子的增大而增加,直至趋于平稳;主激光器与从激光器存在一定频率失谐时,可输出较大带宽的混沌激光,较大的带宽出现在频率失谐为 2~4 GHz 范围内,此时混沌激光带宽的极大值可达到 18.45 GHz。通过优化参数取值,可在较大的参数区间内获得低自相关性和大带宽的混沌激光信号,从而证明了所提方案的可行性,以上结果对于混沌激光的应用是有意义的。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Gallager R G. Principles of digital communication [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [4] Metropolis N, Ulam S. The monte carlo method[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1949, 44(247): 335-341.
- [5] Asmussen S, Glynn P W. Stochastic simulation: Algorithms and analysis[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2007.
- [6] Stinson D R. Cryptography: Theory and practice [M]. Boca Raton: CRC press, 2005.
- [7] Lin F Y, Liu J M. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(6): 815-820.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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] 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): 879-1891.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Feng Y, Yang Y B, Wang A B, *et al.* Generation of 27 GHz flat broadband chaotic laser with semiconductor laser loop [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 064206.
冯野, 杨毅彪, 王安帮, 等. 利用半导体激光器环产生 27 GHz 的平坦宽带混沌激光 [J]. *物理学报*, 2011, 60(6): 064206.
- [18] Li N Q, Pan W, Yan L S, *et al.* Enhanced two-channel optical chaotic communication using isochronous synchronization [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 0600109.
- [19] 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.
- [20] Wu J G, Xia G Q, Cao L P, *et al.* Experimental investigations on the external cavity time signature in chaotic output of an incoherent optical feedback external cavity semiconductor laser[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(15): 3153-3156.
- [21] 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]. *IEE Proceedings - Optoelectronics*, 2005, 152(2): 97-102.
- [22] Zhang J Z, Wang A B, Zhang M J, *et al.* Elimination of time-delay signature in an external cavity semiconductor laser by randomly modulating feedback phase [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(9): 094207.
张建忠, 王安帮, 张明江, 等. 反馈相位随机调制消

- 除混沌半导体激光器的外腔长信息[J]. 物理学报, 2011, 60(9): 094207.
- [23] Xiang S Y, Pan W, Zhang L Y, *et al.* Phase-modulation dual-path feedback for time delay signature suppression from intensity and phase chaos in semiconductor laser[J]. Optics Communications, 2014, 324: 38-46.
- [24] Sun W Y, Zhang S H, Wu T A, *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.
- [25] Zhang J Z, Feng C K, Zhang M J, *et al.* Time-delay signature suppression in chaotic laser source with optical feedback by Brillouin scattering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0208002.
- 张建忠, 冯昌坤, 张明江, 等. 布里渊散射对光反馈混沌源时延特征的抑制[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0208002.
- [26] Lu D, Zhong Z Q, Xia G Q, *et al.* Chaotic signal generation with low time-delay signature based on a semiconductor laser subject to double filtered optical feedback[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(10): 1014003.
- 卢东, 钟祝强, 夏光琼, 等. 用双滤波反馈半导体激光器产生低延时特征的混沌信号[J]. 光子学报, 2016, 45(10): 1014003.
- [27] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(3): 347-355.
- [28] 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.
- [29] Gao F, Li N Q, Zhang L Y, *et al.* Study to suppress time delay signature of chaotic carrier utilizing chaotic optical injection[J]. Journal of Quantum Optics, 2016, 22(3): 289-297.
- 高飞, 李念强, 张力月, 等. 采用混沌光注入实现混沌载波时延特征隐藏的研究[J]. 量子光学学报, 2016, 22(3): 289-297.
- [30] 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: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2012, 85(2): 016211.
- [31] Sun W Y, Zhang S H, Wu T A, *et al.* Broadening the bandwidth of chaotic carrier transmitter in semiconductor lasers with chaotic optical injection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 061410.
- 孙巍阳, 张胜海, 吴天安, 等. 混沌光注入展宽半导体激光器混沌载波发射机带宽[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 061410.