

双路混沌光注入的相位调制光反馈半导体激光器的混沌特性

庞爽, 冯玉玲*, 于萍

长春理工大学物理系, 吉林 长春 130022

摘要 混沌光的延时特征(TDS)和带宽(BW)是影响混沌激光应用的两个重要参量,常用来表征混沌光的混沌特性。将具有外腔光反馈的半导体激光器(SL)作为主激光器,将具有相位调制光反馈的SL作为从激光器,并将主激光器输出的混沌光单向双路注入到从激光器中,构成具有外光单向双路注入的相位调制光反馈的SL系统。数值研究了外光注入系数和反馈系数等参数对系统输出混沌光TDS的影响,进而在TDS被有效抑制的参数条件下,对系统输出混沌光的带宽进行了研究。结果表明,用该方案和通过对参数值区间的适当选取可以有效地抑制混沌激光的TDS,并且混沌激光的3 dB带宽最大约为20 GHz。

关键词 激光器; 分布反馈半导体激光器; 混沌激光; 相位调制光反馈; 延时特征; 带宽

中图分类号 O415 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221376

1 引言

分布反馈半导体激光器(DFB-SL)属于B类激光器,在外光注入、光电反馈和外腔反馈等作用下可输出混沌激光,因而被普遍应用于光纤传感^[1-3]、混沌激光保密通信^[4-8]和高速随机数产生^[9-13]等领域。能输出高维度混沌光的外腔反馈DFB-SL目前是优质混沌熵源的产生装置^[14-15],然而激光在外腔中的反馈或光注入使其输出的混沌光具有弱周期性,这会对混沌激光的应用效果产生影响,并且混沌载波信号的带宽将会限制信号传输速率^[16-17]。为了提高基于混沌保密通信的安全性和传输能力,在有效抑制混沌光的延时特征(TDS)的基础上增大其带宽成为混沌激光领域的研究热点。Xiang等^[18]提出了用相位调制双路反馈来隐藏半导体激光器中强度混沌和相位混沌TDS的方案。结果表明,在强反馈条件下,该系统可以在强度混沌和相位混沌中成功隐藏TDS。Cui等^[19]数值研究了基于单反馈相位调制的混沌保密通信系统,利用同步的混沌信号,原始消息在接收端被成功解调。Zhao等^[20]用延时干涉的相位调制半导体激光器系统,研究了系统输出混沌光的延时特征和带宽,结果表明:在自相位调制引起频谱扩展和延时干涉的非线性滤波的共同作用下,可以在较宽的动态工作范围内产生具有平坦频谱和时延特征被较好抑制的宽带混沌光。李增等^[21]数值

研究了双路相位调制光反馈半导体激光器输出的混沌光,在延时特征被有效抑制的条件下获得混沌光的最大带宽约为7.2 GHz,他们也数值研究了具有外光注入的双路滤波光反馈半导体激光器系统^[22],通过适当选取参数值的区间,在延时特征被有效抑制的同时,获得了3 dB带宽约为8.8 GHz的混沌光。本文提出了一种具有外光单向双路注入的相位调制光反馈半导体激光器系统,用于抑制半导体激光器输出混沌激光的TDS并增大其带宽,数值研究表明了该系统的有效性,并对结果进行了物理分析。

2 理论模型

将具有延时光反馈的DFB-SL作为主激光器(M-DFB-SL),将具有相位调制光反馈的DFB-SL作为从激光器(S-DFB-SL),并将主激光器输出的混沌光单向双路注入到从激光器中,构成具有外光单向双路注入的相位调制光反馈半导体激光器系统,其结构示意图如图1所示。图1中M-DFB-SL输出的激光经过光纤耦合器1(FC1)将光分为两束:一束光经可调光衰减器1(VA1)由光纤反射镜1(FR1)反馈回M-DFB-SL,即形成主激光器的外腔光反馈;另一束光通过光隔离器1(ISO1),然后经过由FC2、VA2、VA3、光纤延时线和FC3组成的双路径,再通过光隔离器2(ISO2)和FC4注入到S-DFB-SL中,形成了主激光器对从激光

收稿日期: 2022-06-27; 修回日期: 2022-07-28; 录用日期: 2022-08-12; 网络首发日期: 2022-08-22

基金项目: 吉林省科技发展计划(201902011135JC)

通信作者: *FYLCUST@163.com

器的单向双路外光注入。S-DFB-SL 输出的光经过 FC4 和 FC5 后被分为两束：一束光经过 VA4、由任意波信号发生器 (AWG) 驱动的相位调制器 (PM)，由

FR2 反馈到 S-DFB-SL；另一束光经光隔离器 3 (ISO3) 和光电探测器 (PD) 转换成电信号后输入到示波器 (OSC) 中，对信号和波形进行观测。

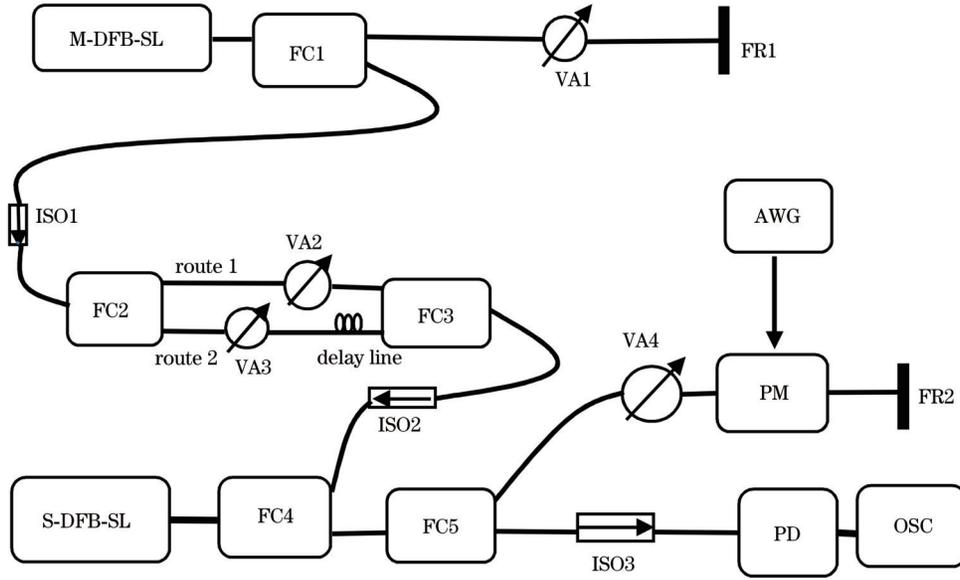


图 1 具有外光单向双路注入的相位调制光反馈半导体激光器系统示意图

Fig. 1 System diagram of phase modulation optical feedback semiconductor laser with external unidirectional double optical injection

图 1 所示系统的动力学速率方程^[23-24]为

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

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

$$\frac{dE_s(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha) \left\{ \frac{g[N_s(t) - N_0]}{1 + \epsilon|E_s(t)|^2} - \tau_p^{-1} \right\} E_s(t) + \frac{K_s}{\tau_{in}} E_s(t - \tau_s) \exp(-i\omega_s \tau_s) \exp[i\phi_{PM}(t)] + \frac{K_1}{\tau_{in}} E_m(t - \tau_1) \exp(-i\omega_m \tau_1 + i2\pi\Delta f t) + \frac{K_2}{\tau_{in}} E_m(t - \tau_2) \exp(-i\omega_m \tau_2 + i2\pi\Delta f t), \quad (3)$$

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

式中：下标 m 与 s 分别代表主激光器和从激光器，下标 1 与 2 代表主激光器到从激光器的双路注入路径； $E_m(t)$ 和 $E_s(t)$ 分别表示主、从激光器出射激光的慢变电场复振幅； $N_m(t)$ 和 $N_s(t)$ 分别表示主、从激光器工作物质的载流子密度； ω_m 和 ω_s 分别表示主、从激光器输出激光的中心场角频率； $\Delta f = (\omega_m - \omega_s) / 2\pi$ 是主从激光器中心场频率之间的频率失谐； K_1 和 K_2 分别表示主激光器到从激光器的注入路径 1 和注入路径 2 的注入系数； τ_1 和 τ_2 分别表示主激光器到从激光器双路注入光的延迟时间； K_m 和 K_s 分别表示主激光器和从激光器中的反馈腔的反馈系数； τ_m 和 τ_s 分别表示主、从激光器外腔延迟时间； α 是线宽增强因子； g 是激光器微分增益系数； N_0 是透明载流子密度； ϵ 是饱和增益系数； τ_p 是激光器中光子的寿命； τ_N 是激光器中载流子寿命； P_m 和 P_s 分

别表示主、从激光器的抽运因子； J_{th} 是阈值电流密度， $J_{th} = N_{th} / \tau_N$ ，其中， $N_{th} = N_0 + 1 / (g\tau_p)$ ； τ_{in} 表示光子在激光腔中的往返时间。相位调制器产生的相移 $\phi_{PM} = \pi V_{RF} f_m(t) / V_\pi$ ，其中 $V_{RF} f_m(t)$ 是 AWG 加在 PM 上的调制电压， V_π 是相位调制器的半波电压， $f_m(t)$ 是二进制的伪随机信号序列，其伪随机序列码率为 1 Gbit/s。

自相关函数 (ACF) 是 TDS 的主要表征方法，本文所用 ACF^[18] 的定义为

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

式中: $I(t) = |E(t)|^2$ 表示激光器输出光的强度; $\langle \cdot \rangle$ 表示对时间求平均; Δt 表示时间延迟, 用自相关函数表征信号 $I(t)$ 与经过时延 Δt 之后的信号 $I(t + \Delta t)$ 之间的相关性, 相关程度越高, 自相关函数值越大。将系统输出光的自相关函数曲线中的最大峰值即延时特征峰的最大值定义为 β , 用它来定量描述混沌光的 TDS, β 称为延时特征值, 一般认为当 $\beta < 0.2$ 时, 延时特征峰较难辨别, 即认为 TDS 被较好地抑制^[25]。

3 TDS 的数值研究和结果分析

对于 SL-EUDOI-PMOF 系统, 这里首先研究主激光器到从激光器的外光注入延迟时间 τ_1 对输出光 TDS 的影响, 然后研究反馈系数 K_m 和 K_s 以及注入系数 K_1 和 K_2 对 TDS 的影响, 最后在 TDS 被有效抑制的参数条件下研究抽运因子以及频率失谐等参数的影响。

3.1 主激光器到从激光器的外光注入延时 τ_1 对 TDS 的影响

参数取值^[20,26]如下: $a = 5.0$, $g = 8.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $N_0 = 1.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $\tau_p = 1.927 \times 10^{-12} \text{ s}$, $\tau_N = 2.04 \times 10^{-9} \text{ s}$, $\tau_m = 8 \times 10^{-12} \text{ s}$, $\omega_m = 1.21 \times 10^{15} \text{ Hz}$, $\omega_s = 1.20998116 \times 10^{15} \text{ Hz}$, $\epsilon = 2.5 \times 10^{-23} \text{ m}^3$, $P_m = 1.3$, $P_s = 1.6$, $K_m = K_s = 0.1$, $\Delta f = 3 \text{ GHz}$, $K_1 = K_2 = 0.2$, $\tau_m = 2 \text{ ns}$, $\tau_s = 3 \text{ ns}$, $\tau_2 = 7 \text{ ns}$ 。

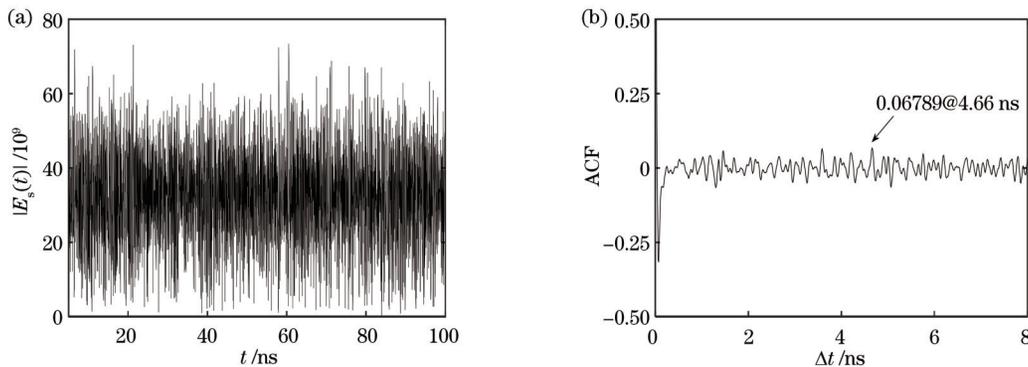


图 2 系统输出混沌激光的时间序列和自相关函数曲线。(a) 时间序列; (b) 自相关函数曲线

Fig. 2 Time series and ACF curve of chaotic laser from system. (a) Time series; (b) ACF curve

3.2 反馈系数 K_m 和 K_s 以及注入系数 K_1 和 K_2 对系统输出光 TDS 的影响

这里首先研究反馈系数 K_m 和 K_s 对 TDS 的影响, 然后研究了注入系数 K_1 和 K_2 对 TDS 的影响。

3.2.1 主从激光器的反馈系数 K_m 和 K_s 对 TDS 的影响

这里以反馈系数 K_m 和 K_s 作为控制参数, 其余参数取值与图 2 相同, 数值求解式 (1)~(5), 得到延时特征值 β 随 K_s 和 K_m 变化的二维图, 如图 3 所示。

根据图 3, β 随 K_s 和 K_m 的变化趋势及原因如下: 当 K_m 和 K_s 趋近于 0 时, 相当于主激光器和从激光器都无

使用以上参数值并通过 4 阶龙格库塔法对式 (1)~(5) 进行数值求解, 得到了 τ_1 分别为 2.7 ns、2.8 ns、2.9 ns 时从激光器输出混沌光的时间序列和对应的自相关函数曲线, 通过比较发现 $\tau_1 = 2.8 \text{ ns}$ 时自相关函数曲线中延时特征峰的最大值即 β 值最小, 其原因如下: 根据产生延时特征的物理机制, 使该系统输出的混沌光具有较小延时特征值的延时 τ_1 应该满足 $\tau_1 \neq n\tau_m$, $\tau_1 \neq n\tau_s$, $\tau_1 \neq n\tau_2$, 所以对于仿真中所用的驱动相位调制器的伪随机信号而言, 仿真结果给出 $\tau_1 = 2.8 \text{ ns}$ 时混沌光具有较小的延时特征值。由图 2(a) 可见, 信号幅值随时间呈无规则的起伏变化, 这表明此状态下半导体激光器输出的是混沌光; 图 2(b) 中延时特征峰最大值在图中已标注, 由此标注可见: $\Delta t = 4.66 \text{ ns}$ 处出现的最高延时特征峰的纵轴值 (即延时特征值 β) 约为 0.06789, 远小于 0.2。这里的 $\Delta t = 4.66 \text{ ns} \approx 2.3\tau_m$, 这是由于主激光器含有外腔光反馈, 则其输出混沌光信号的 ACF 曲线将在 $\Delta t = n\tau_m$ 附近出现延时特征峰, 将此混沌光注入到从激光器。由于从激光器的外部反馈腔中含有用伪随机信号驱动的相位调制器, 这就使主激光器输出混沌光中的延时特征峰对从激光器输出混沌光的延时特征峰的贡献被掩盖了, 因此从激光器输出混沌光的延时特征峰没有出现在 $\Delta t = n\tau_m$ 附近。对于仿真中所用的驱动相位调制器的伪随机信号而言, 延时特征峰出现在 $\Delta t = 4.66 \text{ ns} \approx 2.3\tau_m$ 附近, 并且混沌光的 TDS 得到了有效的抑制。

外腔光反馈, 此时主激光器输出的是稳态激光, 其注入到从激光器, 从激光器输出的是周期性激光信号, 该周期性激光信号的自相关函数曲线的最大峰值为 1, 所以此时图 3 的左下角显示的 β 值较大。保持 K_s 不变时: 当 K_m 在 (0.01, 0.14) 区间内逐渐增大时, 主激光器注入到从激光器的光的复杂程度随之增大, 因此从激光器输出光的 β 呈现减小趋势^[27], 在此区间内, β 值都小于 0.2, 即 TDS 被有效抑制; 当 K_m 在 (0.14, 0.2) 内逐渐增大时, β 值随之增加, 这是由于较大的 K_m 使主激光器输出光具有弱周期性, 即注入到从激光器中的

激光具有弱周期性。另一方面,当 K_m 保持不变,随着 K_s 的增加,整体上看, β 随之减小。这是由于从激光器中存在相位调制光反馈抑制了来自主激光器的注入光和从激光器的外腔反馈光引起的 TDS。综上,在下面研究中选取了延时特征被较好抑制的参数区间,取 $K_s=0.15, K_m=0.08$ 。

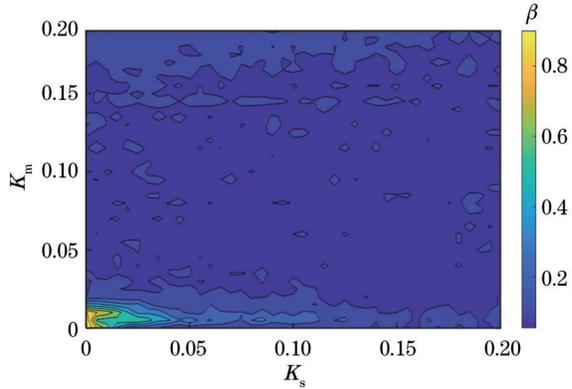


图 3 系统输出混沌激光延时特征值 β 随参数 K_s 和 K_m 变化的二维图

Fig. 3 Two-dimensional map of time-delay characteristic value β varying with K_s and K_m for chaotic laser from system

3.2.2 注入系数 K_1 和 K_2 对 TDS 的影响

将注入系数 K_1 和 K_2 作为控制参数,根据图 3,这里取 $K_s=0.15, K_m=0.08$,其余参数的取值与图 3 对应相同。利用式(1)~(5)的数值结果,得到延时特征值 β 随 K_1 和 K_2 变化的二维图,如图 4 所示,这里的 β 值都小于 0.2,即 TDS 被有效抑制。图中 $K_1 \geq 0.2$ 且 $K_2 \geq 0.2$ 时对应的 β 较小,这是因为此时 K_1 和 K_2 都较大,双路注入光的干涉效应对从激光器状态的扰动较强, β 值较小。

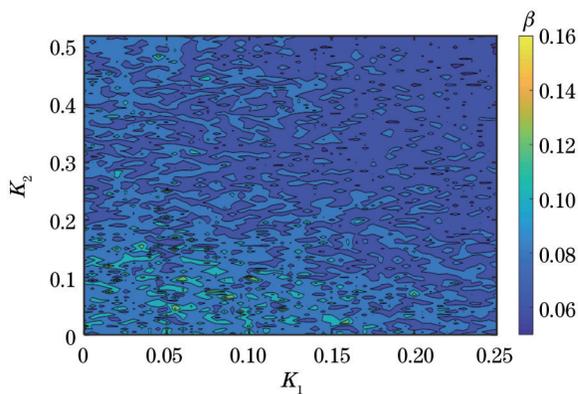


图 4 系统输出混沌光的延时特征值 β 随参数 K_1 和 K_2 变化的二维图

Fig. 4 Two-dimensional map of time-delay characteristic value β varying with K_1 and K_2 for chaotic laser from system

3.3 抽运因子 P_m 对 TDS 的影响

根据图 4,取对应延时特征值较小的 $K_1=K_2=0.2$,以抽运因子 P_m 作为控制参数,其他参数的取值同图 4,

利用式(1)~(5)的数值结果,得到延时特征值 β 随 P_m 变化的曲线如图 5 所示。当 P_m 在区间(1.1, 1.6)内逐渐增加时,主激光器输出光对从激光器的扰动作用随之增强,使系统输出混沌光的无序性增强,延时特征值 β 随之下降。当 P_m 在(1.6, 1.7)内增加时,增益饱和现象使主激光器输出光的光强逐渐平稳,并且其混沌程度随之减弱,所以随着注入光状态的变化,从激光器输出的光具有弱周期性,使得 β 值随之呈现逐渐增大的趋势。下面研究中取 $P_m=1.6$ 。

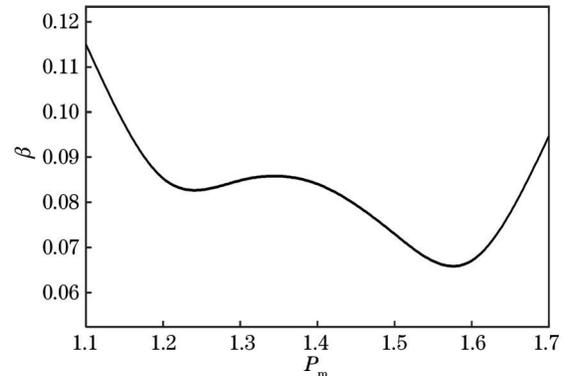


图 5 系统输出混沌光的延时特征值 β 随 P_m 的变化

Fig. 5 Variation of time delay characteristic value β varying with P_m for chaotic laser output from system

3.4 主从激光器频率失谐 Δf 对 TDS 的影响

这里以主从激光器的频率失谐 Δf 作为控制参数,根据图 5 取 TDS 被较好抑制的 $P_m=1.6$,其他参数的取值同图 5,用式(1)~(5)的数值解得到延时特征值 β 随 Δf 的变化曲线,如图 6 所示。整体上看,随着横轴 Δf 的增加,纵轴 β 值先增加后减小,但此图内 β 值都小于 0.1,即 TDS 被有效抑制了;另外,该曲线减小和增大趋势中的小幅起伏是由从激光器含有相位调制光反馈引起的,这是因为主激光器和从激光器反馈腔的延时以及外部注入光的延时所对应的时间参量 τ_m, τ_s, τ_1 和 τ_2 分别出现在主从激光器的速率方程中反馈项和注入项的相位部分,从而使系统输出的混沌光具有延时特征峰,而由伪随机信号驱动的相位调制器产生的相移也出现在从激光器的速率方程中反馈项的相位部分,这会使系统输出的混沌光产生附加的延时特征,从而对注入光和反馈光产生的延时特征值 β 有掩盖和扰动作用,使图 6 中的延时特征值 β 在减小和增大趋势中有小幅的起伏。比较而言,在正的频率失谐条件下 β 值相对较小,这是因为在正失谐时,主激光器输出光场的中心频率大于从激光器输出光场的中心频率,从而使被主激光器注入光的从激光器输出混沌光的高频率成分增加,则从激光器输出光的频谱变宽,混沌程度增加, β 值较小。在下面的研究中取 $\Delta f=10$ GHz。

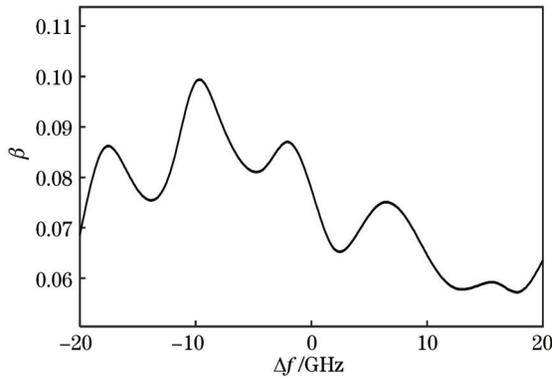


图 6 系统输出混沌激光的延时特征值 β 随 Δf 的变化

Fig. 6 Variation of time delay characteristic value β with Δf for chaotic laser output from system

3.5 抽运因子 P_s 对 TDS 的影响

这里以抽运因子 P_s 作为控制参数, $\Delta f = 10$ GHz, 其他参数的取值同图 6, 用式(1)~(5)的数值解得到延时特征值 β 随 P_s 的变化曲线, 如图 7 所示, 由该图可见: β 随 P_s 的增大呈现先减小后平缓变化进而稍微上升的趋势, P_s 在 (1.1, 1.4) 内增加时, 反转粒子数增加使从激光器输出光的光强逐渐增强, 其输出混沌光的混沌程度增加, β 值随之下降; 当 P_s 在 (1.4, 1.7) 内继续增加, 增益饱和现象使从激光器输出混沌光的光强和混沌程度随之减弱, 所以 β 值呈现平缓变化之后稍微上升的趋势^[27]。下面的研究中取 $P_s = 1.6$ 。

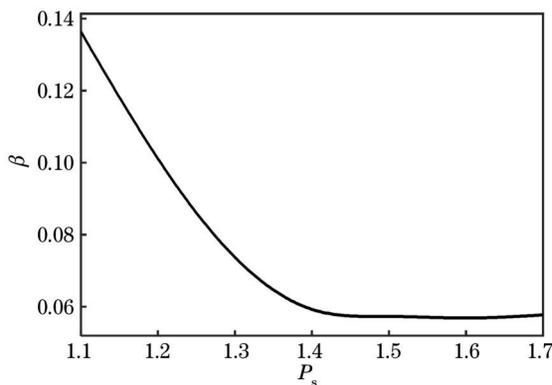


图 7 系统输出混沌光的延时特征值 β 随 P_s 的变化

Fig. 7 Variation of time delay characteristic value β with P_s for chaotic laser output from system

4 带宽的数值研究和结果分析

这里在 SL-EUDOI-PMOF 系统中 TDS 被有效抑制的基础上, 对输出混沌激光的带宽进行研究。

4.1 反馈系数对带宽的影响

这里研究主激光器的反馈系数 K_m 对带宽的影响, 取反馈系数 $K_m = 0.08$, $P_s = 1.6$, 其他参数的取值与图 7 对应相同, 用式(1)~(5)的数值结果得到系统输出光的时间序列和对应功率谱以及自相关函数曲线如图 8

所示。由图 8(a)的时间序列可见: 信号幅值无规律起伏, 表明系统输出的是混沌光。图 8(b)为对应混沌光的功率谱, 其中白色曲线是对功率谱进行平滑后得到的, 经过分析得到此功率谱对应的 3 dB 带宽值, 图中虚线表示混沌激光 3 dB 带宽的值约为 13.85 GHz。图 8(c)为对应的自相关函数曲线, 延时特征峰最大值在图中已标注, 可见这个峰值远小于 0.2, 即延时特征被有效抑制了。以 K_m 作为控制参数, 得到系统输出混沌光的 3 dB 带宽随 K_m 值变化的平滑曲线如图 8(d)所示, 可见: 系统输出混沌光的带宽随 K_m 在 (0, 0.04) 区间内的增加而快速增大, 这是由于: K_m 的增加使主激光器输出光的混沌程度增强, 主激光器的输出光通过双路径注入到从激光器中, 注入光对从激光器的扰动作用增强, 使从激光器输出混沌光的频谱变得平坦, 弛豫振荡频率变高, 带宽也随之增大^[28-29]; 混沌光的带宽随 K_m 在 (0.04, 0.2) 区间内的增加而减小。这是由于: 随着 K_m 的增大, 主激光器输出光的光强增大, 主激光器的输出光注入到从激光器后, 会改变从激光器的阈值条件^[28], 中心频率发生红移, 弛豫振荡频率也随之变小, 导致其输出混沌光的带宽减小。

4.2 注入系数对带宽的影响

这里取 $K_1 = 0.2$, 其他参数的取值与图 8(a)相同, 然后分别取注入系数 $K_2 = 0.45$ 和 $K_2 = 0.52$, 利用式(1)~(5)的数值结果得到系统输出光的时间序列、自相关函数曲线和对应的功率谱如图 9 所示。由图 9(a1)、(a2)的时间序列可见: 信号幅值无规律起伏, 表明系统输出的是混沌光。图 9(b1)、(b2)为自相关函数曲线, 其中延时特征峰最大值在图中已标注, 可见这些峰值都远小于 0.2, 即延时特征都被有效抑制了。图 9(c1)、(c2)为对应混沌光的功率谱, 其中白色曲线是对功率谱进行平滑后得到的, 虚线表示混沌激光 3 dB 带宽的值, 图 9(c1)、(c2)中混沌激光 3 dB 带宽的值分别约为 18.12 GHz 和 19.92 GHz。再以 K_2 作为控制参数, 利用式(1)~(5)的数值结果, 得到系统输出混沌光的 3 dB 带宽随 K_2 的变化曲线如图 10 所示。由该图可知, 在所用的参数值范围内, 随着注入系数 K_2 取值的增加, 曲线整体呈上升的趋势, 这是因为: 随着 K_2 的增大, 主激光器对从激光器的双路注入光之间的干涉效应使注入光强增大, 进而使注入光与从激光器内光场之间的拍频效应增强, 所以系统输出混沌光的带宽增大^[28, 30]。对于图 10 所示带宽与其对应延时特征值随 K_2 的变化情况也进行了数值研究, 结果发现延时特征都被有效抑制了。

4.3 抽运因子对带宽的影响

这里研究主激光器的抽运因子 P_m 对带宽的影响, 取参数 $K_2 = 0.2$, 其他参数的取值与图 10 相同, 以 P_m 作为控制参数, 利用式(1)~(5)的数值结果得到系统输出混沌光的 3 dB 带宽随 P_m 的变化曲线如图 11 所示, 可见: 当 $P_m \in (1.1, 1.6)$ 时, 随着 P_m 取值的增加,

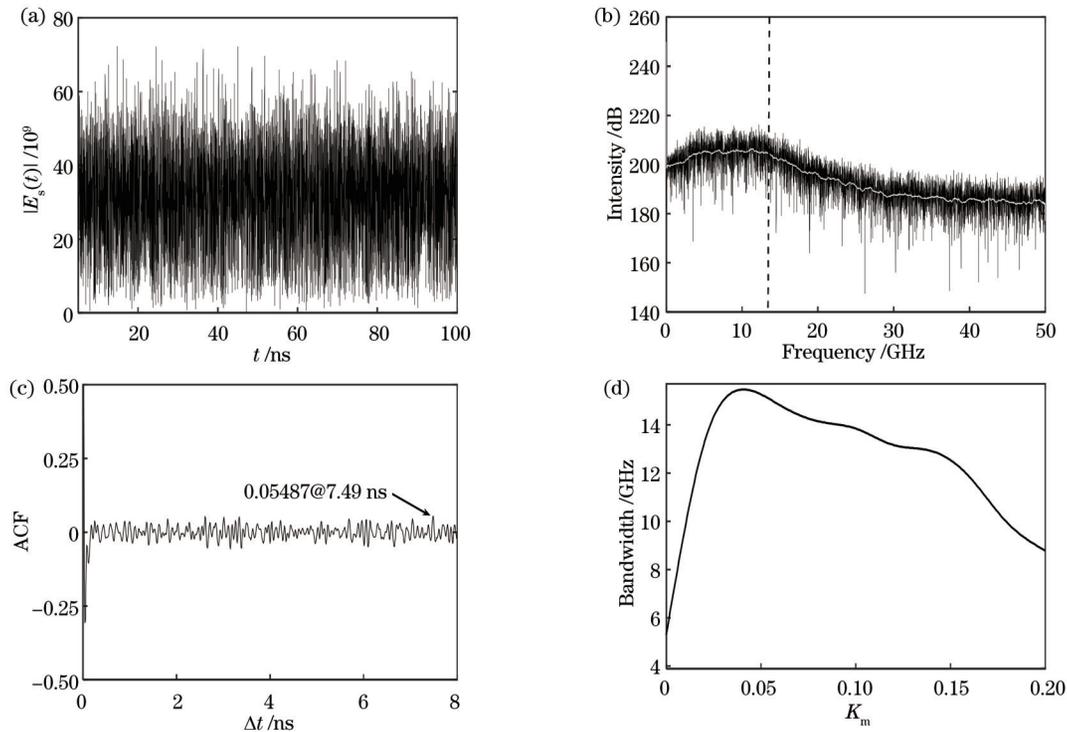


图 8 系统输出混沌激光的时间序列、对应的功率谱、自相关函数曲线和带宽随 K_m 的变化曲线。(a) 时间序列; (b) 功率谱; (c) 自相关函数; (d) 带宽随 K_m 的变化曲线

Fig. 8 Time series, power spectrum, ACF curve, and variation of bandwidth with K_m for chaotic laser output from system. (a) Time series; (b) power spectrum; (c) ACF curve; (d) variation of bandwidth with K_m

主激光器输出光的强度和复杂度都增加,从激光器输出光的复杂度增加,注入光对从激光器的扰动作用增强,这就拓宽了从激光器输出混沌光的带宽^[30];当 P_m 的取值在区间(1.6, 1.7)内增加时,主激光器的增益饱和现象使得注入到从激光器的光和从激光器输出光的复杂度都降低^[27],从而使从激光器输出混沌光的带宽平缓增加^[30]。对图 11 所示的带宽与其对应的延时特征值随 P_m 的变化情况进行了数值研究,结果发现延时特征都被有效抑制了。

4.4 反馈系数对带宽的影响

这里分别取 $P_m=1.6$ 和 $K_m=0.08$,其他参数的取值与图 11 相同,以 K_s 作为控制参数,利用式(1)~(5)的数值结果,得到系统输出混沌光的 3 dB 带宽随 K_s 的变化曲线如图 12 所示,可见:随着 K_s 取值的增加,从激光器的反馈光强增强,反馈腔内含相位调制器,使从激光器输出光的混沌程度也增大,从激光器弛豫振荡频率的分量增加,从而拓宽了输出混沌光的带宽^[29],所以从曲线整体上看带宽是缓慢增加的。

4.5 抽运因子对带宽的影响

这里取 $K_m=0.08$,其他参数的取值与图 12 对应相同,以 P_s 作为控制参数,利用式(1)~(5)的数值结果,得到系统输出混沌光 3 dB 带宽随 P_s 的变化曲线如图 13 所示,可见:当 P_s 在区间(1.1, 1.4)增加时,从激光器的弛豫振荡频率变大,则其输出混沌光的带宽快速增加^[29];而当 P_s 在区间(1.4, 1.7)增加时,从激光器

的增益饱和效应使得其输出光的强度和混沌程度趋于平缓,所以带宽呈现缓慢下降的趋势。

4.6 频率失谐对带宽的影响

这里取 $P_m=1.6$,其他参数的取值与图 13 相同,以频率失谐 Δf 作为控制参数,利用式(1)~(5)的数值结果得到系统输出混沌光 3 dB 带宽随 Δf 的变化曲线如图 14 所示,由此图可见:在所选用的参数范围内,随着 Δf 值的逐渐增加,带宽值先逐渐增加后减小,即不同的 Δf 值使主激光器对从激光器的扰动作用不同,进而使从激光器输出混沌光所包含的频率成分及其强度发生变化。当 Δf 取值在区间(-3 GHz, 13 GHz)内时,注入光与从激光器的光场之间发生拍频效应^[28],使从激光器产生高频振荡,表现为较大的带宽。由图 14 可见,横轴的正负频率失谐对应的纵轴带宽值不对称,这是因为注入光和反馈光降低了从激光器内载流子的阈值,使腔内振荡条件发生改变,中心频率发生红移^[28]。

5 结 论

本文提出 SL-EUDOI-PMOF 系统用于抑制混沌光的 TDS,并研究其带宽。首先数值研究了反馈系数 K_m 和 K_s 、注入系数 K_1 和 K_2 以及抽运因子 P_m 等参数对 TDS 的影响,并对结果进行了分析。本文用延时特征值 β 定量描述混沌光的 TDS。结果表明:在所选用的参数值区间内,本文所提系统的输出混沌光的延时特

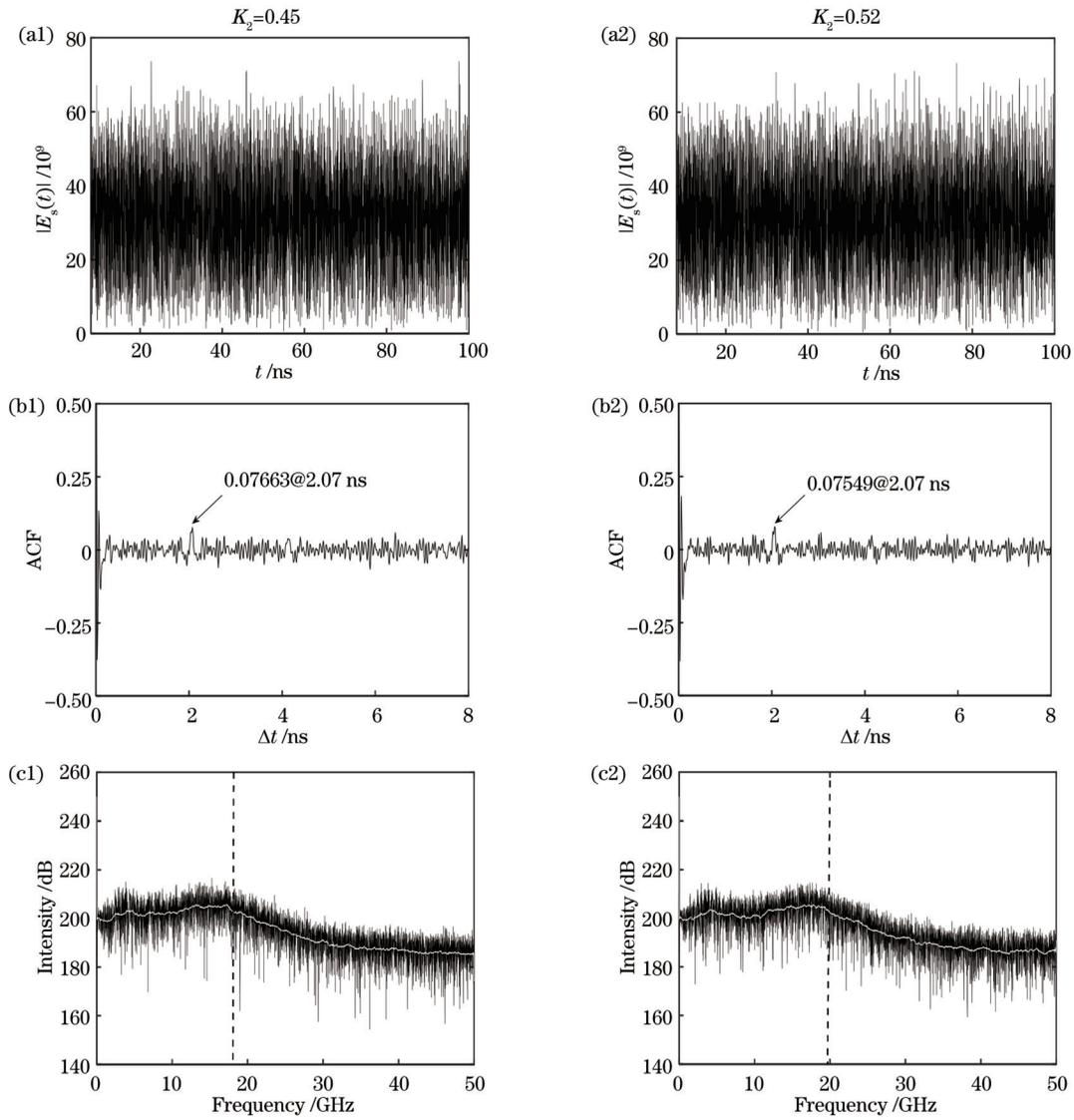


图 9 不同注入系数 K_2 下输出混沌激光的时间序列、自相关函数和功率谱。(a1)(a2)时间序列;(b1)(b2)自相关函数;(c1)(c2)功率谱

Fig. 9 Time series, ACF curves, and power spectra for chaotic laser output from system under different injection coefficient K_2 .

(a1)(a2) Time series; (b1)(b2) ACF curves; (c1)(c2) power spectra

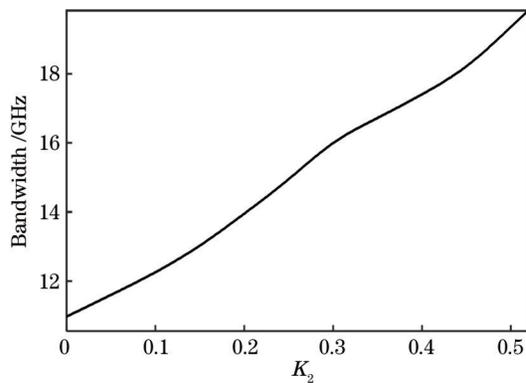


图 10 系统输出混沌光带宽随 K_2 的变化

Fig. 10 Variation of bandwidth with K_2 for chaotic laser from system

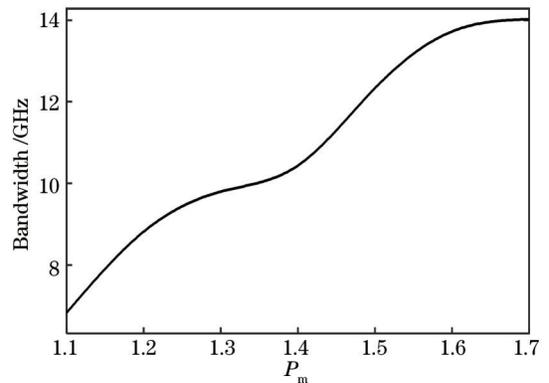
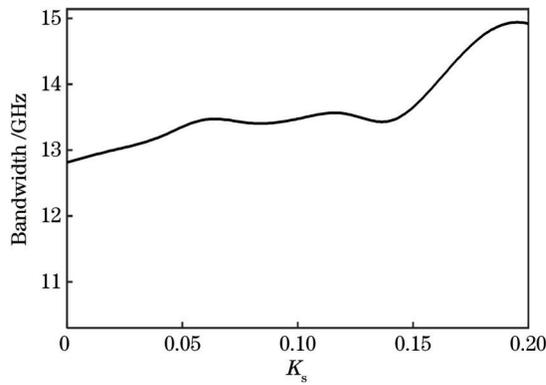
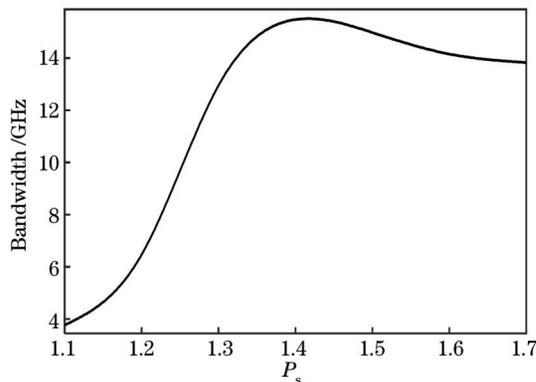
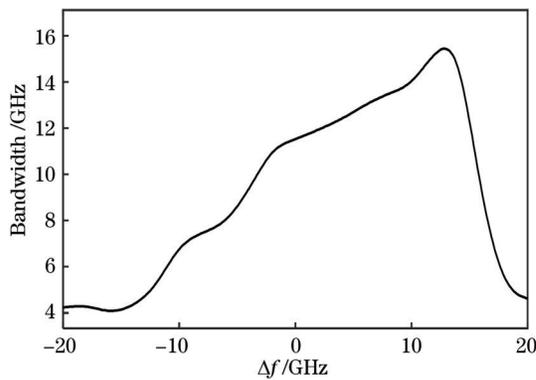


图 11 系统输出混沌激光的带宽随 P_m 的变化

Fig. 11 Variation of bandwidth with P_m for chaotic laser from system

图 12 系统输出混沌激光的带宽随 K_s 的变化Fig. 12 Variation of bandwidth with K_s for chaotic laser from system图 13 系统输出混沌激光的带宽随 P_s 的变化Fig. 13 Variation of bandwidth with P_s for chaotic laser from system图 14 系统输出混沌激光带宽随 Δf 的变化Fig. 14 Variation of bandwidth with Δf for chaotic laser from system

征值 β 随反馈系数 K_m 值的增加先减小后增大, β 随反馈系数 K_s 取值的增大而减小, β 随注入系数 K_1 和 K_2 取值的增大而减小, β 随抽运因子 P_m 取值的增加先减小后增大, β 随频率失谐 Δf 的增加先增大后减小, β 随抽运因子 P_s 的增大呈现先减小后平缓变化进而稍微上升的趋势, 从而得到了可以有效抑制延时特征值 β 的最佳参数区间, 在所选用参数值范围的大部分区间内

延时特征值 β 均远小于 0.2, 即说明 TDS 得到了有效的抑制。在 TDS 被有效抑制的参数条件下, 数值研究了本文所提系统的输出混沌光的 3 dB 带宽随反馈系数和注入系数等参数的变化规律并进行了分析。结果表明: 在所用参数范围内带宽随反馈系数 K_m 的增加而先增大后减小, 带宽随注入系数 K_2 的增加而增大, 带宽随抽运因子 P_m 的增加先增大而后趋于平缓, 带宽随反馈系数 K_s 的增加而增大, 带宽随抽运因子 P_s 的增加先快速增大之后缓慢减小, 带宽随频率失谐 Δf 值的增加先逐渐增大而后减小。综上, 对于本文所提出的方案, 在所选用的参数值区间内, 通过优化参数的取值, 系统输出混沌光的 TDS 被有效抑制了并且带宽得到增大, 这里获得混沌光的 3 dB 带宽最大值约为 20 GHz。本文的研究内容和结果对于混沌激光在保密通信等领域的应用是有意义的。

参 考 文 献

- [1] 李志军, 陈伟根, 季焱, 等. 基于分布反馈激光器双波长调制的微量气体测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 111404.
Li Z J, Chen W G, Ji Y, et al. Trace gas measurement method based on dual wavelength modulation of distributed feedback laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111404.
- [2] 王宇, 靳宝全, 张建国, 等. 基于混沌激光干涉的分布式光纤声音传感[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328016.
Wang Y, Jin B Q, Zhang J G, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing based on chaotic laser interference[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328016.
- [3] 吕艺辉, 杨玲珍, 李佳, 等. 混沌激光实现异质物大小和位置的检测[J]. 光学技术, 2020, 46(2): 146-151.
Lü Y H, Yang L Z, Li J, et al. Optical detection of the size and position of foreign object with chaotic laser[J]. Optical Technique, 2020, 46(2): 146-151.
- [4] Xue C P, Jiang N, Lv Y X, et al. Security-enhanced chaos communication with time-delay signature suppression and phase encryption[J]. Optics Letters, 2016, 41(16): 3690-3693.
- [5] 孙宇川, 毛晓鑫, 王安帮. 开环单向耦合半导体激光器的相位混沌同步[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1001003.
Sun Y C, Mao X X, Wang A B. Phase chaos synchronization of semiconductor laser with open-loop unidirectional coupling configuration[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1001003.
- [6] Yan S L. Chaos shift orbit modulation for secret communication[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021, 2026(1): 012015.
- [7] Shao W D, Fu Y D, Cheng M F, et al. Chaos synchronization based on hybrid entropy sources and applications to secure communication[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(18): 1038-1041.
- [8] 钟东洲, 徐喆, 赵可可, 等. 基于光学储备池计算的高速混沌保密通信的研究[J]. 光子学报, 2022, 51(4): 0406005.
Zhong D Z, Xu Z, Zhao K K, et al. Exploring of chaotic secure communications with high-speed using optical reservoir computers[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4): 0406005.
- [9] Verschaffelt G, Khoder M, van der Sande G. Random number generator based on an integrated laser with on-chip optical feedback[J]. Chaos, 2017, 27(11): 114310.
- [10] Xu S R, Jia X H, Ma H L, et al. Random-injection-based two-channel chaos with enhanced bandwidth and suppressed

- time-delay signature by mutually coupled lasers: proposal and numerical analysis[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(1): 014203.
- [11] Tseng C H, Funabashi R, Kanno K, et al. High-entropy chaos generation using semiconductor lasers subject to intensity-modulated optical injection for certified physical random number generation[J]. Optics Letters, 2021, 46(14): 3384-3387.
- [12] 吴佳辰, 宋峥, 谢溢锋, 等. 基于激光器阵列后处理的混沌熵源获取高品质随机数[J]. 物理学报, 2021, 70(10): 104205.
Wu J C, Song Z, Xie Y F, et al. High-quality random number sequences extracted from chaos post-processed by phased-array semiconductor laser[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(10): 104205.
- [13] Kawaguchi Y, Okuma T, Kanno K, et al. Entropy rate of chaos in an optically injected semiconductor laser for physical random number generation[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 2442-2457.
- [14] 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.
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.
- [15] 桑鲁骁, 李璞, 王安帮, 等. 基于混沌激光熵源产生实时高速随机码[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(3): 79-83, 94.
Sang L X, Li P, Wang A B, et al. Generating high-speed random bits in real time based on chaotic laser sources[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2017, 15(3): 79-83, 94.
- [16] Wang Y C, Zhang G W, Wang A B. Enhancement of chaotic carrier bandwidth in laser diode transmitter utilizing external light injection[J]. Optics Communications, 2007, 277(1): 156-160.
- [17] 颜森林. 基于相位共轭及交叉相位共轭反馈的耦合激光器混沌增频[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0808003.
Yan S L. Enhancing chaotic frequency of coupled lasers based on phase conjugation and cross-phase conjugation feedback[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0808003.
- [18] 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.
- [19] Cui S Y, Zhang J Z. Chaotic secure communication based on single feedback phase modulation and channel transmission[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 7905208.
- [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] 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.
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.
- [22] 张依宁, 冯玉玲, 王晓茜, 等. 半导体激光器混沌输出的延时特征和带宽[J]. 物理学报, 2020, 69(9): 090501.
Zhang Y N, Feng Y L, Wang X Q, et al. Time delay signature and bandwidth of chaotic laser output from semiconductor laser[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(9): 090501.
- [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] 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.
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.
- [25] 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.
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.
- [26] 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(1): 016211.
- [27] 张依宁, 徐艾诗, 冯玉玲, 等. 光电反馈半导体激光器输出光的混沌特性[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1214001.
Zhang Y N, Xu A S, Feng Y L, et al. Chaos characteristics of the output from a semiconductor laser subject to optoelectronic feedback[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1214001.
- [28] 阎娟, 潘炜, 李念强, 等. 外光注入半导体环形激光器同时产生两路宽带混沌信号[J]. 物理学报, 2016, 65(20): 204203.
Yan J, Pan W, Li N Q, et al. Two broadband chaotic signals generated simultaneously by semiconductor ring laser with parallel chaotic injection[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(20): 204203.
- [29] 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.
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.
- [30] 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.
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.

Chaotic Characteristics of Semiconductor Lasers with Dual-Path Chaotic Optical Injection and Phase-Modulated Optical Feedback

Pang Shuang, Feng Yuling*, Yu Ping

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

Abstract

Objective As class-B lasers, distributed feedback semiconductor lasers (DFB-SLs) can output chaotic laser under external disturbances, such as external optical injection and optoelectronic feedback, and the bandwidth is up to GHz.

Therefore, DFB-SLs are widely applied in many fields, such as secure communication and physical entropy sources for generating random physical numbers. However, the chaotic laser output from DFB-SLs has weak periodicity and time-delay signature (TDS) due to optical feedback and optical injection. This would reduce the quality of the random numbers generated with chaotic laser sources and restrict the applications of chaotic laser. In addition, the bandwidth (BW) of the chaotic laser determines the transmission rate of secure communication. For the above reasons, the TDS and BW are two important parameters that affect chaotic laser's applications and are often used to characterize the chaotic characteristics of chaotic laser. This paper presents a semiconductor laser system with external unidirectional dual-path optical injection and phase-modulated optical feedback (SL-EUDOI-PMOF) and investigates its effectiveness in suppressing the TDS and broadening the BW of chaotic laser. The results of this paper are significant for achieving information confidentiality and high-speed transmission in chaotic laser-based secure communication.

Methods This paper presents a scheme of semiconductor lasers. Specifically, a DFB-SL with an external-cavity optical feedback is used as the master laser, while a DFB-SL with the PMOF is taken as the slave laser. Subsequently, the chaotic laser output from the master laser is injected into the slave laser through two paths. The SL-EUDOI-PMOF is thereby obtained. Then, the influences of parameters, including the external optical injection coefficients and the feedback coefficients, on the TDS of the chaotic laser output from the SL-EUDOI-PMOF are numerically investigated. The time-delay eigenvalue β is defined as the maximum value of the time-delay eigenpeaks in the autocorrelation function curve of the chaotic laser. When $\beta < 0.2$, the TDS is suppressed. Furthermore, the BW of the chaotic laser is examined under the parameters enabling effective suppression of the TDS.

Results and Discussions Regarding the SL-EUDOI-PMOF proposed in this paper, the external optical feedback cavity for the slave laser contains a phase modulator driven by pseudo-random signals, and this would conceal the time-delay eigenpeaks and the TDS generated by the time-delay information of the injected laser and the feedback laser. Thus, the TDS is effectively suppressed. The numerical results show that the TDS of the chaotic laser output from the system is effectively suppressed by optimizing parameter values in the selected parameter value ranges, namely, the time-delay eigenvalue β is smaller than 0.2 [Fig. 2(b) and Figs. 3-7]. Besides, the minimum value of β is close to 0.06 (Fig. 4 and Figs. 6-7). In the proposed SL-EUDOI-PMOF, an external optical feedback cavity is equipped for the master laser, and chaotic laser can thus be output and further injected into the slave laser through two paths. The interference between the injected chaotic laser in the two paths enlarges the intensity of the laser injected into the slave laser, ultimately broadening the BW of the chaotic laser output from the slave laser. The numerical results reveal that the BW is effectively widened under the parameters enabling effective suppression of the TDS, and the maximum value of the 3-dB BW of the chaotic laser obtained is about 20 GHz [Fig. 9(c2) and Fig. 10].

Conclusions This paper proposes the SL-EUDOI-PMOF system for suppressing the TDS and broadening the BW of chaotic laser. For this purpose, the influences of the system's parameters on the TDS are numerically investigated, and the results are physically analyzed. The results show that in the selected parameter value ranges, the time-delay eigenvalue β decreases first and then increases as the feedback coefficient K_m or the pumping factor of the master laser increases. The value of β decreases as the feedback coefficient K_s or the two injection coefficients increase. Moreover, the value of β increases first and then decreases with an increasing frequency detuning, and it decreases first, then varies in a gentle manner, and rises slightly higher afterwards with the increase in the pumping factor of the slave laser. The optimal parameter value ranges for suppressing the TDS effectively are obtained accordingly. Then, the BW is investigated under the parameters enabling effective suppression of the TDS, and the result is physically analyzed. The analysis results show that the value of the BW increases rapidly first and then decreases slowly as the feedback coefficient K_m or the pumping factor of the slave laser increases. It increases with an increasing injection coefficient K_2 or an increasing feedback coefficient K_s . The value of the BW increases first and then varies gently as the pumping factor of the master laser rises, and it increases gradually first and then decreases rapidly with an increasing frequency detuning. The maximum value of the 3-dB BW of the chaotic laser obtained is about 20 GHz.

Key words lasers; distributed feedback semiconductor laser; chaotic laser; phase-modulated optical feedback; time-delay signature; bandwidth