

滤波对激光混沌信号时延特征抑制与随机统计特性增强的研究

姬玉林^{1,2}, 郭晓敏^{1,2}, 李璞^{1,2}, 刘香莲^{1,2}, 张建国^{1,2}, 郭龔强^{1,2*}

¹太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;

²新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 山西 太原 030024

摘要 实验研究了滤波对光反馈混沌半导体激光器输出信号中时延特征的抑制。在 100 MHz 和 500 MHz 低通滤波条件下, 利用在反馈时延附近的自相关峰值和排列熵峰值量化提取混沌信号的时延特征。测量了不同偏置电流下时延特征随反馈强度的变化。结果表明, 经过滤波, 在 $1.5I_{th}$ 、 -7.5 dB 条件下, 时延附近的自相关从 0.264 降低到 0.036, 排列熵从 0.985 上升到 0.997, 同时随着反馈强度的增大, 反馈时延附近的自相关峰值与排列熵呈反比关系; 混沌激光的复杂度和混沌强弱随反馈强度的增大呈先增强后减弱的趋势。滤波作用使混沌复杂度在更低的反馈强度下趋于最大, 并随着反馈强度的增大保持混沌复杂度不变。此外, 在抑制时延特征的同时, 滤波作用有效改善了混沌信号强度分布的随机统计特性。

关键词 非线性光学; 混沌; 半导体激光器; 光反馈; 排列熵

中图分类号 O432

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1008001

Suppression of Time-Delay Signature and Enhancement of Stochastic Statistical Properties of Chaotic Laser by Filtering

Ji Yulin^{1,2}, Guo Xiaomin^{1,2}, Li Pu^{1,2}, Liu Xianglian^{1,2},
Zhang Jianguo^{1,2}, Guo Yanqiang^{1,2*}

¹College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract The effect of filtering on the suppression of time-delay signature in the output signal of the optical feedback chaotic semiconductor laser is studied experimentally. Under the condition of the chaotic signal 100 MHz and 500 MHz low pass filter, the peak values of the autocorrelation coefficient and the permutation entropy at the feedback round trip time are used to quantitative extract the time-delay signature. The time-delay signatures with various feedback strengths are measured at different bias currents. The results show that the filtering effect suppresses the time-delay signature of the chaotic signal effectively. Under the condition of $1.5I_{th}$ bias current and -7.5 dB feedback strength, the autocorrelation function near the external cavity delay decreases from 0.264 to 0.036, and the permutation entropy increases from 0.985 to 0.997. Meanwhile, the peak value of the autocorrelation coefficient at the feedback round trip time is inversely proportional to the permutation entropy with the feedback strength increasing. The results also show that the complexity and strength of chaotic laser first rise, and then fall with the increase of feedback strength. The filtering effect induces the complexity of chaos to approach the maximum under lower feedback strength, and the complexity remains unchanged with the feedback strength increasing. Moreover, the filtering can also improve the intensity distribution and enhance the symmetry of probability-density function, which leads to substantial increase in the rate of random number generators.

Key words nonlinear optics; chaos; semiconductor lasers; optical feedback; permutation entropy

OCIS codes 190.3100; 140.1540; 140.5960; 120.3940

收稿日期: 2018-04-18; 修回日期: 2018-05-17; 录用日期: 2018-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(61405138, 61505136, 61505137, 61775158, 61671316, 61731014, 61705159)、山西省自然科学基金(201701D221116)、山西省回国留学人员科研资助项目(2017-040)

* E-mail: guoyanqiang@tyut.edu.cn

1 引 言

光反馈半导体激光器因其具有复杂的动力学特性、结构简单、易于调控、稳定性好等优点,已在工程领域得到广泛的应用^[1]。此种混沌激光系统对初值敏感,使得系统输出强度随机振荡且长期不可预测^[2-4]。基于上述特性,混沌激光在保密通信^[5]、高精度测距雷达^[6]、光时域反射仪^[7]、光纤传感^[8-9]及物理随机数^[10-12]等领域研究深入。然而,外腔反馈引入的时延特征(TDS)制约其在保密通信及随机数产生等方面的应用^[1]。因此抑制混沌激光的 TDS 就显得至关重要。

目前,已有多种方法表征分析混沌激光的 TDS^[13],如奇异值分解测量^[14]、填充因子分析^[15]、局部线性模型^[16]、神经网络模型^[17]、自相关函数^[18](ACF)、互信息^[19]和高阶相干度^[20]等。排列熵(PE)作为分析系统复杂度的方法之一,已用来量化 TDS^[21-22]。显著的 TDS 危及通信的安全性^[23],同时引发复现特征,严重影响了随机数序列的随机性^[10]。自此,相继提出了很多有效抑制混沌激光 TDS 的方法。

目前,抑制 TDS 的方法主要分为:1)从混沌激光光源的自身物理机制出发利用非线性动力学的物理相互作用抑制 TDS。自理论上首次提出利用改变外部参数条件可抑制外腔 TDS 以来^[24],已利用多反馈或注入等多种方式,达到抑制混沌激光 TDS 的效果。相互延迟耦合的半导体激光器系统^[25]及在光反馈回路中引入啁啾光纤布拉格光栅^[26],均可有效抑制 TDS。同时通过相位调制双路反馈^[27]、多激光器级联^[28]或互耦合^[29]等方式抑制 TDS。然而,上述通过控制混沌激光源参数抑制 TDS 的物理机制尚存在争议^[30],且目前控制参数有限。2)通过后处理抑制 TDS。在高速物理随机数产生中,对混沌激光信号进行异或差分逻辑处理^[10]或延迟光外差^[31]能有效抑制 TDS,但是该方法对后处理器件要求较高,在实际应用中仍存在电子速率瓶颈和成本昂贵等问题。

本文利用对混沌激光源输出的信号进行选择滤波提取作用可以抑制混沌激光的 TDS,而且实验验证了外部滤波还可有效提高混沌信号的复杂度,理论分析并实验验证了反馈强度对 TDS 的影响,同时给出滤波后 TDS 随反馈强度的变化结果。该方案

避免了多个混沌光源注入级联、参数控制等结构复杂及繁琐的过程,有利于随机数产生及混沌保密通信中相关性能的提升,并为揭示抑制混沌时延特征的内在机理提供借鉴。

2 混沌半导体激光器理论模型

外腔延迟光反馈的半导体激光器作为一种典型的混沌信号产生系统可以用 Lang-Kobayashi 速率方程进行描述,为了使数值模拟结果和本文实验中所观察到的激光输出信号相接近,选取包含增益饱和和因子的 Lang-Kobayashi 方程^[32]为

$$\dot{E}(t) = \frac{1}{2}[G(t) - \tau_p^{-1}]E(t) + \kappa E(t - \tau) \cos[\phi(t)], \quad (1)$$

$$\dot{\phi}(t) = \frac{\alpha}{2}[G(t) - \tau_p^{-1}] - \kappa E(t - \tau)E(t)^{-1} \sin[\phi(t)], \quad (2)$$

$$\dot{N}(t) = \frac{I}{e} - \frac{N(t)}{\tau_N} - G(t) |E(t)|^2, \quad (3)$$

$$\phi(t) = \omega\tau + \varphi(t) - \varphi(t - \tau), \quad (4)$$

式中: $E(t)$ 为电场强度振幅; φ 为电场相位; N 为载流子密度; $G(t) = G_N[N(t) - N_0]/[1 + \epsilon |E(t)|^2]$ 为非线性光增益(其中 G_N 为增益系数, ϵ 为饱和系数); N_0 为透明载流子密度; α 为线宽增强因子; τ_p 和 τ_N 分别为光子寿命和载流子寿命; $\kappa = (1 - r_{in}^2)r_0/(r_{in}\tau_{in})$ 为反馈强度(其中 r_{in} 、 r_0 分别为内腔、外腔反射率, τ_{in} 为光在内腔往返的时间); $\tau = 2L/c$ 为外腔反馈延迟时间(其中 L 为外腔长度, c 为介质中的光速); $I = \rho I_{th}$ 为注入电流密度(其中 I_{th} 为阈值电流); $\omega = 2\pi c/\lambda$ 为光场角频率, λ 为光波长; e 为单位电荷量。数值模拟中选取与实际实验条件对应的参数有: $\alpha = 3$ 、 $G_N = 6.5 \times 10^{-8} \text{ ps}^{-1}$ 、 $N_0 = 1.46 \times 10^8$ 、 $\tau = 86.7 \text{ ns}$ 、 $\tau_p = 2.03 \text{ ps}$ 、 $\tau_N = 2.05 \text{ ns}$ 、 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 、 $\epsilon = 5 \times 10^{-7}$ 和 $c = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。采用上述参数通过四阶龙格-库塔方法对(1)~(3)式进行数值积分,设定积分步长 h 为 $5 \times 10^{-12} \text{ s}$ 。图 1 为采用 Lang-Kobayashi 速率方程数值模拟光反馈混沌半导体激光器在偏置电流 $I = 1.5 I_{th}$,反馈强度 $\kappa = 10 \text{ ns}^{-1}$ 时的时序及频谱,可以看出,混沌激光输出时序信号强度呈现大幅度的随机振荡,同时频谱宽度为 9.6 GHz(根据 80%带宽定义)。该数值结果表明,输出的光场信号进入明显的混沌状态。

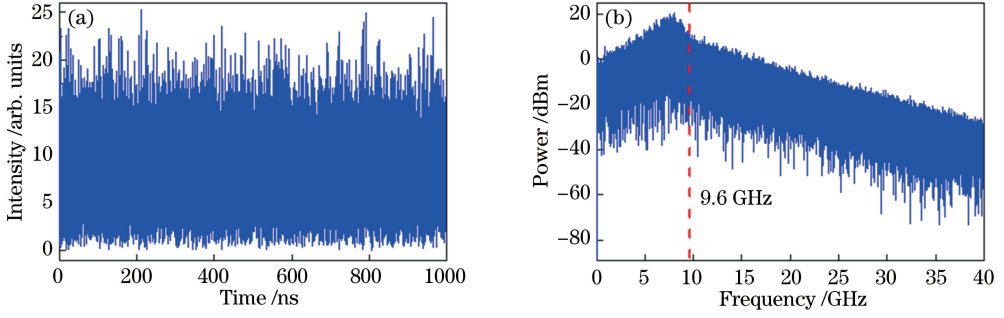


图 1 $I=1.5I_{th}$ 、 $\kappa=10 \text{ ns}^{-1}$ 时数值模拟混沌激光。(a)时序;(b)频谱(虚线表示 80%频率带宽)

Fig. 1 Numerical simulation results of chaotic laser at $I=1.5I_{th}$ and $\kappa=10 \text{ ns}^{-1}$.

(a) Time traces; (b) power spectra (vertical dashed line indicates 80% frequency bandwidth)

3 时延特征的分析方法

为了量化分析混沌激光系统中的时延特征,可利用自相关函数(ACF)、排列熵(PE)、互相关和互信息等方法。采用 ACF 和 PE 量化提取 TDS 信号,同时用于表征对 TDS 的抑制效果。ACF 用于表征信号本身与其时延信号的相关程度定义为

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

式中: $I(t)$ 为混沌激光信号的强度; $\langle \cdot \rangle$ 为时间的平均; Δt 为延迟时间。则在反馈延迟时间 Δt 附近的峰值可表示为

$$C_p = \max |C(\Delta t)|_{\Delta t \in \lambda(\tau)}, \quad (6)$$

式中: τ 为外腔反馈时间; $\lambda(\tau) = (\tau - 0.5, \tau + 0.5)$,如图 2(a)所示。反馈延迟处自相关的最大值 C_p 还可用于度量混沌由弱到强的动力学变化过程^[32]。 $H(p)$ 为 τ 附近的最小值。

PE 最先由 Bandt 和 Pompe 引入,用于分析度量生成时序信号的复杂性^[21]。对于给定的时间序

列 $X = \{x(1), x(2), \dots, x(n)\}$,采用相空间重构延迟坐标法对 X 中的任一元素 $x(i)$ 进行相空间重构,对每个采样点取其连续的 m 个样点,得到 m 维向量 $X_i = \{x(i), x(i+1), \dots, x[i+(m-1) \cdot l]\}$,其中 m 和 l 分别为嵌入维度和嵌入时延,再对 X_i 各元素进行升序排列,可得到:

$$X_i = \{x[i+(j_1-1) \cdot l] \leq x[i+(j_2-1) \cdot l] \leq \dots x[i+(j_m-1) \cdot l]\}. \quad (7)$$

这样得到的排列方式为 $\{j_1, j_2, \dots, j_m\}$,其为全排列 $m!$ 中的一种,对 X 序列的各种排列出现次数进行统计,计算各种排列出现的相对频率作为其概率 $p_1, p_2, \dots, p_k, k \leq m!$ 。归一化的排列熵定义为

$$H(p) = \frac{-\sum_{i=1}^k p_i \ln p_i}{\ln(m!)}. \quad (8)$$

可知归一化排列熵 $0 \leq H(p) \leq 1$,1 和 0 分别为动力学变化过程随机和可预测。目前已证明,对于现有实验测量 m 可以在 3 和 7 之间选择^[19]。选取 $4 \leq m \leq 7$ 时,与本文结果一致。故选取 $m=4$ 时,通过反馈时延 τ 附近的峰值 $H(p)$ 量化时延特征,如图 2(b)所示。

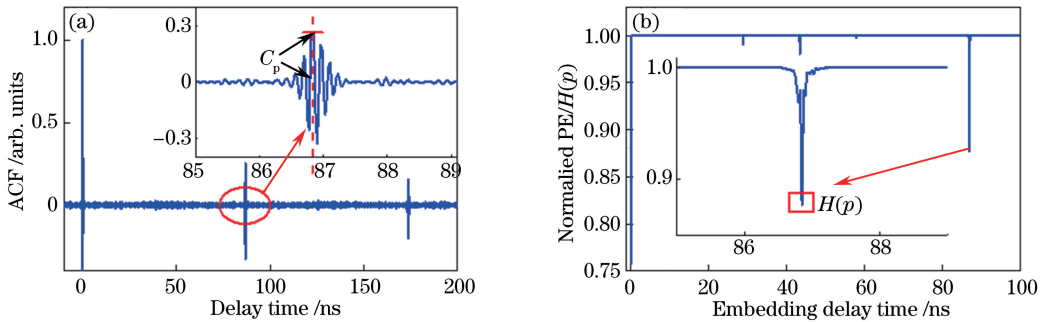


图 2 $I=1.5I_{th}$ 、 $\kappa=10 \text{ ns}^{-1}$ 时数值模拟。(a)自相关(虚线表示 $\tau=86.7 \text{ ns}$);(b)排列熵随延迟时间的变化

Fig. 2 Numerical results at $I=1.5I_{th}$ and $\kappa=10 \text{ ns}^{-1}$.

(a) ACF (vertical dashed line indicates $\tau=86.7 \text{ ns}$); (b) permutation entropy as a function of delay time

图 3 所示为采用 Lang-Kobayashi 速率方程理论模拟反馈时延附近的 ACF 及 PE 随反馈强度 κ ($0 \sim 30 \text{ ns}^{-1}$) 和偏置电流 I ($1.35I_{th}$ 、 $1.5I_{th}$ 、 $1.75I_{th}$ 、 $2I_{th}$) 的变化: 在所有偏置电流下, C_p 量化的 TDS 随反馈强度 κ 的增大先降低后升高, 而且 TDS 最低点随 I 的增大向反馈强度大的方向移动, 表明混沌的强度随着反馈的增大由弱到强, 之

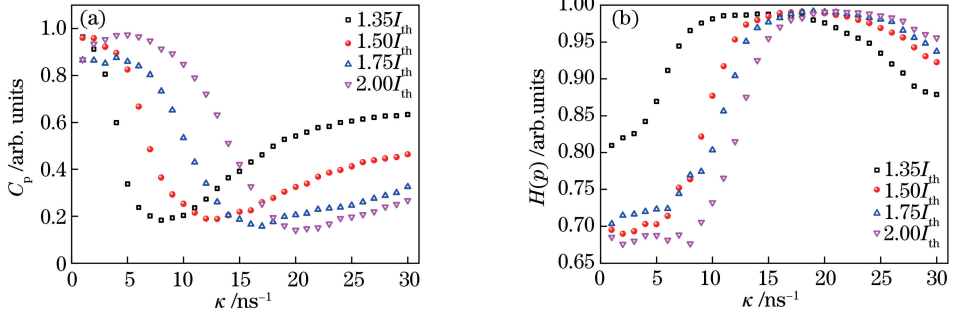


图 3 随 κ 在偏置电流 $1.35I_{th}$ 、 $1.5I_{th}$ 、 $1.75I_{th}$ 、 $2I_{th}$ 变化结果的数值模拟。(a) C_p ; (b) $H(p)$

Fig. 3 Numerical results at various κ and bias current of $1.35I_{th}$ 、 $1.5I_{th}$ 、 $1.75I_{th}$ and $2I_{th}$. (a) C_p ; (b) $H(p)$

4 滤波抑制时延特征的实验装置

利用滤波作用抑制混沌激光的 TDS 同时提高熵值的实验装置如图 4 所示。第一模块为混沌激光源: 无光隔离器的分布式反馈半导体激光器 (DFB-LD, 阈值电流 $I_{th} = 12 \text{ mA}$, 中心波长为 1550 nm) 被低噪声电流源 (CS 的精度为 0.1 mA) 和温控源 (TC 的精度为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$) 稳定控制在阈值以上运行。输出的连续光经由偏振控制器 (PC)、光环形器、50/50 的光耦合器 (OC)、数字可调光衰减器 (VOA 的精度为 0.1 dB) 构成延迟时间 $\tau = 86.7 \text{ ns}$ 的光纤反馈回路, 部分再次反馈到 DFB-LD 的内腔中。通过调节反馈信号的偏振态使其与自由运行的激光器偏振方

后再减弱; $H(p)$ 量化的 TDS 随反馈强度 κ 的增大先增大后减小, 最高点随注入电流 I 的增大也向反馈强度大的方向移动。数值模拟结果表明, 偏置电流 $I \geq 1.5I_{th}$ 时, 在反馈强度较小 ($\kappa \leq 10 \text{ ns}^{-1}$) 和较大 ($\kappa \geq 25 \text{ ns}^{-1}$) 的区域, 所产生的混沌信号带有明显的 TDS, 混沌较弱, 熵值和系统的复杂度较低。

向平行, 以达到最佳的耦合状态。光隔离器 (ISO) 用于确保光反馈半导体激光器产生的混沌激光信号单向传输, 信号经快速光电探测器 (PD 的带宽为 50 GHz) 转换成电信号。第二模块为滤波系统: 信号发生器 (SG) 输出频率 1 GHz 的正弦波信号与混沌信号进行混频 (M), 实验中采用 100 MHz (500 MHz) 低通滤波器在混沌信号的 1 GHz 中心频率处滤波, 滤波后得到带宽 100 MHz (500 MHz) 的混沌信号。此处低通滤波器的作用是选频滤波, 这是由于实际混沌信号来源于各个频率段信号的叠加, 因此偏离或不满足高斯随机分布, 信号叠加后使得分布偏差较大, 采用低通滤波可以将原始混沌信号进行选频提取, 得到满足

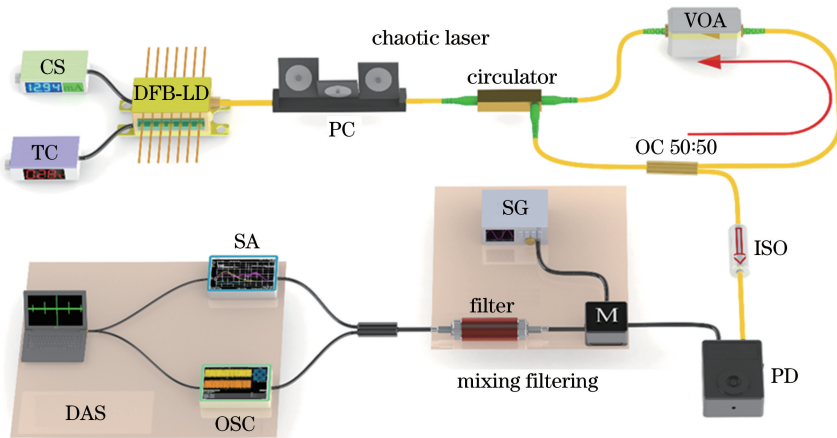


图 4 利用滤波作用抑制混沌激光时延特征的实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of the experimental setup for the suppressing of time-delay signature in chaotic lasers by filtering

高斯随机分布的信号,而高斯随机信号满足光场随机分布的特性,去除或降低原始信号中的周期成分,由此可有效抑制混沌激光信号的 TDS 以及改善其随机统计分布。第三模块为数据采集系统:将得到的滤波信号输入到由带宽为 26.5 GHz 的频谱仪(SA)和带宽为 6 GHz、采样率为 40 GS/s 的实时示波器(OSC)构成的数据采集系统(DAS)中,用于采集滤波信号的频谱和时序。

5 实验结果

5.1 滤波抑制 TDS

实验中,通过调节 DFB-LD 不同的偏置电流 $1.35I_{th}$ 、 $1.5I_{th}$ 、 $1.75I_{th}$ 、 $2I_{th}$, 反馈光强度由 -27.5 dB 调节到 -1.5 dB,并且在各个偏置电流及反馈强度下采集混沌光场的时序和频谱。图 5(a)

表示光反馈半导体激光器在 $1.5I_{th}$ 、 -7.5 dB 反馈强度时测得的混沌激光的频谱、时序、ACF 以及 PE,在延迟时间附近的 TDS 为 $C_p=0.264$ 、 $H(p)=0.985$,呈现显著的 TDS。经过滤波,在图 5(a1) 中所示的 1 GHz 频率处,先后滤波得到 500 MHz 和 100 MHz 带宽信号的频谱、时序、ACF 以及 PE,其测量结果分别为图 5(b1)~(b4)和(c1)~(c4)所示,可以得到频谱平坦、随机起伏的滤波信号。经过 500 MHz 滤波后,ACF 表征反馈延迟附近的 TDS 可从 $C_p=0.264$ 降至 0.036、排列熵表征反馈延迟附近的 TDS 可从 $H(p)=0.985$ 提升至 0.997; 经过 100 MHz 滤波后,ACF 表征反馈延迟附近的 TDS 可降至 $C_p=0.047$ 、排列熵表征反馈延迟附近的 TDS 可提升至 $H(p)=0.992$ 。可见,滤波处理可明显抑制混沌激光的 TDS,同时提高混沌信号的复杂度。

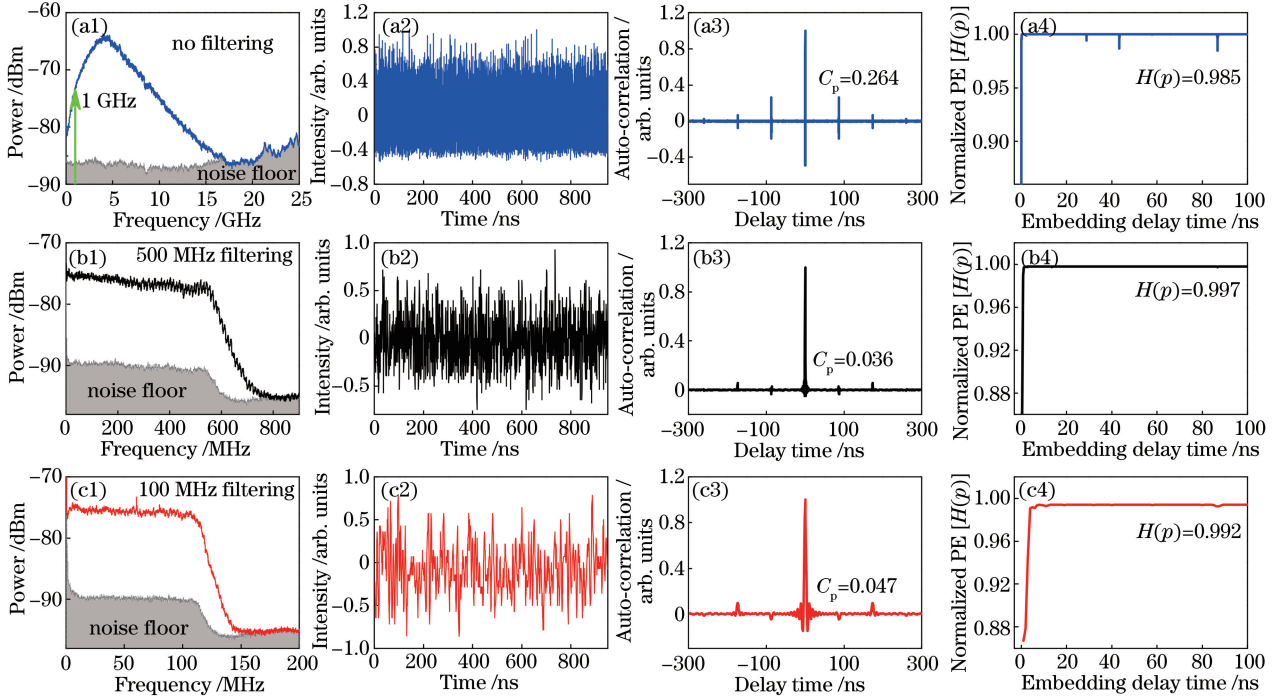


图 5 $1.5I_{th}$ 、 -7.5 dB 实验测得的混沌激光信号滤波前、后的频谱,时序,自相关和排列熵的结果。(a1)~(a4)滤波前的混沌激光信号及 TDS;(b1)~(b4) 500 MHz 滤波后的混沌激光信号及 TDS;(c1)~(c4) 100 MHz 滤波后的混沌激光信号及 TDS

Fig. 5 Experimental frequency spectra, time traces, autocorrelation function and permutation entropy of the chaotic laser signal before and after filtering at inject current of $1.5I_{th}$ and feedback strength of -7.5 dB. (a1)-(a4) Chaotic laser signal and TDS before filtering; (b1)-(b4) chaotic laser signal and TDS after 500 MHz filtering; (c1)-(c4) chaotic laser signal and TDS after 100 MHz filtering

为了进一步证明滤波对混沌激光的 TDS 具有稳定的抑制作用,在不同偏置电流和反馈强度下测量了混沌激光反馈延迟附近的 C_p 及 $H(p)$ 值。图 6 为滤波前后 TDS 随反馈强度和偏置电流的变化结果。如图 6(a1)、(b1)所示,在偏置电流一定时,滤

波前混沌激光信号的 C_p 随反馈强度的增大呈现先升高后降低再升高的变化; $H(p)$ 则呈现出相反的变化,在一定反馈强度下,TDS 变化不明显, C_p 值最小时 $H(p)$ 趋于最大,表明该处混沌强度最强,复杂度最大。当反馈强度较小时,光纤接头端面

的反射对实验结果产生影响,随着反馈强度的增大实验结果与图 3 理论模拟结果符合。图 6(a2)、(b2)表明经过 500 MHz 滤波后,在 $1.35I_{th}$ 、 $1.5I_{th}$ 、 $1.75I_{th}$ 、 $2I_{th}$ 偏置电流下,反馈强度较小时, TDS 明显降低,同时在 $-21 \sim -8$ dB 反馈强度下 $C_p < 0.1$, 而 $H(p) > 0.95$ 。同理,如图 6(a3)、(b3)所示,经过 100 MHz 滤波后的 TDS 相比 500 MHz

滤波,其抑制的效果更加明显,而且在较大的偏置电流下,延迟处 TDS 的 C_p 可降至 0.006, 而 $H(p)$ 可提高至 0.998,同时对混沌激光的 TDS 具有较稳定的抑制作用,随反馈强度的波动变小。经过 100 MHz 滤波,在 $1.5I_{th}$ 、 -24.5 dB 条件下,时延附近的自相关从 0.95 降低到 0.028,排列熵从 0.65 上升到 0.97。

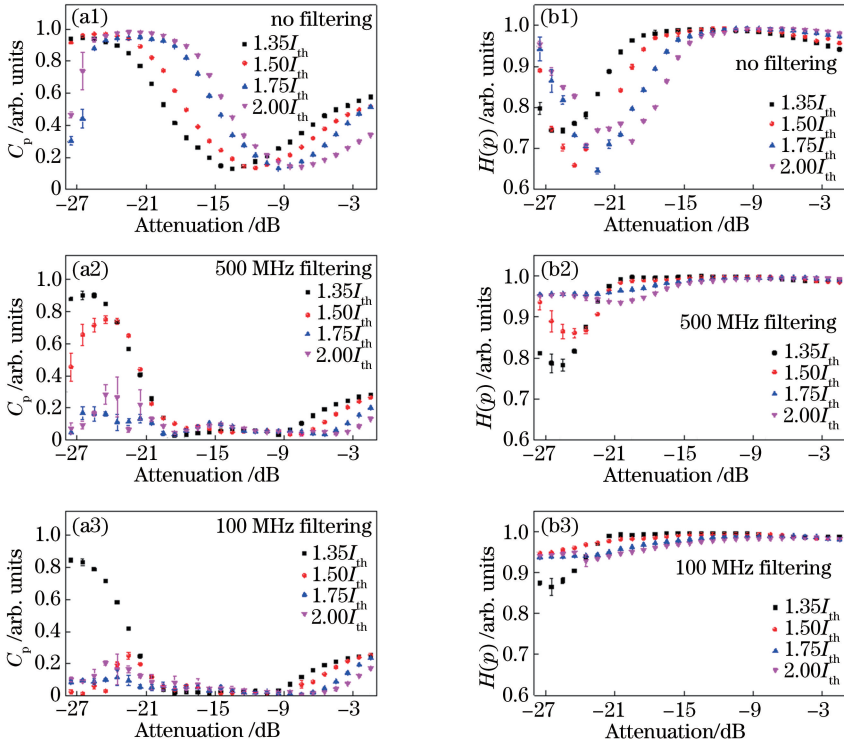


图 6 实验测得混沌信号滤波前、后 C_p 和 $H(p)$ 随反馈强度和偏置电流的变化结果。

(a1)(b1)滤波前的结果;(a2)(b2) 500 MHz 滤波后的结果;(a3)(b3) 100 MHz 滤波后的结果

Fig. 6 Experimental results for C_p and $H(p)$ of the chaotic signal at various feedback intensity and bias current

before and after filtering. (a1) (b1) Before filtering; (a2)(b2) after 500 MHz filtering; (a3)(b3) after 100 MHz filtering

5.2 滤波对随机统计特性的增强

除了抑制混沌激光的 TDS,滤波还可有效改善信号强度分布的随机统计特性。图 7(a)为实验测得的滤波前的时序和其概率统计分布结果,混沌激光的强度统计分布呈现明显的偏差,这是由于原始的混沌信号来自多个频率段信号的叠加,叠加的过程中由于存在非高斯分布的杂散信号,所以引入了偏差。利用理想随机信号所应满足的高斯随机分布进行拟合^[33],可得其统计分布偏度为 0.3849,实线代表实验测得的强度均值所对应的高斯随机分布拟合,虚线代表归一化后的统计平均值。图 7(b)、(c)分别表示 500 和 100 MHz 滤波后的时序及强度概率统计分布,此时混沌激光信号的概率统计分布得到明显改善,与高斯随机统计分布拟合较好,对应的

统计分布偏度分别为 0.0277 和 0.0086,这是由于采用低通滤波可以从原始混沌信号中,选频提取符合高斯随机分布的信号。进一步实验研究了偏置电流在 $1.5I_{th}$ 条件下,混沌信号强度统计分布偏度随反馈强度的变化,其结果如图 7(d)所示。无滤波作用时,混沌激光信号的统计分布偏度值随着反馈强度的增大,由 0.1 上升至 0.55,表明无滤波时外腔反馈形成的混沌激光信号的统计分布,与理想高斯随机分布存在明显偏差,这种统计分布的不对称性在随机数产生中会导致 0、1 码较大的偏差率,降低随机数的生成质量。而经过滤波后,混沌激光信号的统计分布偏度在不同反馈条件下均保持在 0 附近,表明滤波效应可有效改善混沌输出强度的随机统计分布特性。为了验证滤波对随机统计特性的增强效

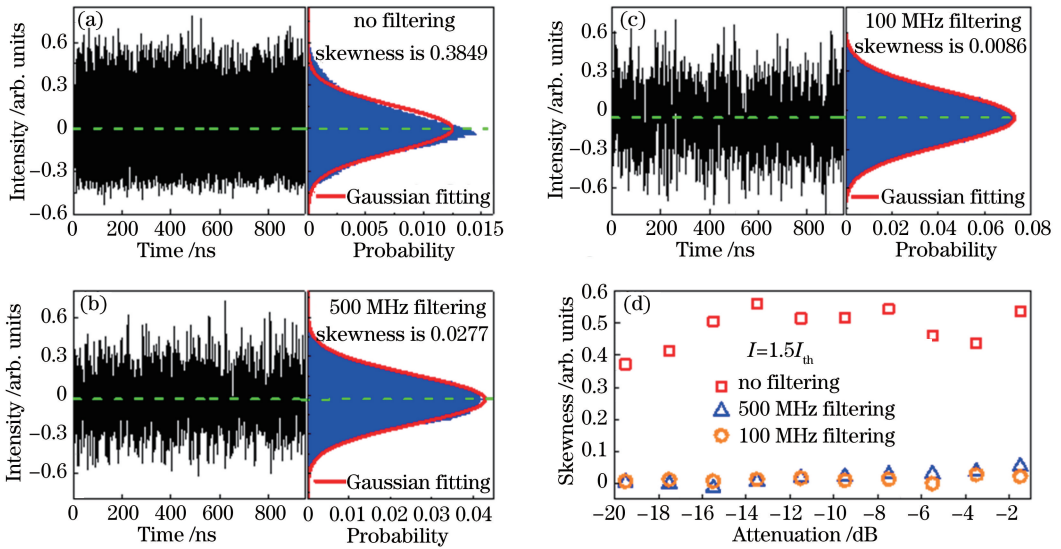


图 7 实验测得混沌信号滤波前后的时序、强度统计分布和偏度的结果。(a) 滤波前的统计分布结果;(b) 500 MHz 滤波后的统计分布结果;(c) 100 MHz 滤波后的统计分布结果;(d) 在 $1.5I_{th}$ 电流下, 滤波前后强度统计分布偏度随反馈强度的变化(实线表示高斯随机分布拟合, 虚线表示强度时序的均值)

Fig. 7 Experimental results for time series, intensity distribution and skewness of the chaotic signal before and after filtering. (a) Statistical distribution before filtering; (b) statistical distribution after 500 MHz filtering; (c) statistical distribution after 100 MHz filtering; (d) skewness of intensity distribution at various feedback strength at $1.5I_{th}$ (solid curve represents Gaussian fitting, and dashed line represents the mean of value time series)

果,通过计算滤波前后时序的最大李雅普诺夫指数随反馈强度的变化可知,在 $1.5I_{th}$ 和 -5.5 dB 反馈强度下,最大李雅普诺夫指数由原始混沌的 0.0787 经 100 MHz 滤波增大到 0.452,可见滤波对随机性增强效果明显。

6 结 论

通过外部滤波抑制光反馈半导体激光器输出混沌激光信号的时延特征,分析了 100 MHz 和 500 MHz 不同低通滤波条件下,混沌激光光电转换信号经滤波前、后的变化情况,测量了 $1.35I_{th}$ 、 $1.5I_{th}$ 、 $1.75I_{th}$ 、 $2I_{th}$ 偏置电流下时延特征随反馈强度的变化。实验结果表明,经过滤波,时延附近的自相关最低可降至 0.006,排列熵最高升至 0.998。另外,滤波作用在反馈强度 -21 dB \sim -8 dB 时,抑制反馈时延附近的 ACF 峰值 < 0.1 , PE 峰值 > 0.925 。随着反馈强度的增大,抑制效果增强。同时,发现反馈时延附近的 ACF 峰值与 PE 峰值近似呈反比关系,可依据其判断混沌的强弱。滤波作用可以明显改善混沌激光强度统计分布的特性,其概率分布的偏度保持在 0 附近,时延特征的抑制及统计分布对称性的改善均有利于物理随机数的产生。本研究为抑制混沌光场时延特征及滤波特性的分析提供了一种新的途径。

参 考 文 献

- [1] Soriano M C, García-Ojalvo J, Mirasso C R, *et al.* Complex photonics: dynamics and applications of delay-coupled semiconductor lasers[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2013, 85(1): 421-470.
- [2] Sciamanna M, Shore K A. Physics and applications of laser diode chaos[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 151-162.
- [3] Sunada S, Harayama T, Davis P, *et al.* Noise amplification by chaotic dynamics in a delayed feedback laser system and its application to nondeterministic random bit generation[J]. *Chaos*, 2012, 22(4): 047513.
- [4] Yan S L. Period-control and chaos-anti-control of a semiconductor laser using the twisted fiber [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(9): 090504.
- [5] 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.
- [6] Lin F Y, Liu J M. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(6): 815-820.
- [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] Ma Z, Zhang M J, Liu Y, *et al.* Incoherent brillouin optical time-domain reflectometry with random state correlated brillouin spectrum [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(4): 6100407.
- [9] Yan S L. Period-one characteristic in an optoelectronic delayed feedback semiconductor laser and its application in sensing [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(4): 040401.
- [10] 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.
- [11] Zhang L M, Pan B W, Chen G C, *et al.* 640-Gbit/s fast physical random number generation using a broadband chaotic semiconductor laser[J]. Scientific Reports, 2017, 8: 45900.
- [12] Wang A B, Wang L S, Li P, *et al.* Minimal-post-processing 320-Gbps true random bit generation using physical white chaos[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3153-3164.
- [13] Bünner M, Popp M, Meyer T, *et al.* Tool to recover scalar time-delay systems from experimental time series[J]. Physical Review E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 1996, 54(4): R3082-R3085.
- [14] Fowler A C, Kember G. Delay recognition in chaotic time series [J]. Physics Letters A, 1993, 175(6): 402-408.
- [15] Bünner M J, Meyer T, Kittel A, *et al.* Recovery of the time-evolution equation of time-delay systems from time series [J]. Physical Review E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 1997, 56(5): 5083-5089.
- [16] Hegger R, Bünner M J, Kantz H, *et al.* Identifying and modeling delay feedback systems [J]. Physical Review Letters, 1998, 81(3): 558-561.
- [17] Ortín S, Gutiérrez J M, Pesquera L, *et al.* Nonlinear dynamics extraction for time-delay systems using modular neural networks synchronization and prediction[J]. Physica A, 2005, 351: 133-141.
- [18] 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.
- [19] Wu J G, Xia G Q, Wu Z M. Suppression of time delay signatures of chaotic output in a semiconductor laser with double optical feedback [J]. Optics Express, 2009, 17(22): 20124-20133.
- [20] Guo Y Q, Peng C S, Ji Y L, *et al.* Photon statistics and bunching of a chaotic semiconductor laser [J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5991-6000.
- [21] Bandt C, Pompe B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series [J]. Physical Review Letters, 2002, 88(17): 174102.
- [22] Zunino L, Soriano M C, Fischer I, *et al.* Permutation-information-theory approach to unveil delay dynamics from time-series analysis[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2010, 82(4): 046212.
- [23] Zhou C, Lai C H. Extracting messages masked by chaotic signals of time-delay systems [J]. Physical Review E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 1999, 60(1): 320-323.
- [24] 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.
- [25] Wu J G, Wu Z M, Xia G Q, *et al.* Evolution of time delay signature of chaos generated in a mutually delay-coupled semiconductor lasers system [J]. Optics Express, 2012, 20(2): 1741-1753.
- [26] Wang D M, Wang L S, Zhao T, *et al.* Time delay signature elimination of chaos in a semiconductor laser by dispersive feedback from a chirped FBG[J]. Optics Express, 2017, 25(10): 10911-10924.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Zhang X X, Wu T A, Chang K G, *et al.* Time-delay characteristic and bandwidth analysis of chaotic output from single-ended feedback and mutually coupled vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0501010. 张晓旭, 吴天安, 常凯歌, 等. 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 [J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0501010.
- [30] Wu Y, Wang Y C, Li P, *et al.* Can fixed time delay signature be concealed in chaotic semiconductor laser with optical feedback? [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(11): 1371-1379.
- [31] 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.

- [32] Li N Q, Kim B, Locquet A, *et al.* Statistics of the optical intensity of a chaotic external-cavity DFB laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5949-5952.
- [33] Lan D D, Guo X M, Peng C S, *et al.* Photon number distribution and second-order degree of coherence of a chaotic laser: analysis and experimental investigation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(12): 120502.
- 兰豆豆, 郭晓敏, 彭春生, 等. 混沌光场光子统计分布及二阶相干度的分析与测量[J]. *物理学报*, 2017, 66(12): 120502.