

掺镱光纤放大器混沌输出随机特性研究

祝王华¹, 杨玲珍^{1,2*}, 任静峰¹, 李佳¹, 吴天龙¹, 王娟芬¹¹太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;²太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024

摘要 对混沌激光在放大过程中的随机特性进行了实验研究。基于光纤中的非线性克尔效应, 通常采用环形腔结构来产生混沌激光。通过控制泵浦源电流实现了不同功率混沌激光的输出, 并利用掺镱光纤放大器进行放大。然后, 利用排列熵、偏度和峰度对混沌激光放大过程中的随机特性进行了定量分析。结果表明: 排列熵随光纤放大器泵浦电流的增大而减小并趋于一个稳定值; 在排列熵相近时, 偏度和峰度随光纤放大器泵浦电流的增大呈先增大后减小的趋势, 即放大过程中混沌激光的随机特性先减小后增加。

关键词 激光光学; 混沌激光; 掺镱光纤放大器; 排列熵; 偏度; 峰度; 随机特性

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1914005

Study on Random Characteristic of Chaotic Output of Ytterbium-doped Fiber Amplifier

Zhu Wanghua¹, Yang Lingzhen^{1,2*}, Ren Jingfeng¹, Li Jia¹, Wu Tianlong¹, Wang Juanfen¹¹College 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 experimental study on the random characteristic of chaotic laser in the amplification process is carried out. A ring cavity structure is usually applied to generate chaotic laser based on the nonlinear Kerr effect in fiber. The outputs of chaotic laser with different powers are realized by controlling pump current, and they are amplified by ytterbium-doped fiber amplifier. Then, the random characteristic of chaotic laser in the amplification process is analyzed quantitatively by permutation entropy, skewness and kurtosis. The results show that the permutation entropy decreases with the increase of the pump current of the fiber amplifier and tends to a stable value. The skewness and kurtosis first increase and then decrease with the increase of the pump current of the fiber amplifier when the permutation entropy is similar, indicating that the random characteristic of the chaotic laser first decreases and then increases during the amplification process.

Key words laser optics; chaotic laser; ytterbium-doped fiber amplifier; permutation entropy; skewness; kurtosis; random characteristic

OCIS codes 140.1540; 140.3510; 060.2320

收稿日期: 2021-02-01; 修回日期: 2021-02-04; 录用日期: 2021-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(61975141, 61575137, 61675144)

通信作者: *office-science@tyut.edu.cn

1 引言

混沌激光因具有类噪声、宽带宽和类 delta 函数的相关特性等优势被广泛应用于雷达探测、光纤网络断点检测、保密通信和生物医学传感等领域。因为实际应用的需求以及混沌激光本身功率存在限制,所以一般都会对混沌激光进行不同程度的放大。2015年, Illig 等^[1]用两级掺镱光纤放大器对混沌激光进行放大,倍频后得到了波长为 532 nm 的绿光,并将其应用于对水下目标的探测中。2018年, Song 等^[2]利用经过掺铒光纤放大后的混沌信号实现了对光纤网络断点的准分布式探测。2018年, Ke 等^[3]在长度超过 100 km 的光纤上实现了 30 Gb/s 比特率的混沌通信速率,并在信号传输系统中利用两级掺铒光纤放大器对混沌激光进行了功率补偿。这些应用和研究都依赖于混沌激光的随机特性,并且在上述的应用和研究中都对混沌激光进行了放大。

通常利用李雅普诺夫指数、熵和关联维数等特征量来衡量混沌信号的随机特性。1964年, Henon 等^[4]提出了李雅普诺夫指数,并将该指数作为判断一个系统处于混沌状态的依据。1976年, Lempel 等^[5]改进了 K 熵算法,对混沌信号的随机特性进行了判断和衡量。1991年, Pincus 等^[6]提出了近似熵算法来衡量系统的随机特性。2000年, Richman 等^[7]对近似熵算法进行了改进并提出了样本熵算法。2002年, Bandt 等^[8]提出了排列熵算法以度量混沌时间序列的随机特性。2006年, Kane 等^[9]提出了用关联维数来讨论外腔反馈半导体激光器产生的混沌信号的随机特性。在这些方法中,通过熵能够定量分析混沌信号的随机特性,其中排列熵算法因具有方法简便、计算速度快、对噪声具有鲁棒性等优点而被广泛应用^[10-13]。但是,采用排列熵只能大体上衡量混沌信号的随机特性,无法体现出混沌时间序列在放大过程中的随机特性变化,故本文采用偏度和峰度来进一步衡量混沌信号的随机程度^[14-16]。

首先,利用环形腔结构产生混沌激光,并利用掺镱光纤放大器将其放大。接着,采用排列熵、偏度和峰度来综合分析混沌激光在放大过程中随机特性的变化。本研究为混沌激光放大的应用提供了一定的指导。

2 实验装置及分析方法

2.1 实验装置

图 1 为混沌激光产生及放大实验装置,其中 I 为混沌激光光源, II 为掺 Yb³⁺ 光纤(YDF)放大器。混沌激光光源中采用的是由 980/1060 nm 波分复用器(WDM-1)、长度为 4 m 的 YDF、长度为 500 m 的单模光纤(SMF)、耦合比为 90%:10% 的光纤耦合器(OC-1)、偏振控制器(PC)和光隔离器(ISO-1)构成的环形腔结构。将中心波长为 980 nm 的半导体激光器(LD-1)作为泵浦源为 YDF 提供泵浦能量。首先,调节泵浦电流和 PC 来控制环形腔中的非线性克尔效应,使得光场在非线性克尔效应的作用下产生感应双折射,并发生自相位调制和互相位调制,进而使激光进入混沌状态。然后,混沌激光经由光纤耦合器 2(OC-2)进入 YDF 放大器中被放大,放大后的混沌信号经过光纤耦合器 3(OC-3)后被分成两路。最后,利用示波器(OSC)和光谱仪(OSA)分别对这两路信号进行实时监测和数据采集。实验所用光电探测器是光纤耦合铟镓砷探测器,波长探测范围为 800~1700 nm,带宽为 1.2 GHz。

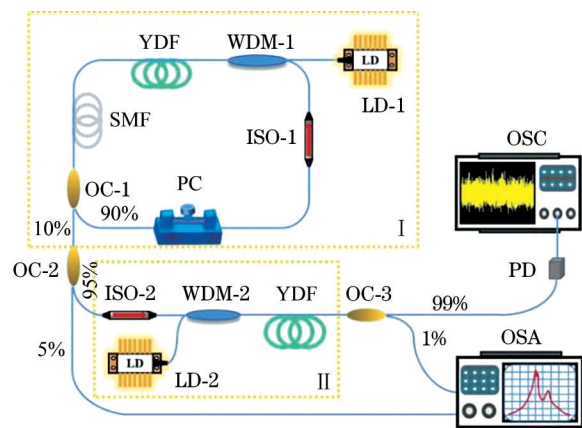


图 1 混沌激光产生及放大实验装置

Fig. 1 Experimental setup for chaotic laser generation and amplification

2.2 分析方法

采用自相关函数对混沌激光的随机特性进行实时监测,并采用排列熵、偏度和峰度来定量衡量混沌激光随机特性的强弱。

自相关函数反映了同一序列间数据在不同时刻下的相关程度^[17]。在时间序列分析中,自相关函数 $R(\tau)$ 的表达式为

$$R(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt, \quad (1)$$

式中： $\{x(t)\}$ 是时间序列； $E(\cdot)$ 为数学期望函数； τ 是延迟时间； T 是时间序列的长度。混沌信号是一个随机信号，其自相关曲线类似于 delta 函数。自相关曲线的基底越小，表明信号中的周期性分量越少，混沌信号的随机特性越强。但是，自相关函数只能判断混沌信号的随机特性强弱，不能定量衡量。

排列熵是 Bandt 等在 2002 年提出的算法^[8]。在该方法中，首先对一个已知时间序列进行相空间重构操作并得到一个等价的相空间矩阵。然后，将矩阵每一行中的元素按从大到小的顺序进行排序。最后，根据排序后所有元素的顺序依次取出元素在该行中所处的位置序号，进而得到一种序号排列。 d 是相空间重构维数， d 维相空间共有 $d!$ 种序号排列方式。每种序号排列出现概率为 P_1, P_2, \dots, P_k ，按照 Shannon 熵的形式，排列熵的表达式为

$$H_{PE}(d) = \sum_{i=1}^k P_i \ln P_i. \quad (2)$$

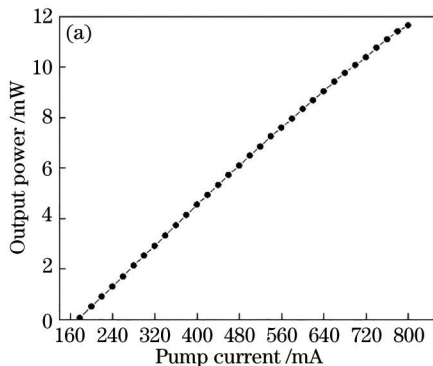
接着，进行归一化处理，即

$$0 \leq H_{PE}(d) / \ln(d!) \leq 1, \quad (3)$$

归一化后的排列熵值越接近于 1，表明混沌信号的随机特性越强。

偏度也称为偏态，是描述分布偏离对称性程度的一个特征数^[18]。当分布左右对称时，偏度为 0。当偏度大于 0 时，即重尾在右侧时，分布为右偏。当偏度系数小于 0 时，即重尾在左侧时，分布为左偏。其表达式为

$$S(x) = E\left[\left(\frac{x_i - \mu}{\sigma}\right)^3\right], \quad (4)$$



式中： $\{x_i\}$ 为样本数列， $i=1, \dots, n$ ； μ 是数学期望； σ 为标准差。

峰度是表征概率密度分布曲线在平均值处峰值高低的特征数^[18]。一般而言，以标准正态分布为参照，峰度可以描述分布形态的陡缓程度，若峰度小于 3，则称分布具有不足的峰度，峰比较平坦。若峰度大于 3，则称分布具有过度的峰度，峰比较陡峭。在计算时，一般会用峰度减去 3，进而将 0 作为参照点。其表达式为

$$K(x) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right]^2} - 3, \quad (5)$$

式中： \bar{x} 是平均值。

混沌时间序列本质上是一个随机序列，其统计分布特性应该与标准正态分布相同。因此，根据混沌时间序列计算出的偏度和峰度应该与标准正态分布的偏度和峰度相近，即混沌时间序列的偏度和峰度越接近于 0，其随机特性越强。

3 实验结果

3.1 混沌源的输出特性

在放大之前，首先对混沌激光光源输出特性进行研究。图 2(a)为混沌激光光源的输出功率-泵浦电流曲线，可以看出，输出功率与泵浦电流间具有良好的线性关系。图 2(b)为在不同泵浦电流下，混沌激光光源的光谱图。混沌激光光源的阈值电流为 178 mA，增大泵浦电流至 340 mA 并调节 PC，可以增强环形腔中的非线性克尔效应使激光进入混沌状态，此时的输出时序如图 3(a)所示。图 3(b)是泵浦电流为 340 mA 时混沌时序的自相关图，可以看出，

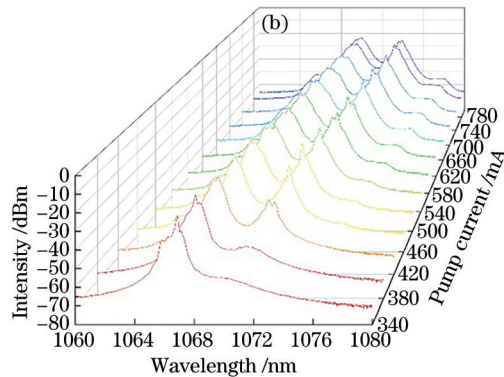


图 2 混沌激光的输出功率-泵浦电流曲线和光谱。(a)输出功率-泵浦电流曲线；(b)光谱

Fig. 2 Output power-pump current curve and spectra of chaotic laser. (a) Output power-pump current curve; (b) spectra

此时自相关曲线具有很好的类 delta 函数特性,表明此时混沌激光的随机特性较强。从图 2(b)中可以看出,此时光谱只有一个峰,且中心波长为 1067 nm。继续增大泵浦电流至 500 mA 时,发现在中心波长为 1072 nm 处出现了第二个峰,出现该现象的原因是:当泵浦电流较高时,在非线性效应的作用下产生了斯托克斯波,形成了混沌激光的双波长输出。此外,

当泵浦电流大于 580 mA 时,中心波长的光吸收了足够的能量,光谱开始向长波长方向展宽。当泵浦电流增至 800 mA 时,混沌激光的时序和自相关曲线如图 3(c)、(d) 所示。与泵浦电流为 340 mA 时混沌激光的时序和自相关曲线对比,可以看出,泵浦电流增加只是增加了时序信号的峰峰值,自相关曲线并没有变化,仍然具有很好的类 delta 函数特性。

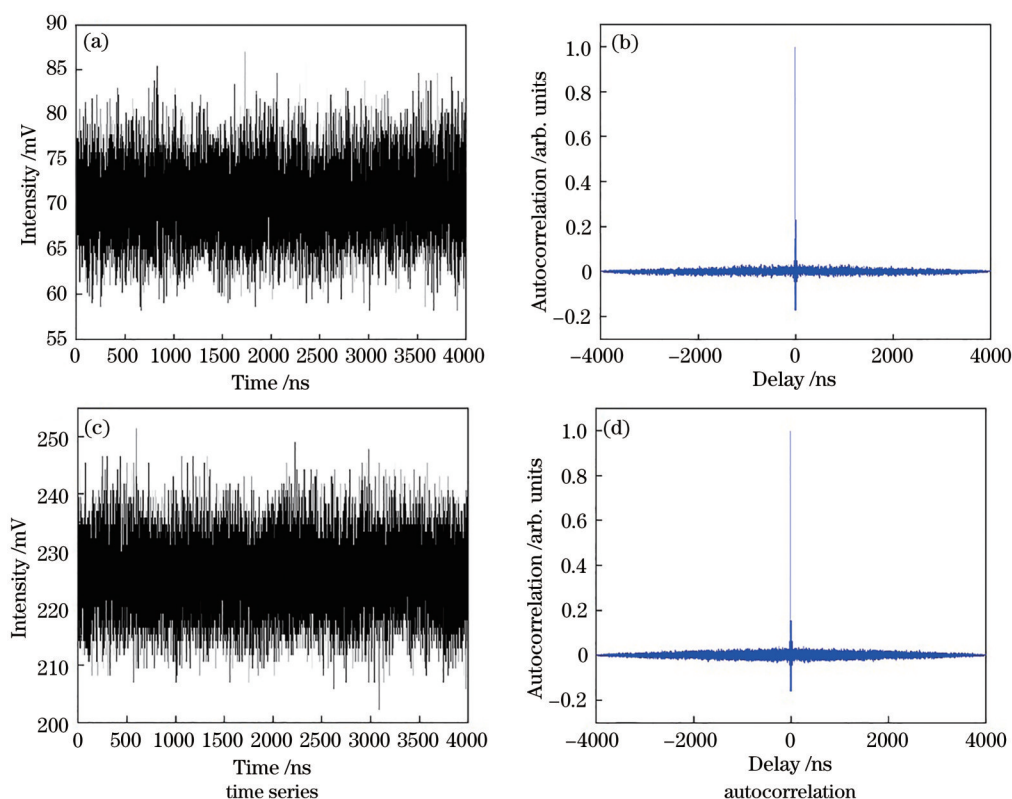


图 3 在不同泵浦电流下,混沌激光的时序和自相关曲线。(a)(b) 340 mA;(c)(d)800 mA

Fig. 3 Time series and autocorrelation curves of chaotic laser at different pump currents. (a) (b) 340 mA; (c) (d) 800 mA

为进一步分析混沌激光光源的随机特性,计算了不同泵浦电流下混沌时序的排列熵,如图 4 所示。

可以看出,在泵浦电流从 340 mA 增加至 800 mA 的过程中,混沌激光的排列熵值分布在 0.965 附近,波动范围不超过 1%。结合混沌时序、自相关和光谱图可以发现:在混沌源泵浦电流增加过程中,混沌时序只是峰峰值有所增加;自相关曲线均具有很好的类 delta 函数特性;虽然光谱从单峰变成了双峰,但是从排列熵来看,混沌激光光源的随机特性很好并且非常稳定。

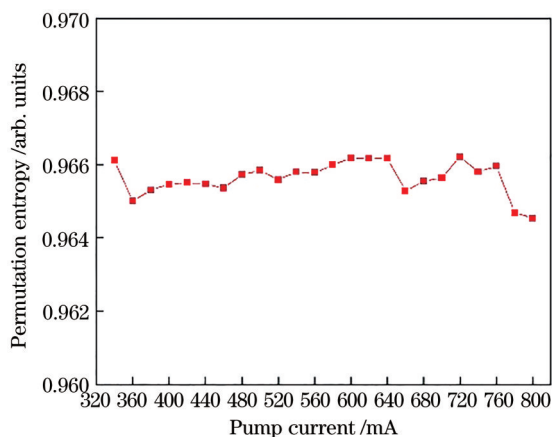


图 4 混沌激光的排列熵

Fig. 4 Permutation entropies of chaotic laser

3.2 混沌放大的输出特性

根据混沌源输出的功率、光谱、时序和排列熵分析结果,将混沌源泵浦电流为 400、500、600、700、800 mA 时的混沌激光作为信号源分别进行放大,并研究放大过程中混沌激光随机特性的变化。从图 5(a)所示的放大过程的输出功率-泵浦电流曲线,可以看出,放大过程中获得的最大输出功率为

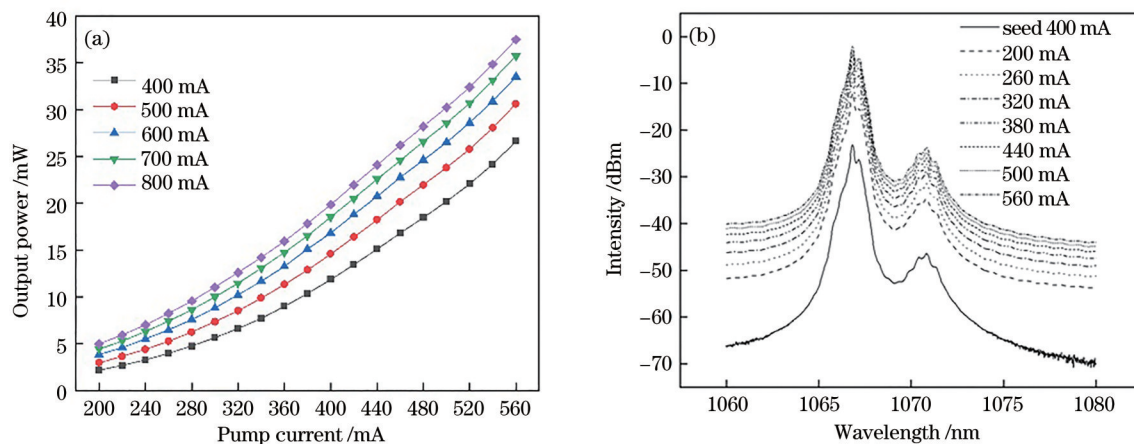


图 5 放大过程中的输出功率-泵浦电流曲线和光谱。(a)不同混沌激光泵浦电流在放大过程中的输出功率-泵浦电流曲线；(b)当混沌激光泵浦电流 400 mA 时,放大过程中的光谱

Fig. 5 Output power-pump current curves and spectra during amplification process. (a) Output power-pump current curves of different pump currents of chaotic laser during amplification process; (b) spectra during amplification process when pump current of chaotic laser is 400 mA

37.47 mW。图 5(b)为混沌源泵浦电流为 400 mA 时,放大过程中的光谱图。可以发现,随着光纤放大器泵浦电流的增加,光谱峰值增加,中心波长和光谱宽度没有变化。

为了衡量混沌激光在放大过程中的随机特性变化,首先采用排列熵来定量分析,如图 6 所示。可以发现,随着光纤放大器泵浦电流的增加,排列熵先是迅速下降然后趋于一个稳定值,出现该现象的原因是:虽然放大自发辐射噪声的功率随着光纤放大器泵浦电流的增加而增加,但是它在总功率中的占比在下降且下降趋势是逐渐减缓的^[19]。放大自发辐射噪声的存在,使得放大过程中的排列熵始终大于混沌源的排列熵,这表明放大能够在一定程度上增强混沌激光的随机特性。

从图 6 中还可以看出,光纤放大器泵浦电流从 400 mA 增加到 560 mA 的过程中排列熵变化相对较小,从排列熵的角度无法比较混沌信号的随机特性,故采用偏度和峰度来进一步衡量混沌信号的随机特性。由于混沌信号本质上是一个随机信号,它在时域上的频数统计分布应符合标准的正态分布,而标准正态分布的偏度和峰度值均为 0,因此混沌信号的偏度和峰度越趋向于 0 说明随机特性越强。当光纤放大器泵浦电流从 400 mA 增加到 560 mA 时,混沌信号的偏度和峰度分别如图 7(a)、(b)所示。可以看出,偏度和峰度都呈现一个倒“U”型,均是先迅速上升然后迅速下降,这表明在该光纤放大器泵浦电流区间内混沌信号的随机特性先是迅速减弱然后迅速

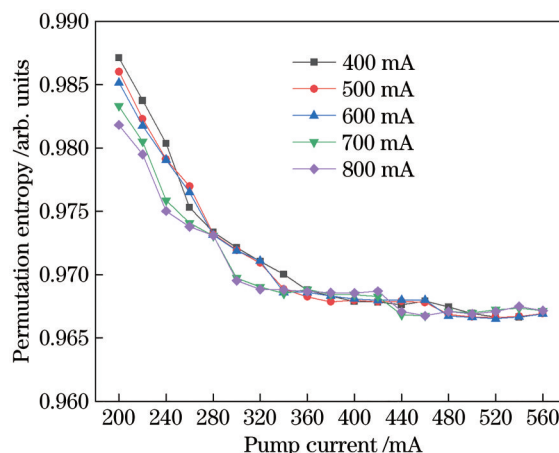


图 6 不同混沌激光泵浦电流在放大过程中的排列熵
Fig. 6 Permutation entropies of different pump currents of chaotic laser during amplification process

增强。此外,当光纤放大器泵浦电流的范围为 440~480 mA 时,混沌信号的偏度和峰度都达到了最大值。然而,偏度和峰度越大表明混沌信号的频数统计分布越不符合标准正态分布,故在该电流区间内放大后的混沌信号的随机特性较弱。

4 结 论

采用掺铒光纤放大器对混沌激光进行放大,研究了放大过程中混沌激光的随机特性变化。在泵浦电流从 340 mA 增加至 800 mA 的过程中,混沌源的排列熵值在 0.965 附近,波动范围不超过 1%,这表明混沌源的随机特性较稳定。此外,虽然放大过程中的排列熵先是迅速下降然后趋于一个稳定值,但是其均大于

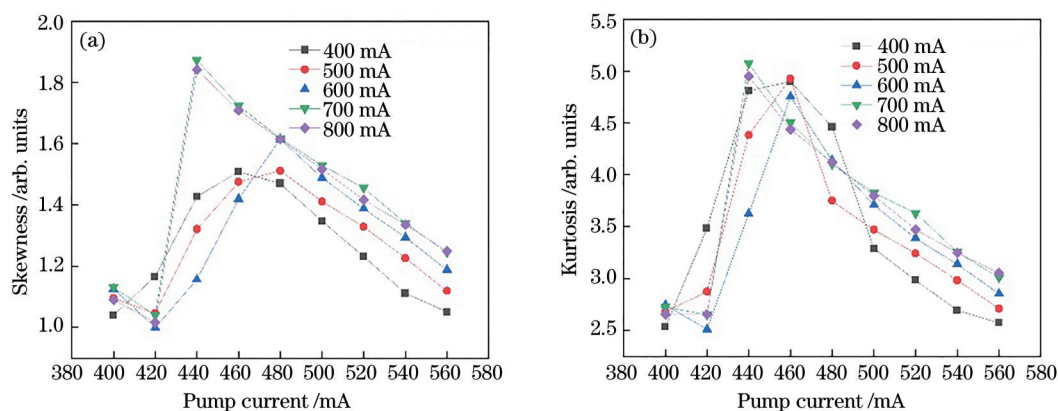


图7 不同混沌激光泵浦电流在放大过程中的偏度和峰度。(a)偏度;(b)峰度

Fig. 7 Skewnesses and kurtoses of different pump currents of chaotic laser during amplification process. (a) Skewness; (b) kurtosis

混沌源的排列熵,这表明放大能够增强混沌激光的随机特性。在排列熵相近时,采用偏度和峰度进一步分析。可以发现,当光纤放大器范围为440~480 mA时,混沌信号的随机特性较差。本文对混沌激光放大过程中的随机特性进行了初步研究,研究结果对混沌激光传感和成像具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Illig D W, Rumbaugh L K, Banavar M K, et al. Backscatter suppression via blind signal separation for a 532 nm underwater chaotic lidar rangefinder [C]//OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington, October 19-22, 2015, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [2] Song Y M, Xia L, Wu Y. The interrogation of quasi-distributed optical FBG sensing system through adopting a wavelength-tunable fiber chaotic laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2435-2442.
- [3] Ke J X, Yi L L, Xia G Q, et al. Chaotic optical communications over 100-km fiber transmission at 30-Gb/s bit rate[J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1323-1326.
- [4] Henon M, Heiles C. The applicability of the third integral of motion: some numerical experiments[J]. The Astronomical Journal, 1964, 69: 73-79.
- [5] Lempel A, Ziv J. On the complexity of finite sequences[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1976, 22(1): 75-81.
- [6] Pincus S M. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1991, 88(6): 2297-2301.
- [7] Richman J S, Moorman J R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy [J]. American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, 2000, 278(6): H2039-H2049.
- [8] Bandt C, Pompe B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series[J]. Physical Review Letters, 2002, 88(17): 174102.
- [9] Kane D M, Toomey J P, Lee M W, et al. Correlation dimension signature of wideband chaos synchronization of semiconductor lasers[J]. Optics Letters, 2006, 31(1): 20-22.
- [10] Chen X, Jin N D, Zhao A, et al. The experimental signals analysis for bubbly oil-in-water flow using multi-scale weighted-permutation entropy[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2015, 417: 230-244.
- [11] Quintero-Quiroz C, Pigolotti S, Torrent M C, et al. Numerical and experimental study of the effects of noise on the permutation entropy[J]. New Journal of Physics, 2015, 17(9): 093002.
- [12] Traversaro F, Redelico F O. Confidence intervals and hypothesis testing for the permutation entropy with an application to epilepsy[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2018, 57: 388-401.
- [13] Traversaro F, Legnani W, Redelico F O. Influence of the signal to noise ratio for the estimation of permutation entropy[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 553: 124134.
- [14] Breault R W, Casleton E M, Guenther C P. Chaotic and statistical tests on fiber optic dynamic data taken from the riser section of a circulating fluidized bed[J]. Powder Technology, 2012, 220: 151-163.
- [15] Jalili S, Daneshmehr A R. Statistical analysis of

- nonlinear response of rectangular cracked plate subjected to chaotic interrogation[J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2018, 10(3): 1850033.
- [16] Megalingam M, Sangem A, Sarma B. Experimental observation of intermittent route to chaos in magnetized filamentary discharge plasma due to the cylindrical plasma bubble[J]. *Contributions to Plasma Physics*, 2020, 60(4): e201900189.
- [17] Porte X, D'Huys O, Jüngling T, et al. Autocorrelation properties of chaotic delay dynamical systems: a study on semiconductor lasers[J]. *Physical Review E*, 2014, 90(5): 052911.
- [18] Annenkov S Y, Shrira V I. Large-time evolution of statistical moments of wind-wave fields[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 726: 517-546.
- [19] Luo Y, Wang X L, Zhang H W, et al. Amplified spontaneous emission characteristics and locations of high temperature vulnerable point in fiber amplifiers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(23): 234206.
罗亿, 王小林, 张汉伟, 等. 光纤放大器放大自发辐射特性与高温易损点位置[J]. *物理学报*, 2017, 66(23): 234206.