

# 双延时反馈光电振荡系统产生混沌激光的动力学特性

潘明<sup>1,2</sup>, 孟义朝<sup>1,2</sup>, 陈振炜<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海大学光纤研究所, 上海 201800;

<sup>2</sup>上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

**摘要** 在光电振荡器(OEO)混沌系统的基础上,将混沌激光输出重新反馈到马赫-曾德尔调制器(MZM),使原系统的增益系数发生动态变化,同时在系统中引入第二个时间延迟。从理论上研究了改进后混沌系统的反馈时间和反馈强度对系统复杂性和延时特征的影响。仿真结果表明:光反馈 OEO 输出的混沌激光更复杂,延时特征更低。当光反馈的延时时间与光电反馈的延时时间相同时,光反馈 OEO 系统表现出较好的混沌动力学特性。该方法在不过多增加系统成本的前提下,可产生更复杂的混沌信号,同时可以降低信号延时特征,有利于提高通信系统的安全性。

**关键词** 非线性光学;混沌产生;光电振荡器;光电反馈;光反馈;双延时

中图分类号 TN242; TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0606002

## Dynamic Characteristics of Optoelectronic Oscillation System with Double Delay Feedback for Generating Laser Chaos

Pan Ming<sup>1,2</sup>, Meng Yichao<sup>1,2</sup>, Chen Zhenwei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Fiber Optics, Shanghai University, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

**Abstract** On the basis of typical optoelectronic oscillator (OEO) chaotic system, the output of chaotic laser is fed back to the Mach-Zehnder modulator (MZM), so that the gain coefficients of the original system can change dynamically and a second time delay is introduced into the system. Then we study the effects of the feedback time and the feedback intensity of the improved chaotic system on the time-delay characteristics and complexity of the system theoretically. The simulation results show that the chaotic laser generated by the optoelectronic oscillator with optical feedback has higher complexity and lower delay characteristics. The system exhibits the better chaotic dynamic characteristics when the delay time of the optical feedback is the same as the delay time of the photoelectric delay. The results show that this method can produce more complex chaotic signals and reduce the delay characteristics of signals without increasing the system costs, and it is helpful to improve the security of the system.

**Key words** nonlinear optics; chaos generation; optoelectronic oscillator; optoelectronic feedback; optical feedback; double delay

**OCIS codes** 140.1540; 070.4340

## 1 引 言

混沌信号具有不可长期预测性和类噪声特性,在保密通信<sup>[1-2]</sup>、激光雷达<sup>[3-4]</sup>、激光测距<sup>[5]</sup>和快速随机数发生器<sup>[6-7]</sup>等领域有广泛的应用。激光混沌因其具有宽频谱高速率的优点而备受关注。激光混沌

的产生方式主要有光注入、光反馈、光电反馈和基于非线性器件的光电延迟反馈,其中基于非线性器件的光电延时反馈方式具有更高的频谱带宽、更灵活的调节方式,且与现有光通信网络兼容等优点,受到较多关注<sup>[8-9]</sup>。

基于马赫-曾德尔调制器(MZM)的光电振荡器

收稿日期: 2017-11-23; 收到修改稿日期: 2017-12-09

作者简介: 潘明(1991—),男,硕士研究生,主要从事基于光电振荡器的混沌保密通信方面的研究。

E-mail: hello\_pm@163.com

导师简介: 孟义朝(1970—),男,博士,助理研究员,主要从事特种光纤和器件、保密光通信和光纤传感方面的研究。

E-mail: myc@shu.edu.cn(通信联系人)

(OEO)是较常见的混沌激光产生方式。这种 OEO 具有结构简单、频谱平坦和带宽较宽等优点,因此相关研究较多。Callan 等<sup>[10]</sup>指出,OEO 产生的宽带混沌信号可用于分布式传感网络和基于混沌的测距设备;Vicente 等<sup>[11]</sup>研究发现,OEO 混沌激光的复杂度随着增益系数的增加而增加。随着相关研究的不断深入和计算机技术的高速发展,这种基础的基于 OEO 产生的混沌激光复杂度已不足以对抗某些针对该系统的破解方法。比如窃听者可通过时间序列分析提取混沌时延特性,重构 OEO 系统<sup>[12-13]</sup>,威胁混沌激光保密通信安全。因此,针对基础的 OEO 混沌发生系统,人们提出了许多改进方案以提高混沌激光复杂度,从而提高混沌激光保密通信的安全性。如将两个 OEO 级联在一起,将第一级 OEO 产生的混沌激光代替原本恒定功率的激光注入第二级 OEO 的 MZM 中,使第二级 OEO 产生的混沌激光参数发生动态变化<sup>[14]</sup>。但这种方法额外引入了另一整套振荡器结构,结构复杂,限制条件较多,难以推广应用。

利用掺铒光纤放大器(EDFA)将输出激光重新注入 MZM,产生具有动态变化参数的混沌激光信号,在不过多增加器件的前提下实现了 OEO 参数的动态变化,且引入了额外的时间延迟,使系统可以实现更高的混沌复杂度,这在一定程度上掩盖了混沌信号的时间延时特性,提高了系统的实用性。

## 2 理论模型

混沌系统方案如图 1 所示,图中:LD 为连续光激光器;PD 为光电探测器,有一定的放大作用;射频(RF)驱动器用以驱动 MZM 调制器;OC<sub>1</sub> 和 OC<sub>2</sub> 为 3 dB 耦合器,MZM 的输出由 OC<sub>2</sub> 分为两路光,一路经由 PD 和 RF 驱动器对 MZM 进行光电反馈,一路经由 EDFA 对 MZM 进行光反馈,从而使 MZM 产生混沌激光输出,输出功率为  $P_{out}$ 。

该系统的非线性器件 MZM 的输出特性为<sup>[15]</sup>

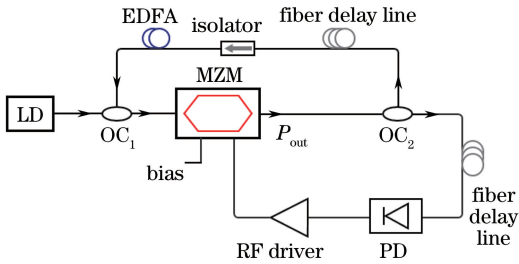


图 1 双反馈 OEO 混沌系统示意图

Fig. 1 Block diagram of the OEO chaotic system with double feedback

$$P_{out} = P_{in} \cos^2 \left[ \frac{\pi V(t)}{2V_{\pi RF}} + \frac{\pi V_B}{2V_{\pi DC}} \right], \quad (1)$$

式中: $P_{in}$ 为输入光功率; $V(t)$ 为加载在 MZM 上的调制电压; $V_B$ 为偏置电压; $V_{\pi RF}$ 为 RF 半波电压; $V_{\pi DC}$ 为偏置半波电压。

原 OEO 系统方程为

$$\left( 1 + \frac{f_L}{f_H} \right) V(t) + \frac{1}{2\pi f_H} \frac{d}{dt} V(t) + 2\pi f_L \int_{t_0}^t V(t) dt = P g G A \frac{\pi}{2V_{\pi RF}} \cos^2 \left[ \frac{\pi V(t - T_1)}{2V_{\pi RF}} + \frac{\pi V_B}{2V_{\pi DC}} \right], \quad (2)$$

式中: $T_1$ 为系统本身的光电反馈延时时间; $f_H$ 和  $f_L$ 分别为带通滤波器的高低截止频率; $A$ 为整个系统光电反馈通路的衰减; $g$ 为光电探测器的增益; $G$ 为 RF 驱动器的增益; $P$ 为连续光激光器的静态功率。令

$$x(t) = \frac{\pi V(t)}{2V_{\pi RF}}, \text{高通截止时间 } t_H = \frac{1}{2\pi f_H}, \text{低通截止时} \\ \text{间 } t_L = \frac{1}{2\pi f_L}, \text{MZM 的偏置相位 } \phi = \frac{\pi V_B}{2V_{\pi DC}}, \text{对(2)式进} \\ \text{行归一化处理,并忽略较小的项,可得 Ikeda 方程}^{[15]}:$$

$$x(t) + t_H \frac{d}{dt} x(t) + \frac{1}{t_L} \int_{t_0}^t x(t) dt = \beta_1 \cos^2 [x(t - T_1) + \phi], \quad (3)$$

式中: $x(t)$ 为 OEO 输出的混沌时间序列; $\beta_1$ 为光电反馈的增益强度, $\beta_1 = P g G A \frac{\pi}{2V_{\pi RF}}$ 。因为延迟时间的引入,基于该方程的系统产生的混沌具有极高的吸引子维度,其 Lyapunov 维数在一定条件下可达 1000 以上<sup>[16]</sup>。

由(3)式可知,OEO 的混沌输出为

$$C_1(t) = P \cos^2 [x(t) + \phi]. \quad (4)$$

原光电振荡器输出端的混沌光输出经过 3 dB 耦合器等分成两束光,其中一束光通过 EDFA 放大后,与连续激光器发出的静态固定功率激光耦合,再次进入 MZM 进行非线性调制,产生混沌激光。设光路反馈的延迟时间为  $T_2$ ,EDFA 放大倍数为  $A_1$ ,改进后的系统方程为

$$\left( 1 + \frac{f_L}{f_H} \right) V(t) + \frac{1}{2\pi f_H} \frac{d}{dt} V(t) + 2\pi f_L \int_{t_0}^t V(t) dt = [P + A_1 C_1(t - T_2)] g G A \frac{\pi}{2V_{\pi RF}} \times \cos^2 \left[ \frac{\pi V(t - T_1)}{2V_{\pi RF}} + \frac{\pi V_B}{2V_{\pi DC}} \right]. \quad (5)$$

由(4)式和(5)式可得

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{f_L}{f_H}\right) V(t) + \frac{1}{2\pi f_H} \frac{d}{dt} V(t) + 2\pi f_L \int_{t_0}^t V(t) dt = \\ & P_g G A \frac{\pi}{2V_{\pi RF}} \cos^2 \left[ \frac{\pi V(t - T_1)}{2V_{\pi RF}} + \frac{\pi V_B}{2V_{\pi DC}} \right] + \\ & P_g G A \frac{\pi}{2V_{\pi RF}} \cos^2 \left[ \frac{\pi V(t - T_2)}{2V_{\pi RF}} + \frac{\pi V_B}{2V_{\pi DC}} \right] \times \\ & g G A A_1 \frac{\pi}{2V_{\pi RF}} \cos^2 \left[ \frac{\pi V(t - T_1)}{2V_{\pi RF}} + \frac{\pi V_B}{2V_{\pi DC}} \right]. \quad (6) \end{aligned}$$

令  $\beta_2 = g G A A_1 \frac{\pi}{2V_{\pi RF}}$ , 为光路反馈的增益强度, 经推

导可得该双延时系统的迟滞微分方程为

$$\begin{aligned} x(t) + t_H \frac{d}{dt} x(t) + \frac{1}{t_L} \int_{t_0}^t x(t) dt = \\ \beta_1 \cos^2 [x(t - T_1) + \phi] \times \\ \{1 + \beta_2 \cos^2 [x(t - T_2) + \phi]\}. \quad (7) \end{aligned}$$

为便于数值仿真, 令  $y(t) = \int x(s) ds$ , 改进后 OEO 输出特性微分方程组为

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = -\frac{1}{t_H} \left\{ x(t) + \frac{1}{t_L} y(t) - \beta_1 \cos^2 [x(t - T_1) + \phi] \{1 + \beta_2 \cos^2 [x(t - T_2) + \phi]\} \right\} \\ \frac{dy(t)}{dt} = x(t) \end{cases}. \quad (8)$$

使用自相关函数分析双延时混沌系统的延时特性<sup>[12]</sup>, 自相关函数定义为

$$\Gamma(\tau) = \frac{\langle [x(t) - \langle x(t) \rangle][x(t + \tau) - \langle x(t) \rangle] \rangle}{\langle x(t) - \langle x(t) \rangle \rangle^2}, \quad (9)$$

式中:  $\tau$  为延迟时间;  $\langle \cdot \rangle$  表示对时间求平均。为进一步表示改进的双延迟 OEO 混沌信号的不可预测性, 采用排列熵对混沌信号进行量化处理<sup>[17]</sup>。

排列熵算法为: 对于一组长度为  $T$  的时间序列, 首先进行相空间重构, 其中嵌入维度  $d > 1$ , 嵌入延迟为  $\tau_e$ , 重构后的矩阵中第  $t$  列 ( $t = 1, 2, \dots, T$ ) 元素为  $X_t = \{x_c, x(t + \tau_e), \dots, x[t + (d - 1)\tau_e]\}$ , 随后对每列元素按顺序重新排列, 其中  $x_c$  为第  $t$  列的首元素。如果序列有  $d$  个符号 ( $1, 2, \dots, d$ ), 则总共有  $d!$  种排列方式, 设  $\pi$  代表其中一种排列方式。统计相重构空间后的序列中每种排列方式出现的次数  $c$ 。对  $d!$  种排列方式, 概率分布为  $P = \{p(\pi)\}$ , 其中

$$p(\pi) = \frac{c}{T - d + 1}, t \leq T - d + 1. \quad (10)$$

排列熵定义为  $H[p] = -\sum p(\pi) \lg p(\pi)$ , 为使最后结果具有可比性, 通常将其归一化, 当  $0 \leq H_s \leq 1$  时  $H_s[p] = H[p]/H_{\max}$ 。其中,  $H_{\max} = H[P_s] = \lg(d!)$ ,  $H_s$  为归一化后的排列熵,  $P_s$  为所有元素等概率出现的均匀分布。  $H_s$  越大, 表明原时间序列的随机性越强, 被预测的可能性越低<sup>[18-19]</sup>。

排列熵的参数设置为: 嵌入维度  $d = 6$ , 嵌入延迟  $\tau_e = 1$ 。选取混沌输出 [100 ns, 150 ns] 的时间序

列进行计算。

### 3 数值分析

#### 3.1 时域分析

采用龙格-库塔法对 (8) 式进行数值求解, 讨论系统中两个延时时间和增益系数对系统产生的混沌信号动力学特性的影响。对于通信系统, 不可预测度越高, 说明传输载波信号的安全性越强, 窃听者准确获得有效信息越困难。因此, 增强混沌载波信号的不可预测度, 可以提高信息传输的安全性。

仿真时取  $\beta_1 = 2, \beta_2 = 1, \phi = -3\pi/8, t_H = 10.6 \text{ ps}, t_L = 5.3 \mu\text{s}$ 。其中, 参数  $\phi$  对系统的延时特征有一定影响<sup>[20]</sup>。为体现本系统抑制延时特征的有效性, 选取文献 [20] 中延时特性较差时的  $\phi$  值, 通过本系统的改进, 使原本较明显的延时特征得到进一步抑制。参数  $t_H$  和  $t_L$  对混沌信号的频率略有影响, 但与增益系数和延时时间相比影响很小。并且  $t_H$  和  $t_L$  值主要由器件出厂值决定, 在系统中通常不会发生变动<sup>[14]</sup>。因此笔者主要对系统的增益系数和延时时间进行仿真研究。分别仿真 1 ns 到 10 ns 的延时时间  $T_1$  和  $T_2$ 。图 2 和图 3 分别为单一延时混沌系统和双延时混沌系统时域上的对比。从图中可以看出, 该系统时域输出序列的变化更剧烈。为观察混沌系统的整体动力学特性, 展示了两个系统的混沌分叉图 (图 4), 原 OEO 在增益  $\beta > 2.3$  时进入混沌状态; 而新混沌系统在  $\beta_1 > 1$  时进入混沌状态。说明改进后的新系统可在更广的参数范围进入混沌, 参数调节范围更大, 实用性更高。

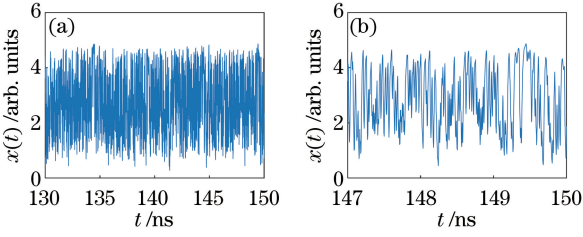


图 2 (a)单反馈混沌系统时域图;(b)放大图  
Fig. 2 (a) Time-domain diagram of the OEO chaotic system with single feedback; (b) detail for Fig. 2(a)

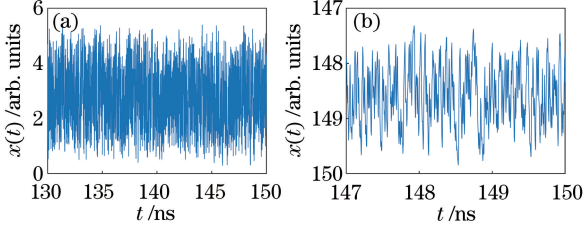


图 3 (a)双反馈混沌系统时域图;(b)放大图  
Fig. 3 Time-domain diagram of the OEO chaotic system with double feedback; (b) detail for Fig. 3(a)

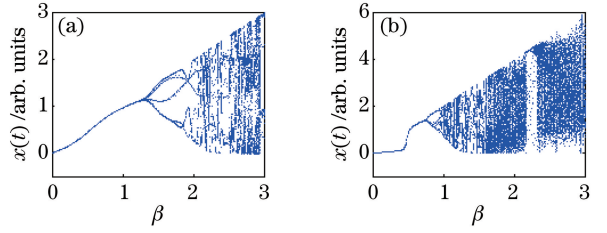


图 4 (a)单反馈混沌系统分叉图;(b)双反馈混沌系统分叉图  
Fig. 4 Chaotic bifurcation diagrams of (a) single feedback OEO chaotic system and (b) double feedback OEO chaotic system

### 3.2 频谱和时延信息分析

图 5 分别对比了不同延时状态下光路反馈混沌激光系统的功率谱和自相关函数的变化趋势。选取光电延时反馈的延时时间  $T_1=5$  ns, 光路反馈延时时间  $T_2$  自上至下依次为 1, 3, 5, 7, 9 ns。从图 5(a)可见, 当光路反馈的延迟时间和光电反馈延迟时间均为 5 ns 时, 系统混沌输出功率谱明显较其他延时时间组合的振荡幅度更小( $T_1$  为其他值时, 该规律依然存在), 表明  $T_1 = T_2$  时混沌信号频谱更平坦, 随机性更高。

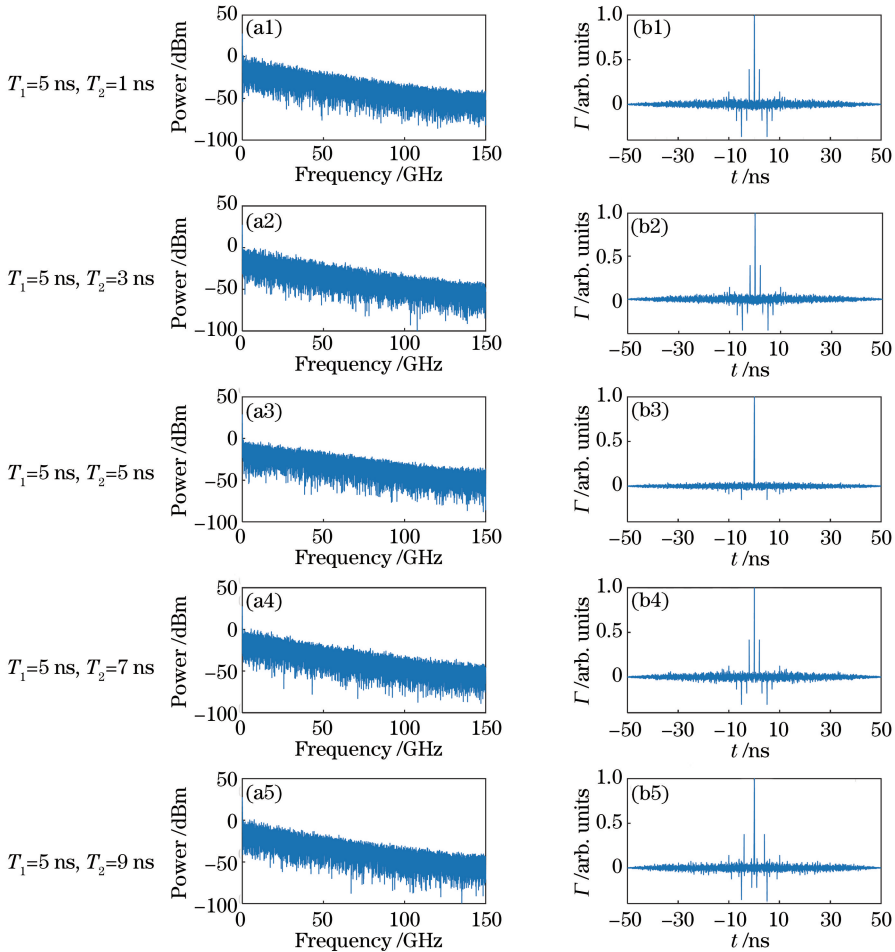


图 5 不同  $T_1$  和  $T_2$  组合下功率谱和自相关函数变化。(a)功率谱;(b)自相关函数  
Fig. 5 Variation of power spectrum and autocorrelagram under different combinations of delay time  $T_1$  and  $T_2$ . (a) Power spectrum; (b) autocorrelagram



由图 5(b)可知,当  $T_1 = T_2$  时,自相关函数的特征峰受到一定程度抑制。因此,该结构的混沌激光系统使混沌信号的频谱更平坦,两个延时时间相同时,可以兼顾抑制延时信息。

图 6 为本系统、原 OEO 系统和动态参数振荡器系统产生混沌信号时延特征随增益系数的演化情况。由图 6 可以看出,原 OEO 混沌信号的时延特征在  $\beta = 12$  时淹没于自相关的背景噪声中;本系统混沌信号的时延特征在  $\beta = 8$  时即淹没于自相关的背景噪声中;动态参数振荡器的时延特征在  $\beta = 12$  时淹没于自相关背景噪声中。可以看出,双延时系统的时延特征隐藏效果优于原 OEO 和动态参数振荡器。

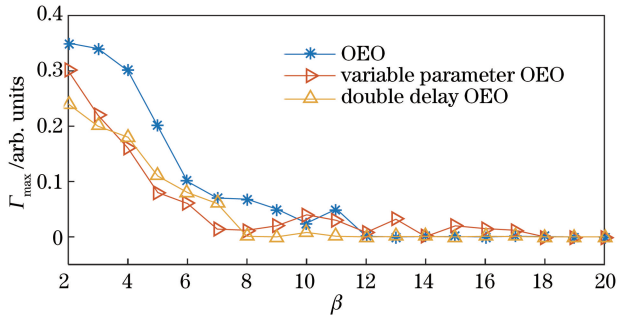


图 6 原 OEO、双延时 OEO 和动态参数 OEO 的时延特征随增益系数的演化

Fig. 6 Evolution of time-delay signature of the original OEO, double delay OEO and variable parameter OEO with the gain

### 3.3 混沌复杂度分析

设原 OEO 和动态参数振荡器的参数  $\beta = 3$ , 当  $\phi = -3\pi/8$  时,  $T_1$  从 1 ns 到 15 ns 变化(当延时大于 15 ns 时,系统进入混沌之前的暂稳态时间较长,对后期计算有较大影响);改进系统的参数设为  $\beta_1 = 3, \beta_2 = 1$  (为保证两系统的参数尽量一致,光路反馈暂不放大),当  $\phi = -3\pi/8$ , 令  $T_1 = T_2$ , 均从 1 ns 增至 15 ns。分别计算三种系统的排列熵。从图 7 可以看出,改进混沌系统产生的混沌信号的排列熵明显高于原 OEO 和动态参数振荡器。

双延时混沌激光系统的排列熵在不同延时时间组合下的演化如图 8 所示,系统参数设为  $\beta_1 = 3, \beta_2 = 1$ , 当  $\phi = -3\pi/8$ ,  $T_1$  和  $T_2$  分别从 1 ns 增至 10 ns, 计算  $T_1$  和  $T_2$  每种组合的排列熵。从图 8 明显可见,当  $T_1 \neq T_2$  时,排列熵在 0.6 上下波动。当  $T_1 = T_2$  时,排列熵在 0.75 上下波动。此时,混沌系统输出信号的排列熵与其他组合相比,存在明显峰值。所以,该结构的混沌激光系统选用两个延

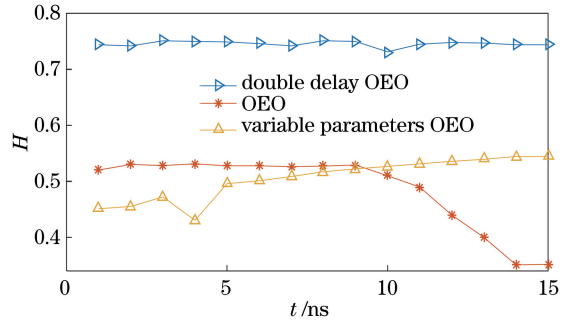


图 7 原 OEO、双延时 OEO 和动态参数 OEO 的排列熵对比  
Fig. 7 Comparison of permutation entropy of the original OEO, double delay OEO and variable parameters OEO  
时相等或尽量接近的参数配置为佳。这是因为当  $T_1 = T_2$  时,系统的迟滞微分方程可简化成

$$x(t) + t_H \frac{d}{dt}x(t) + \frac{1}{t_1} \int_{t_0}^t x(t) dt = \beta_1 \cos^2[x(t - T_1) + \phi] + \beta_1 \beta_2 \cos^4[x(t - T_1) + \phi] \quad (11)$$

此时方程右边的第二项以余弦的四次方出现,其峰值仍为 1,对系统的扰动更加明显,而当  $T_1$  与  $T_2$  不同时,两个延时时间不同的余弦平方项相乘,峰值小于 1,对系统的扰动程度较小,则系统的混沌复杂度降低。所以,此系统两个延时时间的最佳参数应相等或尽量接近。

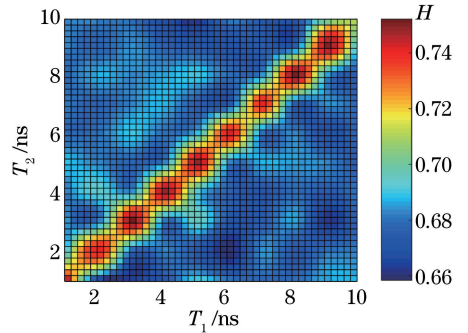


图 8 双延时混沌激光系统的排列熵在不同组合延时时间下的演化

Fig. 8 Evolution of the permutation entropy of the double-delay chaotic laser system with different combinations of two delay time

图 9 为改进的混沌系统产生混沌信号的排列熵随两个不同增益组合的演化,随着两个增益的提高,排列熵明显升高,当排列熵高于 0.9,排列熵提升不明显。这是因为当光电延时反馈的增益  $\beta_1$  增加时,  $x(t)$  幅度增大, MZM 的调制函数覆盖的非线性工作区间更广,工作状态更复杂,系统混沌输出的复杂度提高。但是,由于 MZM 调制函数为周期函数,增

益不断增加,  $x(t)$  幅度大幅增加, 超过了 MZM 的调制能力, 系统输出混沌的复杂度不会无限提升。从图 9 可以看出, 两个增益系数都大于 5 时, 本系统混沌信号的排列熵已达到上限, 此时本系统的混沌复杂度达到最佳状态。

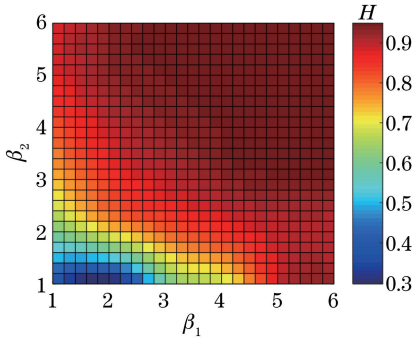


图 9 双延时混沌激光系统的排列熵在两个增益不同组合下的演化

Fig. 9 Evolution of the entropy of the double-delay chaotic laser system with different combinations of two gains

### 3.4 系统参数对比

表 1 对比了原 OEO<sup>[20]</sup>、动态参数振荡器<sup>[14]</sup>和改进的双延时振荡器的参数指标。原 OEO 的时延特征在  $\beta > 12$  时完全淹没于自相关的背景噪声中, 双延时振荡器的时延特征在  $\beta > 8$  时即得到较好的掩盖。原 OEO 在  $\beta > 2.2$  时进入混沌状态, 双延时振荡器在  $\beta > 1$  即可进入混沌状态。原 OEO 的排列熵为 0.35~0.55, 双延时振荡器的排列熵为 0.70~0.75。动态参数振荡器的时延特征与原 OEO 近似; 其进入混沌的参数范围比双延时振荡器更大, 排列熵明显更低。从表 1 可见, 双延时振荡器的时延特征在更低增益系数下即可淹没在自相关的背景噪声中; 在较低增益系数条件下即可进入混沌状态; 动态参数振荡器的排列熵更高。

表 1 系统参数对比

Table 1 Comparison of system parameters

Parameter	OEO	Variable parameter	Double delay
		OEO	OEO
Time-delay signature	$\beta > 12$	$\beta > 12$	$\beta > 8$
Chaos range	$\beta > 2.2$	$\beta > 0$	$\beta > 1$
Entropy	$0.55 > H > 0.35$	$0.55 > H > 0.40$	$0.75 > H > 0.70$

## 4 结 论

将 OEO 的输出通过一条延迟光路反馈到

MZM 中, 使原 OEO 的增益系数发生动态变化, 同时给系统多引入一个时间延时, 使系统输出更复杂的混沌激光信号。改进后系统输出的混沌信号排列熵更高, 当光路延时与光电反馈延时相等时, 系统混沌输出的排列熵出现峰值, 原本明显的时延信息也得到较好掩盖。以上特性有利于构建更高安全性的混沌保密通信系统。而且增加一个光路反馈延时, 原本无法产生混沌的参数区间也进入了混沌, 进入混沌的路径增加, 系统的实用性提高。

### 参 考 文 献

- [1] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8): 821-824.
- [2] Argyris A, Syvridis D, Larger L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fiber-optic links[J]. Nature, 2005, 437(17): 343-346.
- [3] Lin F Y, Liu J M. Chaotic lidar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(5): 991-997.
- [4] Wang W K, Liu L, Zhang J G, et al. Ultra-wideband remote chaotic imaging radar over fiber links[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0114003.  
王文珂, 刘丽, 张建国, 等. 基于光纤链路传输的远程超宽带混沌成像雷达[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0114003.
- [5] Wang Y C, Ma J Y, Han X H, et al. Data acquisition and processing of correlation ranging system with chaotic laser[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(3): 568-573.  
王云才, 马建议, 韩晓红, 等. 混沌激光相关法测距系统的信号采集与处理[J]. 应用光学, 2011, 32(3): 568-573.
- [6] Uchida A, Anano K, Inoue M, et al. Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers[J]. Nature Photonics, 2008, 2(12): 728-732.
- [7] Li P, Wang Y C. Research progress in physical random number generator based on laser chaos for high-speed secure communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(6): 060002.  
李璞, 王云才. 面向高速保密通信的激光混沌物理随机数发生器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 060002.
- [8] Suarez-Vargas J J, Marquez B A, Gonzalez J A. Highly-complex optical signal generation using electro-optical systems with non-linear, non-invertible transmission functions[J]. Applied Physics

- Letters, 2012, 101(7): 821.
- [9] Zou G J, Zhang B F, Li C X, *et al.* Chaotic photonic compressed sampling based on optoelectronic oscillator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1106002.  
邹广健, 张宝富, 李诚鑫, 等. 光电振荡器的混沌光子压缩采样方法[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106002.
- [10] Callan K E, Illing L, Gao Z, *et al.* Broadband chaos generated by an optoelectronic oscillator[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(11): 113901.
- [11] Vicente R, Danden 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 Electron, 2005, 41(4): 541-548.
- [12] Udaltsov V S, Goedgebuer J P, Larger L, *et al.* Cracking chaos-based encryption system ruled by nonlinear time delay differential equations [J]. Physics Letters A, 2003, 308(1): 54-60.
- [13] Udaltsov V S, Larger L, Goedgebuer J P. Time delay identification in chaotic cryptosystems ruled by delay-differential equations [J]. Journal of Optical Technology C/c of Opticheskii Zhurnal, 2005, 72(5): 373-377.
- [14] Hu H P, Su W, Yu Z L, *et al.* Chaos generation of variable parameters and secure communication based on optoelectronic feedback oscillation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0506006.  
胡汉平, 苏威, 于志良, 等. 基于动态参数的光电延迟振荡系统及其保密通信研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0506006.
- [15] Kouomou C Y, Colet P, Larger L, *et al.* Chaotic breathers in delayed electro-optical systems [J]. Physical Review Letters, 2005, 95(20): 203903.
- [16] Nguimdo R M. Chaos and synchronization in optoelectronic devices with delayed feedback [D]. Palma de Mallorca: Universitat de le Illes Balears, 2011.
- [17] 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, 64(20): 204203.  
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, 64(20): 204203.
- [18] Zhu N, Zhang H, Li H. Ultra-compact stub-type wavelength filter based on hybrid plasmonic waveguide structure improved for fabrication [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(7): 883-888.  
朱凝, 张辉, 李浩. 基于一种易于制作的混合型表面等离子元波导结构的超紧凑截线滤波器[J]. 发光学报, 2014, 35(7): 883-888.
- [19] Liu Q X, Pan W, Zhang L Y, *et al.* Chaotic randomness of mutually coupled vertical-cavity surface-emitting laser by optical injection[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(2): 024209.  
刘庆喜, 潘玮, 张力月, 等. 基于外光注入互耦合垂直腔面发射激光器的混沌随机特性研究[J]. 物理学报, 2015, 64(2): 024209.
- [20] Li K, Wang A B, Zhao T, *et al.* Analysis of delay time signature in broadband chaos generated by an optoelectronic oscillator [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 144207.  
李凯, 王安帮, 赵彤, 等. 光电振荡器产生宽带混沌光的时延特征分析[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 144207.