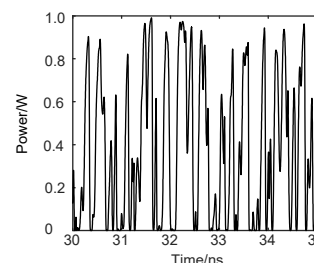




DOI: 10.12086/oe.2021.210146

## 光混沌保密通信系统在 MATLAB 与 OptiSystem 中的协同实现

刘劲杨<sup>1</sup>, 周雪芳<sup>1\*</sup>, 毕美华<sup>1</sup>, 杨国伟<sup>1</sup>, 王天枢<sup>2</sup><sup>1</sup>杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018;<sup>2</sup>长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心,  
吉林 长春 130022

**摘要:** 基于两个具有平行结构的电光时延反馈环, 本文设计了一种电光强度混沌通信系统。通过混沌注入混沌的方式来产生更加复杂的混沌波形, 增强混沌复杂程度以及通信系统的保密性。在本次设计中, 采用 MATLAB 与 OptiSystem 协同的方式来对该系统进行仿真, 解决了 OptiSystem 不能模拟光学反馈环路的问题。由 OptiSystem 中成熟的激光器和二进制序列生成模块为系统提供能量与输入信号, 由 MATLAB 程序实现电光时延反馈环, 并在 OptiSystem 中完成信号在光纤链路中的传输。文章介绍了如何利用 MATLAB 与 OptiSystem 实现混沌系统的协同仿真, 并通过数值模拟表明, 提出的用于模拟光学反馈环路的方法具有可行性, 设计的混沌系统的性能与理论值吻合, 证明了该混沌生成方式的可行性。

**关键词:** 混沌; 混沌加密; 电光时延; MATLAB; OptiSystem**中图分类号:** 436**文献标志码:** A

刘劲杨, 周雪芳, 毕美华, 等. 光混沌保密通信系统在 MATLAB 与 OptiSystem 中的协同实现[J]. 光电工程, 2021, 48(9): 210146  
Liu J Y, Zhou X F, Bi M H, et al. Co-simulation of optical chaotic secure communication systems in MATLAB and OptiSystem[J].  
*Opto-Electron Eng*, 2021, 48(9): 210146

## Co-simulation of optical chaotic secure communication systems in MATLAB and OptiSystem

Liu Jinyang<sup>1</sup>, Zhou Xuefang<sup>1\*</sup>, Bi Meihua<sup>1</sup>, Yang Guowei<sup>1</sup>, Wang Tianshu<sup>2</sup><sup>1</sup>School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;<sup>2</sup>National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract:** An electro-optic intensity chaotic communication system is designed by combining two electro-optic delay feedback loops with parallel structures. By injecting chaos into chaos, a more complex chaotic waveform is generated to enhance the chaotic complexity and the communication system confidentiality. In this design, MATLAB and OptiSystem software are used to simulate the system, which solves the problem that OptiSystem software can't si-

收稿日期: 2021-05-06; 收到修改稿日期: 2021-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61705055); 浙江省重点研发计划资助项目(2019C01G1121168)

作者简介: 刘劲杨(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光混沌保密通信系统的研究。E-mail: 905995272@qq.com

通信作者: 周雪芳(1976-), 女, 博士生导师, 副教授, 主要从事光纤激光器、光纤传感技术和智能天线技术的研究。

E-mail: zhouxf@hdu.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

simulate the optical feedback loop. The mature laser and binary sequence generation modules in OptiSystem software provide energy and input signals for the system. The electro-optic delay feedback loops are realized by the MATLAB program, and the signal transmission in optical fibers is completed in the OptiSystem software. The article introduces how to use MATLAB and OptiSystem software to realize the co-simulation of chaotic systems. Numerical simulations show that the proposed method is feasible to simulate the optical feedback loop, and the simulation results are in good agreement with the theoretical values, which prove that the chaotic signal is generated.

**Keywords:** chaos; chaotic encryption; electro-optic delay; MATLAB; OptiSystem

## 1 引言

随着对通信容量、速度以及保密性等需求的增加, 光纤通信已经成为信息传递的重要方式, 但在传输的过程中, 存在着被非法接收者窃听的风险, 所以对光纤中传输的信号进行加密是十分必要的。混沌保密通信是基于混沌信号的物理层硬件加密, 凭借着混沌信号所具有的非周期、连续宽带频谱、类噪声和不可长期预测等优势<sup>[1]</sup>, 将信息隐藏在混沌信号中传输, 并在接收端通过与发射端同步的混沌波形解调出所传输的信息, 在保密通信领域有着极大的应用前景, 引起国内外研究人员的广泛关注。

1960年 Maiman 发明了激光器, 1963年气象学家 Lorenz 首次提出混沌的概念, 直至 1990年 Pecora 和 Carroll 提出并验证了混沌同步, 从此结束了混沌与激光独立发展的时代, 开启了通信领域的新纪元。

传统的电混沌信号存在带宽窄、信息传输速率低的问题而无法在现代通信的需求<sup>[2]</sup>。1998年, Van Wiggeren 和 Roy 用光纤激光器实验演示了 10 MHz 的背靠背混沌通信系统。2005年, Syvridis 等<sup>[3]</sup>人在 120 km 的商用光纤网络中成功实现了可以单向传输信息的混沌保密通信系统, 混沌光保密通信系统不仅具有实现非线性延迟动力学系统的固有能力和提供高复杂性和无限维混沌动力<sup>[4]</sup>。随后, 各国科学家不断致力于提高混沌通信的传输速率、信号质量以及安全性能<sup>[5]</sup>。2020年, 研究人员成功实现了 10 Gb/s 相位调制信号的传输<sup>[6]</sup>, 传输距离高达 1000 km, 证明了长距离、高速混沌保密通信的可行性, 并采用相位混沌加密的方式进一步提高了信号传输的安全性。这是因为相比于强度混沌, 相位混沌具有恒定的振幅, 进一步提高了混沌的复杂程度, 增加了第三方的破解难度。因此, 寻找复杂度更高的混沌产生方案对混沌保密通信而言意义重大。

混沌信号的产生离不开光学器件的非线性动力学特性, 如半导体激光器、马赫-曾德尔调制器、马赫-

曾德尔干涉仪等。其中较为常见的是利用马赫-曾德尔调制器的电光时延反馈环, 能够提供足够的非线性效应产生混沌信号。针对混沌保密通信中的安全性问题, 本文结合两个具有平行结构的电光时延反馈环, 提出了一种可以产生复杂混沌波形的电光强度混沌系统。该混沌通信系统创新性地借助 MATLAB 与 OptiSystem 协同仿真实现。其中, OptiSystem 软件是加拿大 OptiWave 公司开发的一套光通信系统设计和仿真软件, 但由于 OptiSystem 软件是按单向、顺序流程执行算法和仿真过程<sup>[7]</sup>, 无法支持循环反馈流程, 因而无法独立模拟带有反馈环路的结构。而具有强大数值处理功能的 MATLAB 恰巧可以通过循环和迭代赋值语句来模拟光反馈环路的信号处理过程。利用 MATLAB 辅助 OptiSystem 可以顺利实现电光时延反馈环的模拟, 成功搭建混沌保密通信系统。本文通过仿真验证了该混沌生成方案下延迟混沌动力的同步性, 和同步的鲁棒性, 研究了不同传输距离下发射端与接收端的同步程度, 证明了该混沌生成方案的可行性。

## 2 模型结构

### 2.1 基本原理

具有两个电光时延反馈环的强度混沌装置如图 1 所示。发射端与接收端都由两个电光时延反馈环组成, 下标  $i=1, 2$  代表两个不同的反馈环( $i=1$  对应外反馈环,  $i=2$  对应内反馈环)。马赫-曾德尔调制器 (Mach-Zehnder modulator, MZM<sub>1</sub>) 将  $x_1(t)$  调制到由半导体激光器 (semiconductor laser, SL<sub>1</sub>) 产生的载波上, 它的输出经过 50/50 耦合器 (optical coupler, OC) 分为两部分, 一部分输入信道中, 另一部分注入由  $x_2(t)$  进行调制的 MZM<sub>2</sub> 中。双强度调制后的信号由延迟线 (delay line, DL<sub>2</sub>) 整体延迟  $T_2$  的时间, 然后分为两路各自注入内外反馈环中, 注入内反馈环的信号由光电二极管 (PD) 转化为电波, 并放大为 MZM<sub>2</sub> 的驱动信号, 形成反馈回路。另一路信号输入延迟时间为  $T_1$  的光纤

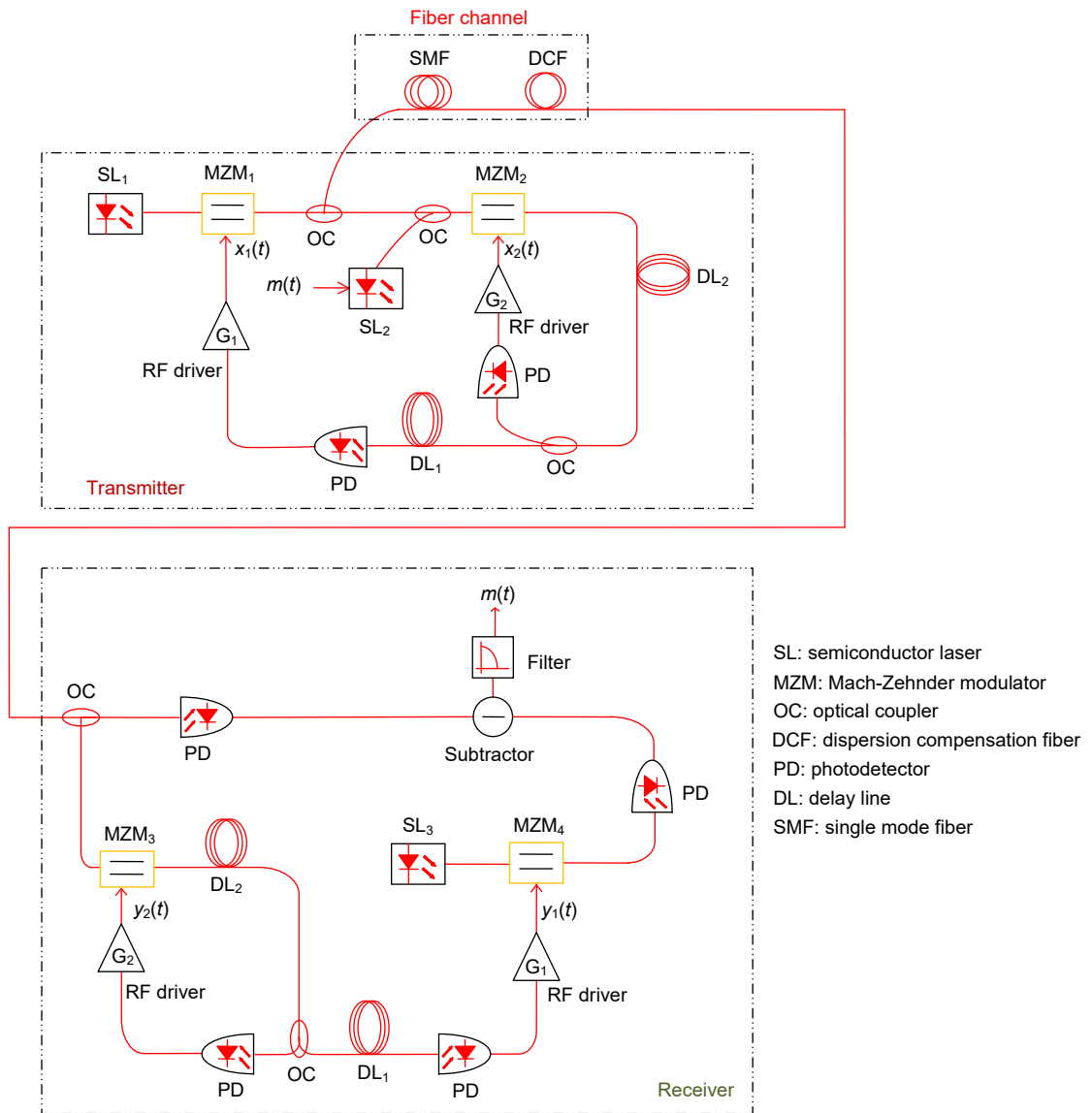


图 1 具有两个电光时延反馈环的强度混沌装置图

Fig. 1 Intensity chaos device with two electro-optic time delay feedback loops

线路中, 转化为 MZM<sub>1</sub> 的输入。需要注意的是, 只有 MZM<sub>1</sub> 的输出进入信道中传输, MZM<sub>2</sub> 的输出被隐藏在发射端内部, 两个电光时延反馈环的设置增强了输出混沌的复杂程度。在传输信道中, 采用色散补偿光纤(dispersion compensation fiber, DCF)对信道损伤进行简单补偿。接收端与发射端采用相同的参数, 信道传来的混沌信号经过 OC 分为两部分, 一部分驱动接收端与发射端同步, 并由 PD 转化为电信号, 另一路直接完成光电转换, 两路相减即可恢复出二进制序列。

受 Ikeda<sup>[8]</sup>对光学中非线性延迟动力学研究的启发, 假设混沌动力学由线性滤波器支配, 该线性滤波器具有低截止频率的特征时间  $\theta$  和高截止频率的特征时间  $\tau$ 。考虑滤波器输出电压  $v_i(t)$ , 发射端的动力学

模型可以由变量  $x_i(t) = \pi v_i(t) / 2v_{(\pi,i)}$  描述<sup>[9]</sup>, 其中  $v_{(\pi,i)}$  是调制器 MZM<sub>i</sub> 的半波电压。混沌通信系统的动态数学模型可以用如下延迟积分微分描述:

$$x_i + \tau_i \frac{dx_i}{dt} + \frac{1}{\theta_i} \int_{t_0}^t x_i(s) ds = \beta_i \{F[x_1(t - T_1 - T_2) + x_2(t - T_1 - T_2)]\}, \quad (1)$$

$$y_i + \tau'_i \frac{dy_i}{dt} + \frac{1}{\theta'_i} \int_{t_0}^t y_i(s) ds = \beta'_i \{F[x_1(t - T'_1 - T'_2) + y_2(t - T'_1 - T'_2)]\}, \quad (2)$$

其中:  $i=1,2$  是内外反馈环的下标,  $F(x) = \cos^2(x + \phi)$  是动力学过程中涉及的非线性函数,  $\phi$  是调制器的静态偏移相位,  $T_i$  是 DL<sub>i</sub> 相应的延迟时间, 反馈强度  $\beta_i$  表示为  $\beta_i = \pi AGP / 2v_{(\pi,i)}$ , 其中  $A$  为 PD 的转化效率,  $G$

为射频驱动器的增益,  $P$  为输入功率,  $v_{(\pi,i)}$  是 MZM<sub>*i*</sub> 的射频半波电压。式(1)描述发射端模型, 式(2)描述接收端模型。接收端与发射端只有在完美匹配( $\beta'_i = \beta_i$ ,  $T'_i = T_i$ ,  $\tau'_i = \tau_i$ ,  $\theta'_i = \theta_i$ )的情况下, 才会完全同步, 有效实现对信息的加解密操作。式(1)、式(2)中的积分时间  $\tau_i$  与微分时间  $\theta_i$  之比相应于带通特性中的高、低截止频率之比, 且两者之间具备一定的量级关系:  $\theta_i \approx 10^6 \tau_i$ , 延迟时间  $T_i$  可以在  $\theta_i$  和  $\tau_i$  之间进行调整, 其跨度最高可达 6 个数量级, 并参考实验值<sup>[10-12]</sup>对参

数进行设计:  $\beta_i = 3$ ,  $T_1=100$  ns,  $T_2=310$  ns,  $\tau_1 = 20$  ns,  $\tau_2 = 12.2$  ns,  $\theta_i = 16.6$  ms,  $\phi = \pi/4$ 。

### 2.2 MATLAB 与 OptiSystem 协同仿真的实现方法

OptiSystem 软件按单向、顺序流程执行仿真过程, 该处理方式使得后级器件的输出信号反馈回前级器件时无法触发新的仿真运算, 因此考虑 MATLAB 辅助 OptiSystem 实现反馈环路, MATLAB 与 OptiSystem 协同仿真实现思路如图 2 (以发射端为例)。

综上, 生成的协同仿真实验图如图 3 所示。

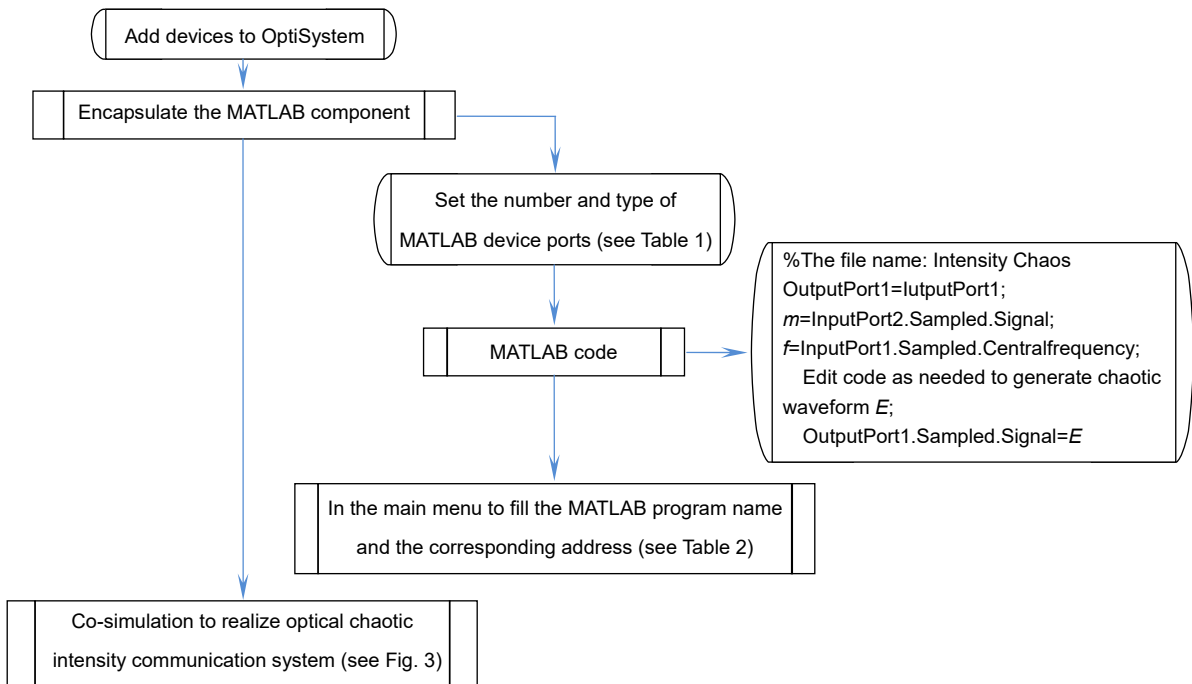


图 2 协同仿真实现思路流程图

Fig. 2 Co-simulation realization flow chart

表 1 发射端 MATLAB 元件端口参数

Table 1 MATLAB component port parameters of the transmitter

| Ports   | Parameters             |            |
|---------|------------------------|------------|
| Inputs  | Number of input ports  | 2          |
|         | Signal type (input 1)  | Optical    |
|         | Signal type (input 2)  | Electrical |
| Outputs | Number of output ports | 1          |
|         | Signal type (output 1) | Optical    |

表 2 MATLAB 元件 Main 菜单设置

Table 2 Main menu settings of MATLAB components

| Menu               | Setting                               |
|--------------------|---------------------------------------|
| Load MATLAB        | √                                     |
| Run command        | Intensity Chaos                       |
| MATLAB search path | Path corresponding to Intensity Chaos |

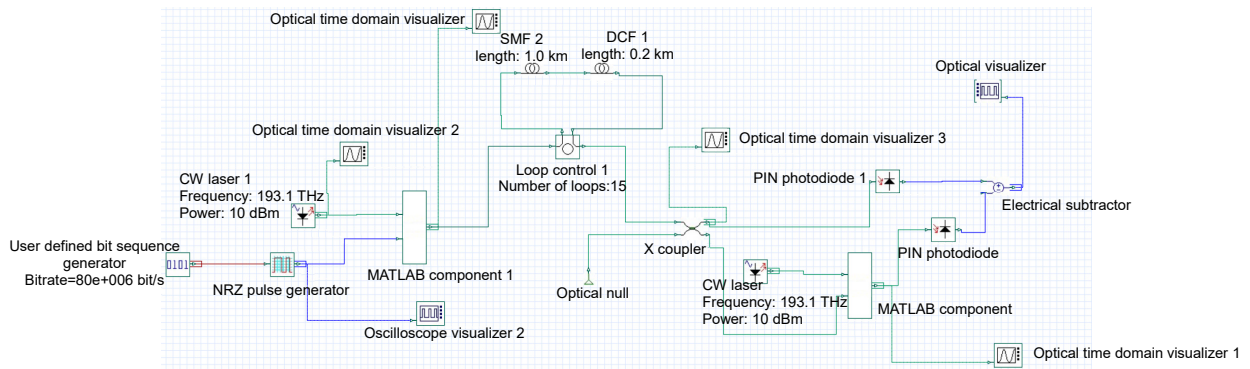


图 3 MATLAB 与 OptiSystem 协同仿真具有两个电光时延反馈环的强度混沌装置图

Fig. 3 MATLAB and OptiSystem co-simulation of an intensity chaos device with two electro-optic time delay feedback loops

### 3 仿真结果

#### 3.1 混沌序列的基本性质研究

无信息搭载时, MATLAB 与 OptiSystem 协同仿真产生的混沌序列及其放大图如图 4(a)、4(b)所示, 高低脉冲振幅互相跟随<sup>[13]</sup>, 并利用自相关函数评估该序列的随机性, 对于混沌序列  $x(t)$ , 自相关函数(ACF, 用  $f_{ACF}$  表示)可被定义为

$$f_{ACF}(\tau) = \frac{\langle [x(t) - \langle x(t) \rangle] \cdot [x(t - \tau) - \langle x(t) \rangle] \rangle}{[\langle x(t) - \langle x(t) \rangle \rangle]^2}, \quad (3)$$

其中:  $\langle \dots \rangle$ 表示时间平均值。由图 4(c)可以看出, 该序列仅在延迟时间为 0 时具有较强的相关性, 其余时间相关程度十分低, 证明该混沌脉冲具有幅度随机性, 可有效起到隐蔽信息、提高通信安全性的作用。

同样在无信息搭载的情况下, 分析该系统的同步性及鲁棒性<sup>[14]</sup>, 选取任意时间段(310 ns~320 ns)内发射

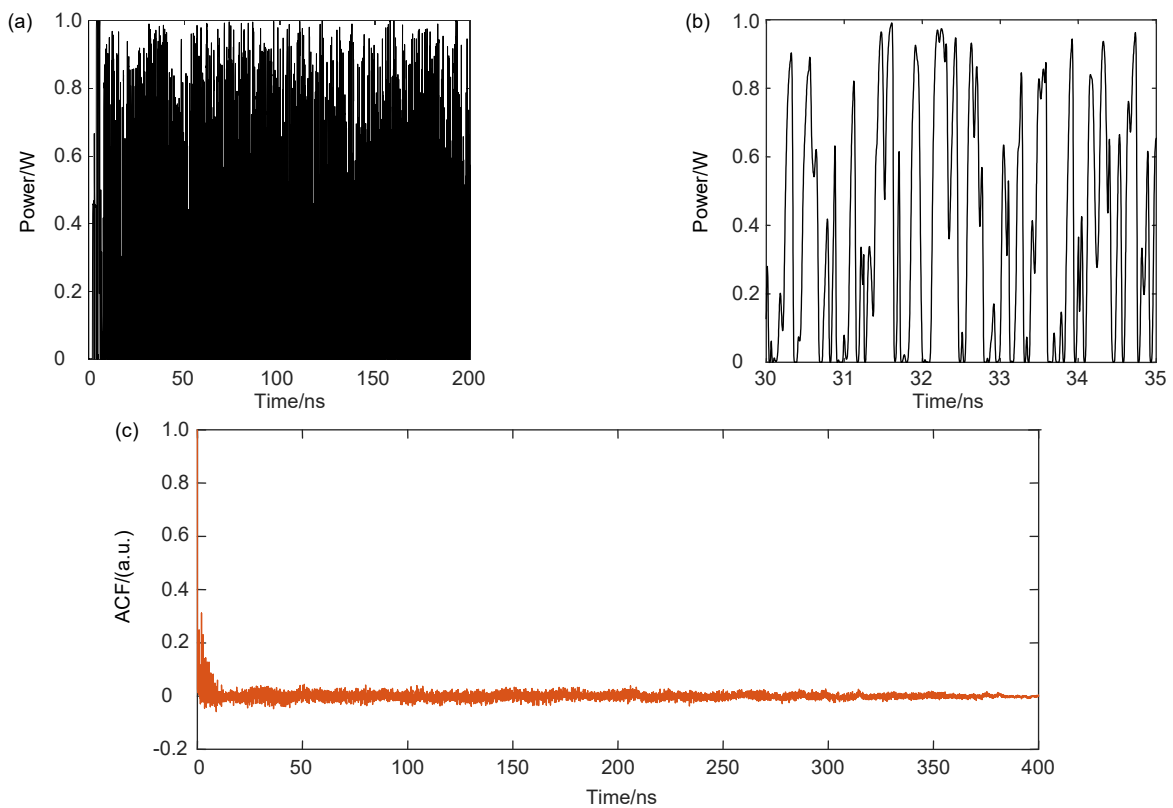


图 4 MATLAB 与 OptiSystem 协同仿真产生的混沌波形。

(a) 混沌波形图; (b) 混沌波形放大图; (c) 混沌波形的自相关性

Fig. 4 Chaos waveform generated by MATLAB and OptiSystem co-simulation. (a) Chaotic waveform; (b) Zoomed figure of the chaotic waveform; (c) Autocorrelation of the chaotic waveform

端与接收端的混沌序列, 如图 5 所示, 可发现该时间段内所有时刻, 发射端与接收端的混沌波形具有相同的趋势, 并对所有时间段的混沌波形进行同步性验证。如图 6 所示, 横坐标为发射端的混沌强度, 纵坐标为接收端的混沌强度, 两者完全拟合于  $y=x$  这条曲线, 证明了发射端与接收端波形的同步现象是普遍存在的, 而非某一时间段内的特殊现象, 即该混沌通信系统具有同步性。

随后, 向  $SL_2$  引入一个方波扰动, 调制后的方波耦合到  $MZM_1$ , 使发射端反馈强度发生变化, 发射端与接收端的时间序列分别如图 7(a)、7(b)所示。发射端于  $t=200$  ns 时引入一个 15 ns 的扰动; 在引入扰动前, 两端处于完全同步状态, 差值恒为 0; 直至 200 ns, 接收端出现与发射端同步的扰动并在 15 ns 后结束。结果说明在引入外部扰动的情况下, 延迟混沌动力学的同步解仍能够保持, 并没有因为引入扰动而永久丧失同步性能, 证明该混沌通信系统具有一定的自我修

复、抗干扰能力, 即鲁棒性。

上述仿真实验说明, 在发射端与接收端所有参数都匹配的条件下, 两端产生的混沌序列具有同步性并能够抵抗一定的外部扰动, 因此可利用该系统进行信息的加解密传输。

### 3.2 信息的加解密与传输

采用 OptiSystem 中的二进制序列生成器生成序列 000000111000111111000111111000, 并将该信息耦合到电光时延反馈环中, 经两次强度调制后, 送入信道中进行传输, 发射端已搭载信息的混沌序列如图 8(a)所示, 传输距离为 1 km, 并采用 0.2 km 的 DCF 补偿线性损伤, 接收端恢复出的信息序列如图 8(c)所示, 与输入的信息完全吻合。图 8(d)是两端混沌强度的散点图, 由于传输过程中的衰减与损耗, 各点并不完全拟合于  $y=x$ , 而是分布在  $y=x$  两侧, 由于发射端混沌搭载了信息序列, 所以在曲线附近呈非均匀分布状态<sup>[15]</sup>,

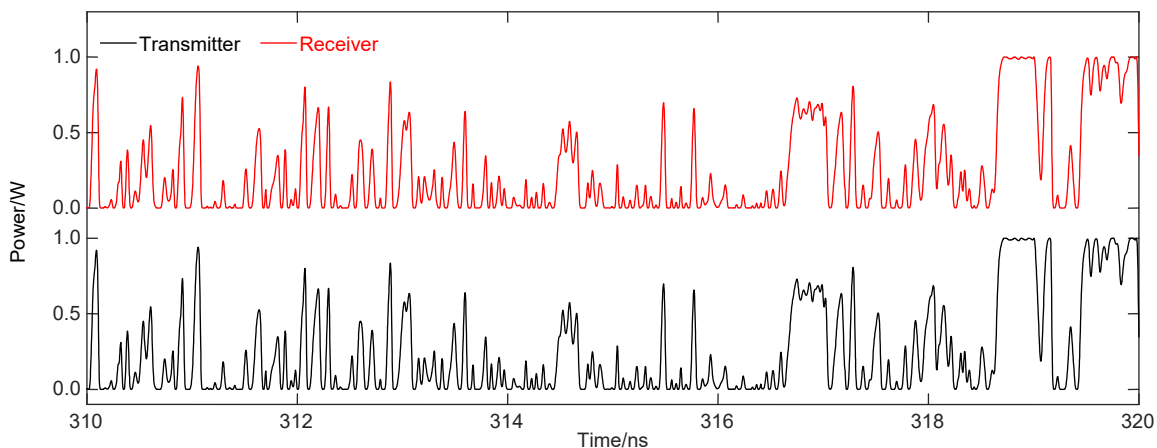


图 5 某段时间内, 发射端与接收端的波形功率对比图

Fig. 5 Power comparison chart of the waveform at the transmitter and receiver in a certain period of time

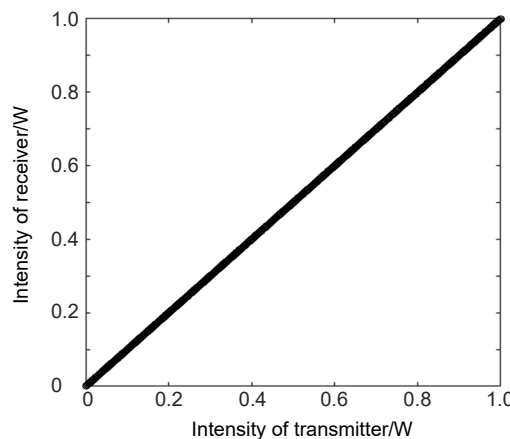


图 6 发射端与接收端的混沌强度拟合图

Fig. 6 Chaotic intensity fitting diagram of the transmitter and receiver

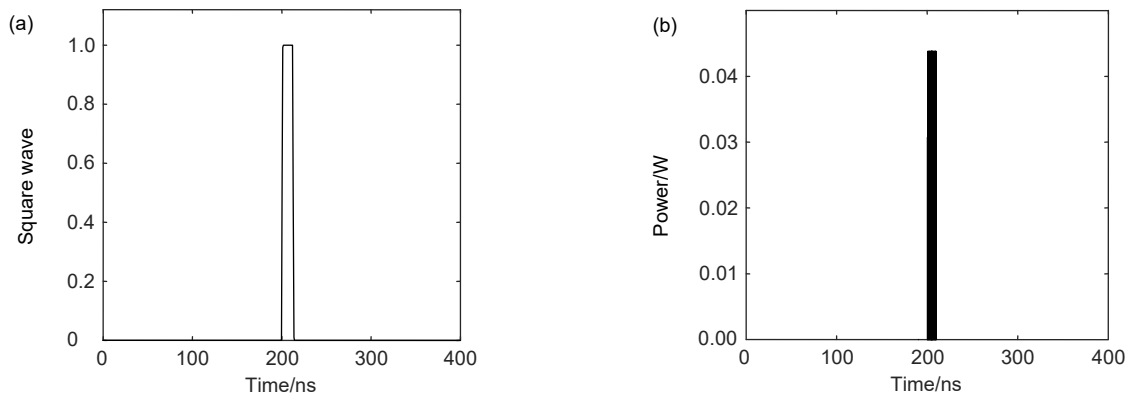


图 7 系统鲁棒性研究。(a) 发射端引入的扰动; (b) 接收端的同步误差

Fig. 7 System robustness research. (a) Disturbance introduced by the transmitter; (b) Synchronization error at the receiver

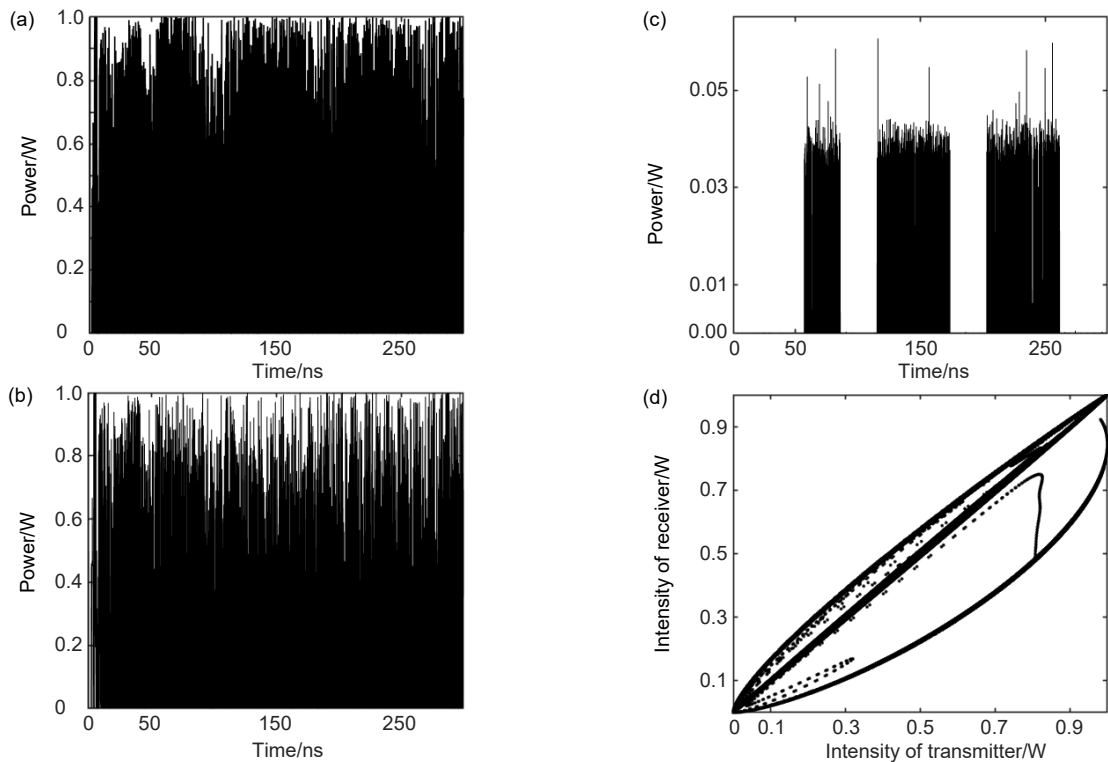


图 8 (a) 发射端混沌波形; (b) 接收端混沌波形; (c) 恢复出的信息; (d) 发射端与接收端混沌强度散点图

Fig. 8 (a) Chaotic waveform of the transmitter; (b) Chaotic waveform of the receiver; (c) Recovered information; (d) Scatter plot of chaotic intensity of the transmitter and receiver

但仍能体现发射端与接收端的同步性。

由上述仿真结果可知, 发射端与接收端混沌的同步程度是能否有效进行加解密操作的决定因素, 为评估系统的同步性, 这里引入归一化互相关函数  $C$  来测评发射端与接收端之间的同步程度, 归一化互相关函数<sup>[16]</sup>定义为

$$C = \frac{\langle [x_1(t) - \langle x_1(t) \rangle] \cdot [y_1(t) - \langle y_1(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [x_1(t) - \langle x_1(t) \rangle]^2 \rangle \cdot \langle [y_1(t) - \langle y_1(t) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (4)$$

其中:  $x_1(t)$ 与  $y_1(t)$ 对应图 1 中的发射端混沌与接收端混沌,  $\langle \dots \rangle$ 表示平均值。

图 9 反映的是不同补偿情况下, 传输距离与互相关函数之间的关系, 此处不考虑对衰减的补偿。随着传输距离的增加, 系统的同步性大幅下降。随后增加色散补偿光纤对色散进行补偿, 在相同距离下, 有效提高了系统的同步程度及加解密信息的质量<sup>[17]</sup>。

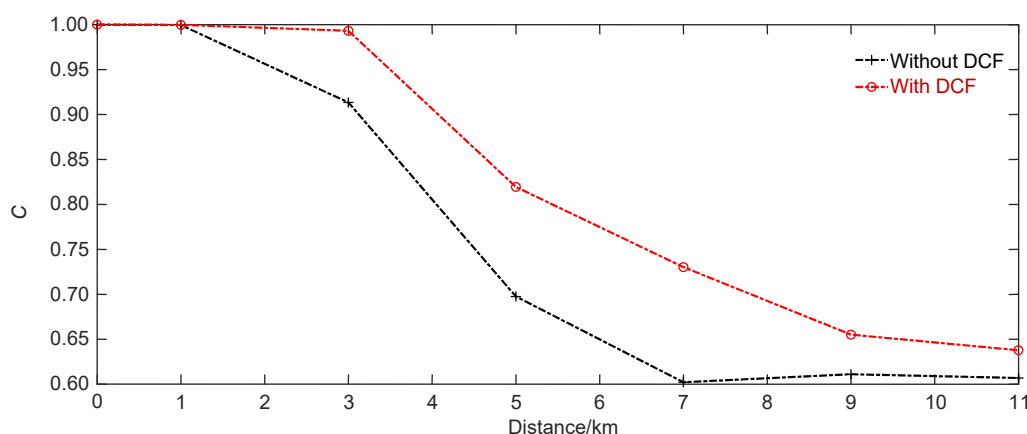


图9 不同补偿情况下, 传输距离与互相关函数之间的关系

Fig. 9 The relationship between transmission distance and cross-correlation function under different compensation conditions

## 4 结论

本文使用 MATLAB 辅助 OptiSystem 实现光学反馈环路的模拟, 将 MATLAB 的数值计算能力与 OptiSystem 的仿真模拟能力相结合, 成功搭建具有两个电光时延反馈环的强度混沌装置, 仿真结果与理论值相吻合, 生成的混沌序列具有同步性及鲁棒性, 可有效对信息进行加解密操作, 为后续混沌生成方案的研究提供了思路。除此之外, 实现 MATLAB 与 OptiSystem 的协同仿真, 可按照使用者意愿设计虚拟器件, 对新型光电器件的研究和开发具有重要意义。

## 参考文献

- [1] Yan S L. Chaotic laser parallel series synchronization and its repeater applications in secure communication[J]. *Acta Phys Sin*, 2019, **68**(17): 170502.  
颜森林. 激光混沌并行串联同步及其在中继器保密通信系统中的应用[J]. *物理学报*, 2019, **68**(17): 170502.
- [2] Wu Q Q, Ma Z Y, Li Q H, et al. Research progress of high speed chaotic optical communication[J]. *Opt Commun Technol*, 2021, **45**(1): 22–27.  
吴琼琼, 马子洋, 李启华, 等. 高速混沌光通信研究进展[J]. *光通信技术*, 2021, **45**(1): 22–27.
- [3] 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.
- [4] Jacquot M, Lavrov R, Larger L. Nonlinear delayed differential optical phase feedback for high performance chaos communications[C]//*Conference on Lasers and Electro-Optics 2010*. San Jose, USA, 2010. doi: 10.1364/CLEO.2010.CFC6.
- [5] Yi L L, Ke J X. Research progress of chaotic secure optical communication[J]. *J Commun*, 2020, **41**(3): 168–181.  
义理林, 柯俊翔. 混沌保密光通信研究进展[J]. *通信学报*, 2020, **41**(3): 168–181.
- [6] Yang Z, Yi L L, Ke J X, et al. Chaotic optical communication over 1000 km transmission by coherent detection[J]. *J Lightwave Technol*, 2020, **38**(17): 4648–4655.
- [7] Liu X L, Xiong X J. Performance analysis of photoelectric dispersion compensation technology based on Optisystem[J]. *Electr Measur Technol*, 2017, **40**(11): 114–119.  
刘小磊, 熊雪娟. 基于 Optisystem 的光电色散补偿技术的性能分析[J]. *电子测量技术*, 2017, **40**(11): 114–119.
- [8] Ikeda K. Multiple-valued stationary state and its instability of the transmitted light by a ring cavity system[J]. *Opt Commun*, 1979, **30**(2): 257–261.
- [9] Kouomou Y C, Colet P, Larger L, et al. Mismatch-induced bit error rate in optical chaos communications using semiconductor lasers with electrooptical feedback[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2005, **41**(2): 156–163.
- [10] Nguimdo R M, Colet P, Larger L, et al. Digital key for chaos communication performing time delay concealment[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, **107**(3): 034103.
- [11] Hizanidis J, Deligiannidis S, Bogris A, et al. Enhancement of chaos encryption potential by combining all-optical and electrooptical chaos generators[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, **46**(11): 1642–1649.
- [12] Nguimdo R M, Colet P, Mirasso C. Electro-optic delay devices with double feedback[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, **46**(10): 1436–1443.
- [13] Shahzadi R, Anwar S M, Qamar F, et al. Secure EEG signal transmission for remote health monitoring using optical chaos[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 57769–57778.
- [14] Li Q L, Chen D W, Bao Q, et al. Numerical investigations of synchronization and communication based on an electro-optic phase chaos system with concealment of time delay[J]. *Appl Opt*, 2019, **58**(7): 1715–1722.
- [15] Wang L S, Mao X X, Wang A B, et al. Scheme of coherent optical chaos communication[J]. *Opt Lett*, 2020, **45**(17): 4762–4765.
- [16] Nguimdo R M, Colet P. Electro-optic phase chaos systems with an internal variable and a digital key[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(23): 25333–25344.
- [17] Lavrov R, Jacquot M, Larger L. Nonlocal nonlinear electro-optic phase dynamics demonstrating 10 Gb/s chaos communications[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, **46**(10): 1430–1435.

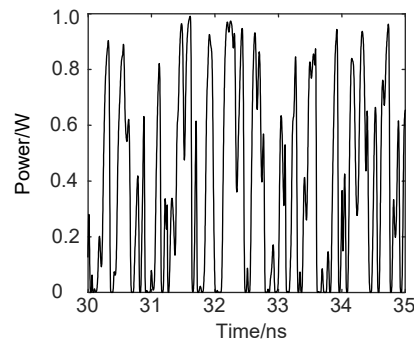


# Co-simulation of optical chaotic secure communication systems in MATLAB and OptiSystem

Liu Jinyang<sup>1</sup>, Zhou Xuefang<sup>1\*</sup>, Bi Meihua<sup>1</sup>, Yang Guowei<sup>1</sup>, Wang Tianshu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

<sup>2</sup>National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China



Zoomed figure of chaotic wave

**Overview:** With the increase in demand for communication capacity, speed, and confidentiality, optical fiber communication has become an important way of information transmission. However, during the transmission process, there is a risk of being eavesdropped on by illegal receivers. Therefore, it is very necessary to encrypt the signal transmitted in optical fibers. Chaotic secure communication is the physical hardware encryption based on chaotic signals. With the chaotic signal has the advantages of aperiodic, continuous broadband spectrum, noise-like, and unpredictable long-term, information is hidden in chaotic signals for transmission, and the transmitted information is demodulated by the chaotic waveform synchronized with the transmitter at the receiver. Chaotic secure communication has a great application prospect in the secure communication field and has attracted extensive attention from researchers at home and abroad. Based on two parallel electro-optic delay feedback loops, an electro-optic intensity chaotic system is designed in this paper. By injecting chaos into chaos, more complex chaotic waveforms can be generated to enhance the chaotic complexity and the communication system confidentiality. In this design, MATLAB and OptiSystem are used to simulate the system, which solves the difficulty that OptiSystem could not simulate the optical feedback loop. Combining MATLAB's numerical calculation capabilities with OptiSystem's simulation capabilities, an intensity chaotic device with two electro-optic delay feedback loops has been successfully constructed. The mature laser and binary sequence generation modules in OptiSystem provide energy and input signals to the system. The electro-optic delay feedback loop is realized by the MATLAB program, and the signal transmission in the optical fiber link is completed in OptiSystem. The simulation results show that the generated chaotic sequence has amplitude randomness, and the high and low pulse amplitudes follow each other, which can effectively conceal information. The chaotic sequence at the transmitter and receiver has synchronization and robustness. In the case of no information loading, the chaotic sequence intensity at both ends completely fits  $y=x$ . When an external disturbance is introduced, the synchronization solution of the delayed chaotic dynamics at both ends can still be maintained well and it has a certain anti-interference ability. These properties ensure that the system could be used for information encryption operation effectively, and the relationships between the transmission distance and the chaos synchronization at both ends under different compensation situations have been studied. The simulation results are in good agreement with the theoretical values, which proves the feasibility of the chaotic generation method and provides ideas for the subsequent research and simulation on chaotic generation schemes.

Liu J Y, Zhou X F, Bi M H, *et al.* Co-simulation of optical chaotic secure communication systems in MATLAB and OptiSystem[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(9): 210146; DOI: 10.12086/oe.2021.210146

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61705055) and Zhejiang Provincial Key Research and Development Program (2019C01G1121168)

\* E-mail: [zhouxf@hdu.edu.cn](mailto:zhouxf@hdu.edu.cn)