

基于全光混沌注入双环电光相位反馈环的 混沌保密通信系统研究

周雪芳, 王飞, 杨国伟, 毕美华, 许蒙蒙, 胡淼

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对现有混沌保密光通信系统时延特征隐藏所需反馈增益系数较大这一问题, 设计了一种基于全光混沌注入双环电光相位反馈环的混沌保密通信系统。首先, 由全光反馈产生光混沌并将其耦合至 2 个电光相位混沌反馈环中。然后, 通过相位调制的方式实现信息与混沌载波的非线性耦合并参与混沌载波的生成。最后, 在检测端通过光混沌同步实现信号的解密。借助 MATLAB 软件仿真分析了系统中混沌信号的复杂度、时延特征隐藏、同步性、鲁棒性和通信性能。仿真结果表明, 所设计的混沌保密通信系统在较小的反馈系数时具有较高的复杂度且时延特征得到较好的隐藏。

关键词: 混沌保密通信; 光混沌; 光反馈; 双反馈环; 相位调制; 时延特征隐藏

中图分类号: TN914; TN918

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024125

Research on chaotic secure communication system based on all optical chaos injection double-loop electro-optical phase feedback loop

ZHOU Xuefang, WANG Fei, YANG Guowei, BI Meihua, XU Mengmeng, HU Miao

School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: To solve the problem of large feedback gain coefficient required for delay feature hiding in existing chaotic secure laser communication systems, a chaotic secure communication system based on all optical chaos injection double-loop electro-optical phase feedback loop was designed. Firstly, optical chaos was generated by all optical feedback and coupled to two electro-optic phase chaos feedback loops. Then, the nonlinear coupling of information and chaotic carrier was achieved through phase modulation to participate in the generation of chaotic carrier. Finally, the signal was decrypted by optical chaos synchronization at the detection end. The complexity, TDS hiding, synchronization, robustness and communication performance of chaotic signals in the system were analyzed by MATLAB software. The results demonstrate that the designed chaotic secure communication system has higher complexity and the TDS are completely hidden when the feedback coefficient is small.

Keywords: chaotic secure communication, optical chaos, optical feedback, double feedback loop, phase modulation, time delay signature hiding

收稿日期: 2024-02-02; 修回日期: 2024-06-12

通信作者: 周雪芳, zhouxf@hdu.edu.cn

基金项目: 浙江省重点研发计划基金资助项目(No.2022C03037)

Foundation Item: The Key Research and Development Program of Zhejiang Province (No.2022C03037)

0 引言

近年来,混沌半导体激光器(LD, laser diode)因其丰富的非线性动态特征与随机特性,使混沌信号在保密通信系统中得到了广泛的应用^[1]。半导体激光器通过光反馈输出高维度的混沌激光,但其在在外腔作用下会导致输出的混沌激光中产生较明显的时延特征(TDS, time delay signature)。若带有TDS的混沌信号被提取会大大增加信息泄露的风险,并对通信安全造成特别严重的威胁^[2-4]。因此,隐藏激光混沌系统的TDS已经成为当前混沌保密通信领域的一个热门话题。为了抑制TDS并且增强混沌带宽,国内外学者在传统激光系统中加入多种反馈回路。Argyris等^[5]首次采用数值的方法研究了外腔反馈半导体激光器的反馈时延,发现在弱反馈区域,通过合理地选择弛豫振荡周期和反馈时延,可以有效抑制时延特征。Hong等^[6]在垂直腔面发射激光器(VCSEL, vertical-cavity surface-emitting laser)中对产生混沌的4种系统进行研究,结果表明,单向注入连续波VCSEL和相互耦合的连续波VCSEL这2种系统可以同时抑制TDS和增强混沌带宽。Li等^[7]对时延特征进行了数值与实验分析,通过简单的级联装置可以实现TDS隐藏和带宽增强的效果。Zhao等^[8]提出了利用半导体激光器受时延干扰的自相位调制光反馈的带宽复杂度增强混沌,在相位调制引起的频谱扩展和受时延干扰的非线性滤波共同作用下,可在很宽的动态工作范围内实现频谱平坦和较好的TDS隐藏。Jiang等^[9]提出了一种自相位调制反馈和微环谐振腔共同作用的宽带混沌产生系统,混沌中的弛豫振荡效应完全得到了消除,且带宽明显提升,实现了TDS的完美隐藏。Nguimdo等^[10-12]提出了一种由2个并行的混沌反馈回路组成的相互耦合的电光相位混沌系统,较好地实现了TDS隐藏。

以上研究均能实现TDS隐藏^[13-17],但这些系统结构相对复杂且需要较大的反馈增益系数,在相同的时延反馈回路条件下,TDS存在暴露的风险,因此限制了实际应用。

本文结合电光相位调制器(PM, phase modulator)和全光反馈产生混沌的优点,提出了一种基于全光混沌注入双环电光相位反馈环的混沌保密通信系统。在该系统中,混沌信号由3个半导体激光器通过部分透射的反射镜(M, mirror)经过时延反

馈和耦合的作用产生,并和待传输的信息一起注入相位调制器中,通过相位调制的方式加密并使待传输的信息参与到混沌信号产生的过程中,增加了系统的复杂度。发射端的双环电光时延振荡器与接收端的电光时延振荡器通过耦合诱发相同的混沌动力学特性,确保了混沌系统的同步性。在仿真实验中,本文分析了不同反馈参数时混沌的动力学特性、有无加载信息时的自相关函数(ACF, auto correlation function)和不同参数时系统的失谐率,最后验证了该混沌保密通信系统的通信性能。

1 系统结构与理论模型

1.1 系统结构

基于全光混沌注入双环电光相位反馈环的混沌保密通信系统如图1所示。在该系统中,3个结构参数相同的全光半导体激光器 $LD_i(i=1,2,3)$ 通过部分透射的反射镜 $M_i(i=1,2,3)$ 经时延反馈和耦合达到混沌同步,3个半导体激光器产生的光混沌强度信号通过各自反馈回路中的相位调制器 $PM_j(j=1,2,3,4,5,6)$ 进行调制。首先,第一反馈回路中的半导体激光器 LD_2 的输出光依次经过光耦合器(OC, optocoupler) OC_2 、相位调制器 PM_2 和 PM_4 、延迟线(DL, delay line) DL_2 、马赫-曾德尔干涉仪(MZI, Mach-Zehnder interferometer) MZI_2 、光电探测器(PD, photodetector) PD_2 和射频(RF, radio frequency)放大器 RF_2 ,然后反馈到相位调制器 PM_1 ,最终进入相位调制器 PM_3 ,在此过程中,混沌信号被信息 $m(t)$ 相位调制。 PM_3 的输出光被分光比为50:50的光耦合器 OC_1 分成两束,其中一束通过单模光纤发送到接收端,另一束作为反馈信号,依次经过具有时延 T_1 的光纤延迟线 DL_1 、具有不平衡时延 δT_1 的马赫-曾德尔干涉仪 MZI_1 、光电探测器 PD_1 和射频放大器 RF_1 ,传输到第二反馈回路的相位调制器 PM_2 中。在此过程中,马赫-曾德尔干涉仪 MZI_1 会将相位变化转换为强度变化,由光电探测器 PD_1 检测后经射频放大器 RF_1 放大,其他环路与第一环路类似,接收端和发射端对应器件参数相同。每个射频的输出 $x_i(t)$ 作为另一环路相位调制器PM的驱动电压,接收端将经光纤信道传输后的加密信号转换为电信号后传输到另一环路的相位调制器PM中作为驱动电压,携带信息 $m(t)$ 的混沌信号经过减法器与接收端本地混沌信号做差值运算,混沌信号可

被滤除，再通过马赫-曾德尔干涉仪 MZI₅ 和光电探测器 PD₅，信息 $m(t)$ 就可以被解密出来，从而实现混沌信号的加密传输和解密。

1.2 速率方程及参数定义

该系统的混沌动力学模型可由 Lang-Kobayashi 速率方程 (式(1)~式(4)) 来描述^[18-21]，延迟差分方程 (DIDE, delay difference equation) 如式(5)~式(8) 所示^[22-24]。

对于 LD₁，有

$$\begin{aligned} \frac{dE_1}{dt} = & \frac{1}{2} (1 + i\alpha) G(N_1, \|E_1\|^2) E_1 + \\ & \sqrt{2} \kappa_{f1} e^{j\varphi_{1,1}} E_1(t - 2\tau_{f1}) + \\ & \frac{1}{\sqrt{2}} \kappa_{2,1} e^{j\varphi_{2,1}} E_2(t - \tau_{f1} - \tau_{f2}) + \\ & \frac{1}{\sqrt{2}} \kappa_{3,1} e^{j\varphi_{3,1}} E_3(t - \tau_{f1} - \tau_{f3}) \end{aligned} \quad (1)$$

对于 LD₂ 和 LD₃ (k=2,3)，有

$$\begin{aligned} \frac{dE_k}{dt} = & \frac{1}{2} (1 + i\alpha) G(N_k, \|E_k\|^2) E_k + \\ & \frac{1}{\sqrt{2}} \kappa_{f,k} e^{j\varphi_{k,k}} E_k(t - 2\tau_{f,k}) + \\ & \frac{1}{\sqrt{2}} \kappa_{1,k} e^{j\varphi_{1,k}} E_1(t - 2\tau_{f,k} - \tau_{f,1}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $i=1,2,3$ 。

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{I_i}{e} - \gamma_e N_i - [G(N_i, \|E_i\|^2) + \gamma] \|E_i\|^2 \quad (3)$$

$$G(N_i, \|E_i\|^2) = \frac{g(N_i - N_0)}{1 + s \|E_i\|^2} - \gamma \quad (4)$$

对于电光相位反馈环 $i(i=1,2)$ ，发射端为

$$x_1(t) + \tau_1 \frac{dx_1(t)}{dt} + \frac{1}{\theta_1} \int_0^t x_1(s) ds = \beta_1 \cos^2[(\Delta(x_2)_{T_1} + \varphi_1)] \quad (5)$$

$$x_2(t) + \tau_2 \frac{dx_2(t)}{dt} + \frac{1}{\theta_2} \int_0^t x_2(s) ds = \beta_2 \cos^2[\Delta(x_1 + Em)_{T_2} + \varphi_2] \quad (6)$$

接收端为

$$y_1(t) + \tau_1' \frac{dy_1(t)}{dt} + \frac{1}{\theta_1'} \int_0^t y_1(s) ds = -\beta_1' \cos^2[\Delta(y_2)_{T_1'} + \varphi_1'] \quad (7)$$

$$y_2(t) + \tau_2' \frac{dy_2(t)}{dt} + \frac{1}{\theta_2'} \int_0^t y_2(s) ds = \beta_2' \cos^2[\Delta(x_1)_{T_2'} + \varphi_2'] \quad (8)$$

其中， β_i 为

$$\beta_i = \frac{G_i Shw}{2\epsilon n^2} [\|E_i(t - T_i)\|^2 + \|E_i(t - T_i - \delta T_i)\|^2 + \|E_i(t - T_i)\| \|E_i(t - T_i - \delta T_i)\|] \quad (9)$$

在 Lang-Kobayashi 速率方程中， $E_i(i=1,2,3)$ 表示光场的复振幅， $N_i(i=1,2,3)$ 表示激光器的载流子数， $\|E_i\|^2$ 表示光子数， α 表示线宽增强因子， $G(N_i, \|E_i\|^2)$ 表示增益函数， $\kappa_{f,i}$ 和 $\kappa_{i,k}(i,k=1,2,3)$ 分别表示反馈系数和耦合系数， $\tau_{f,i}(i=1,2,3)$ 表示反馈时延和耦合时延， I_i 表示激光器的偏置电流， e 表示每个电子的电荷量， g 和 s 分别表示差分增益和饱和系数， γ_e 和 γ 分别表示载流子的衰减率和光子衰减率。

在电光相位反馈环中， $x_i(t)$ 和 $y_i(t)$ 分别表示接收端和发射端的混沌序列， E_m 表示有用信息， $\Delta(F)_{T_i} =$

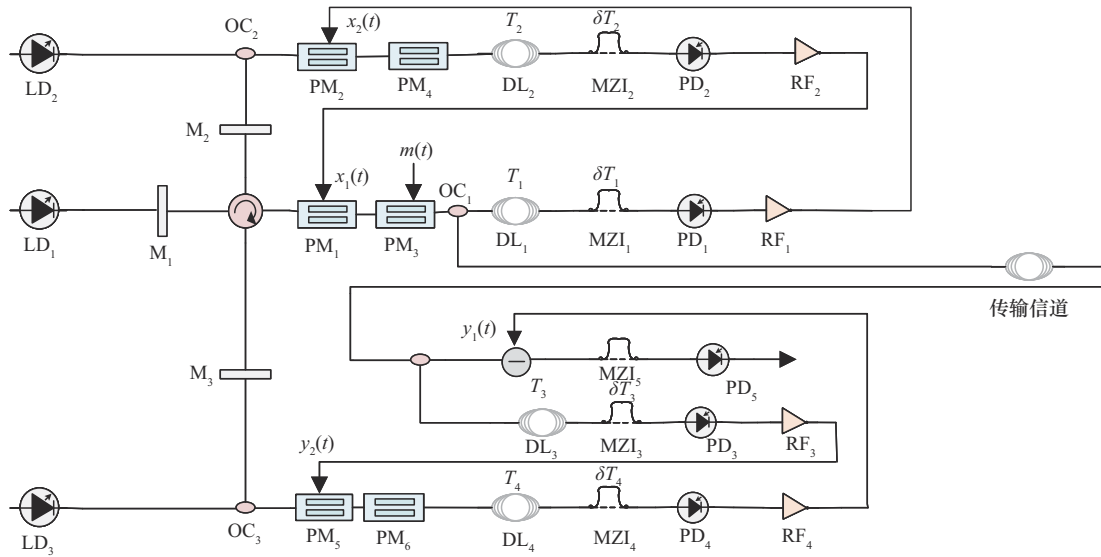


图1 基于全光混沌注入双环电光相位反馈环的混沌保密通信系统

$F(t - T_i) - F(t - T_i - \delta T_i)$, 其中, T_i 和 δT_i 分别表示光纤延迟线时延和马赫-曾德尔干涉仪的不平衡时延。

$x_i(t) = \frac{\pi V_i(t)}{2V_{\pi,i}} (i=1,2)$, 其中, $V_i(t)$ 为 PM_i 的驱动电压,

$V_{\pi,i}$ 为 PM_i 的半波电压。 β_i 表示反馈回路的反馈强度($\beta_i = \beta$), 在单独的电光相位反馈环中, 反馈强度 $\beta_i = \frac{\pi A_i G_i \eta_i P_i}{2V_{\pi,i}}$, 其中, A_i 为反馈回路的整体衰减, G_i 为RF

的增益系数, η_i 为 PD_i 的转化效率, P_i 为 PM_i 的输入光功率, 其是根据半导体激光器 LD_i 的Lang-Kobayashi

速率方程产生的, 表达式为 $P_i = \frac{\|E_i\|^2 \hbar \omega}{2\epsilon n^2}$, 其中,

$\|E_i\|^2$ 为光子数, \hbar 为普朗克常量, ω 为光的角频率, ϵ 为真空介电常数, n 为半导体介质的折射率。此外, τ_i 和 θ_i 是由RF $_i$ 和PD $_i$ 引起的带通滤波器的高截止时间和低截止时间, 因此这也决定了系统具有带通滤波特性。

2 数值模拟结果及系统性能分析

本文采用四阶龙格-库塔 (Runge-Kutta) 算法^[25]对式(1)~式(9)进行数值求解, 砷化镓半导体激光器以及其他器件的物理参数数值如表 1 所示^[26-27]。

表 1 物理参数数值

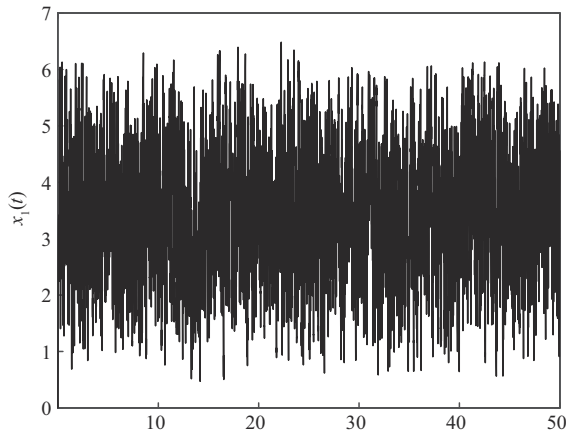
参数	数值
线宽增强因子 α	3
反馈系数 $\kappa_{f,i}/\text{ns}^{-1}$	0.2
耦合系数 $\kappa_{i,k}/\text{ns}^{-1}$	0.2
初始相位 $\varphi_{i,i}/\text{rad}$	0
反馈时延 $\tau_{f,i}/\text{ns}$	1.4
耦合时延 $\tau_{i,i}/\text{ns}$	5
偏置电流 I/mA	38.06
载流子衰减率 γ_e/ns^{-1}	0.65
光子衰减率 γ/ns^{-1}	496
差分增益 g/ns^{-1}	1.2×10^{-5}
透明载流子数 N_0	1.25×10^8
饱和系数 s	5×10^{-7}
普朗克常量 h/Js	6.626×10^{-34}
光角频率 $\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	1.216×10^{15}
真空介电常数 $\epsilon/(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	8.854×10^{-12}
半导体介质的折射率 n	1.5
等效带通滤波器的高截止时间 τ/ns	20
等效带通滤波器的低截止时间 θ/ns	12.2
光纤延迟线时延 T/ns	100
MZI的不平衡时延 $\delta T/\text{ns}$	310
PM的静态偏移相位/ rad	$\frac{\pi}{4}$

2.1 混沌信号的复杂度

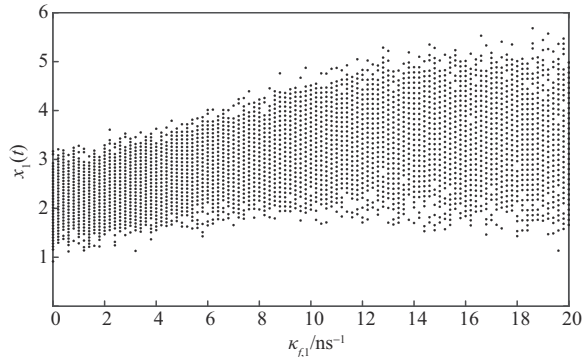
首先通过仿真模拟研究了该混沌保密通信系统的非线性动力学特性, 分析了混沌时间序列的时间轨迹, 通过混沌分岔图、混沌吸引子和最大李雅普诺夫指数 (LLE, largest Lyapunov exponent) 来评估混沌时间序列的复杂度, 从而选择合适的参数保证通信系统工作在混沌状态。

图 2(a)是发射端混沌时间序列 $x_i(t)$ 的时间轨迹, 总序列长度为 $50 \mu\text{s}$, 且呈高度随机分布, 表明该信号是一种典型的混沌状态。图 2(b)是混沌载波与反馈系数 $\kappa_{f,1}$ 的分岔图。从图 2(b)中可以看出, 当 $\kappa_{f,1}=0$ 时, 混沌系统的输出即发射端产生的信号呈现出复杂度较低的混沌状态。随着 $\kappa_{f,1}$ 的增加, 混沌轨迹迅速扩展, 进入了较高复杂度的混沌状态。这是因为混沌载波最终是由电光相位系统产生, 全光强度混沌的注入增加了信号复杂度。除此之外, 混沌系统的复杂度也会受到电光相位系统反馈强度 β_i 影响, 而 β_i 又受 PM_i 的输入光功率影响, 即 LD_i 输出的强度混沌信号的光功率与 LD_i 的偏置电流有关。因此讨论偏置电流 I 与混沌载波的分岔图来表征 β_i 对系统复杂度影响, 如图 2(c)所示。从图 2(c)中可以看出, 当 $I=20 \text{ mA}$ 时, 系统产生的混沌载波处于低维混沌状态, 复杂度较低, 且随着偏置电流 I 的增加, 可以观察到明显的分岔行为, 混沌载波复杂度也逐渐增加。图 2(d)显示了混沌载波的吸引子, 其轨迹始终保持在一定范围内, 但始终呈现无序性。这是因为 3 个 LD 和电光相位系统之间存在反馈和耦合, 系统的信息熵比单独的全光系统和电光系统高得多, 从而使产生的混沌信号的复杂度得到了较高的提升。

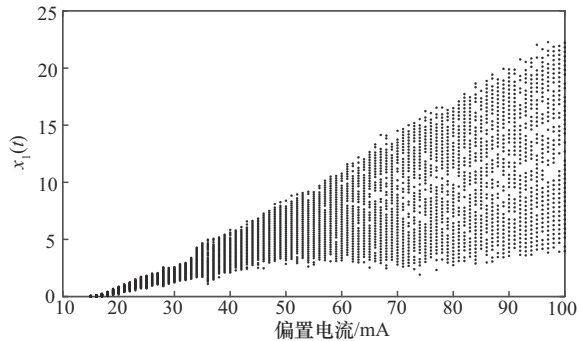
图 3(a)和图 3(b)分别对应不同反馈系数 $\kappa_{f,1}$ 和不同偏置电流 I 下混沌序列的 LLE 曲线。从图 3 中可以得出, 当 $\kappa_{f,1}$ 较小时, $\text{LLE} > 0$, 说明系统处于混沌状态; 当偏置电流 $I < 10 \text{ mA}$ 时, LLE 较低, 系统处于低维混沌状态, 随着偏置电流的增加, 系统复杂度也随之增加。因为在该系统中, 不仅 3 个 LD 之间存在反馈和耦合, 而且电光相位系统之间也存在反馈和耦合, 且采用全光和电光相位系统级联的方式, 系统的信息熵比单独的全光相位系统和电光相位系统高得多, 因此系统产生的混沌信号的复杂度得到了较高的提升。



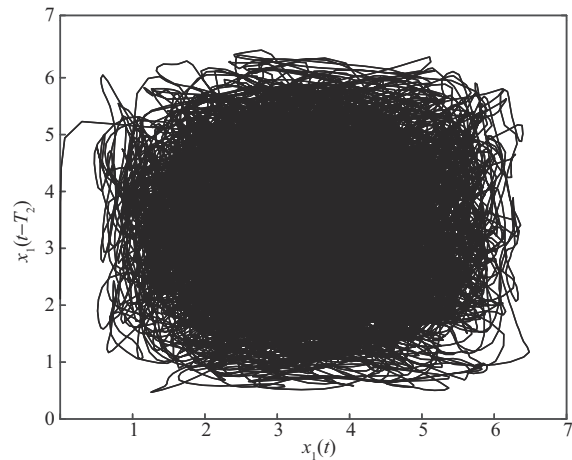
(a) 发射端混沌时间序列 $x_1(t)$ 的时间轨迹



(b) 混沌载波与反馈系数 $\kappa_{f,i}$ 的分岔图

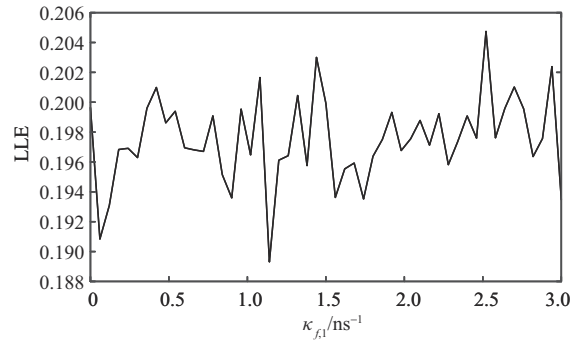


(c) 混沌载波与偏置电流 I 的分岔图

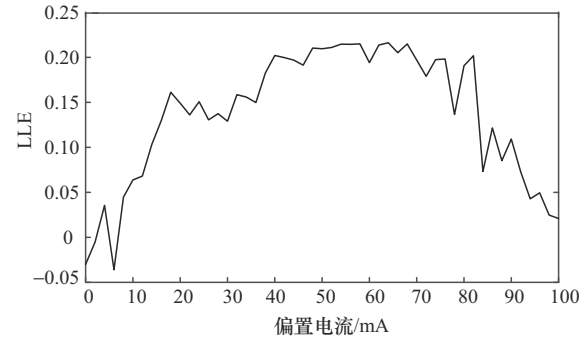


(d) 混沌载波 $x_1(t)$ 的吸引子

图2 分岔图



(a) 不同反馈系数 $\kappa_{f,i}$



(b) 不同偏置电流 I

图3 最大李雅普诺夫指数曲线

在后续的仿真中，为使半导体激光器能稳定地工作在混沌输出过程中，选择反馈参数和偏置电流分别为 $\kappa_{f,i} = \kappa_{i,k} = 0.2 \text{ ns}^{-1}$ ， $I = 38.06 \text{ mA}$ 。

2.2 TDS 隐藏

除了系统的复杂性，TDS 隐藏也是提高系统安全性的有效手段，为了量化信号的时延特征，一般采用 ACF、时延互信息 (DMI, delay mutual information) 及排列熵等数学工具。通常情况下，ACF 对噪声扰动具有鲁棒性，可以通过计算 ACF 提取系统 TDS。对于混沌载波 $x(t)$ ，其 ACF(r) 可定义为^[28]

$$\text{ACF}(r) = \frac{\langle [x(t+r) - \langle x(t) \rangle][x(t) - \langle x(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle (x(t) - \langle x(t) \rangle)^2 \rangle \langle (x(t+r) - \langle x(t) \rangle)^2 \rangle}} \quad (10)$$

其中， $x(t)$ 表示混沌载波， r 表示反馈回路的时延， $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均值。当自相关值越低时，混沌随机序列越难以被提取到有用的信息。

取光纤延迟线时延 $T = 100 \text{ ns}$ ，MZI 的不平衡时延 $\delta T = 310 \text{ ns}$ ，观察在未加载信息 $m(t)$ 和加载信息 $m(t)$ 时的 ACF 曲线，如图 4 所示。从图 4 中可以看出，当 $r = 100 \text{ ns}(T)$ 、 $r = 310 \text{ ns}(\delta T)$ 以及 $r = 410 \text{ ns}(T + \delta T)$ 时，均未观测到明显的 TDS 峰值，说明系统的

TDS 得到了完全隐藏, 窃听者不能从传输信道中获得 TDS 签名信息, 也不能重建发射端的混沌产生系统, 这样就无法解密信息, 通信的安全性和可靠性进一步得到了保证。

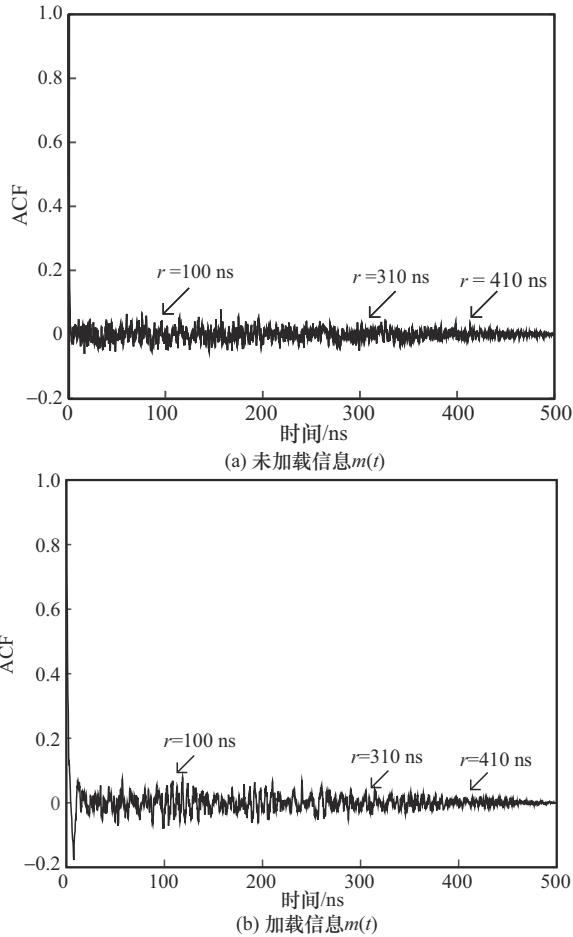


图 4 不同传输情况下的 ACF 曲线

2.3 系统的同步性和鲁棒性

通常情况下, 通过计算接收端和发射端信号的互相关函数 (CCF, cross correlation function) 来量化系统的同步质量和失配程度。CCF 的定义为^[29]

$$CCF = \frac{\langle [x(t) - \langle x(t) \rangle][y(t) - \langle y(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [x(t) - \langle x(t) \rangle]^2 \rangle \langle [y(t) - \langle y(t) \rangle]^2 \rangle}} \quad (11)$$

其中, $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别为发射端和接收端的混沌信号。理论表明, 当 $CCF > 0.95$ 时, 可以认为系统已经达到了高质量的同步。

在传输信道中, 引入信噪比 (SNR, signal to noise ratio) 为 25 dB 的高斯白噪声来观察系统的同步性和鲁棒性, 如图 5 所示。从图 5(a) 中可以看出,

接收端和发射端信号功率的时间轨迹相同, 证明发射端和接收端的信号是相干的。从图 5(b) 中可知, 当接收端和发射端滞后值为 0 时, CCF 可以达到最大值 1, 这意味着系统达到了完全同步, 混沌同步质量很好。

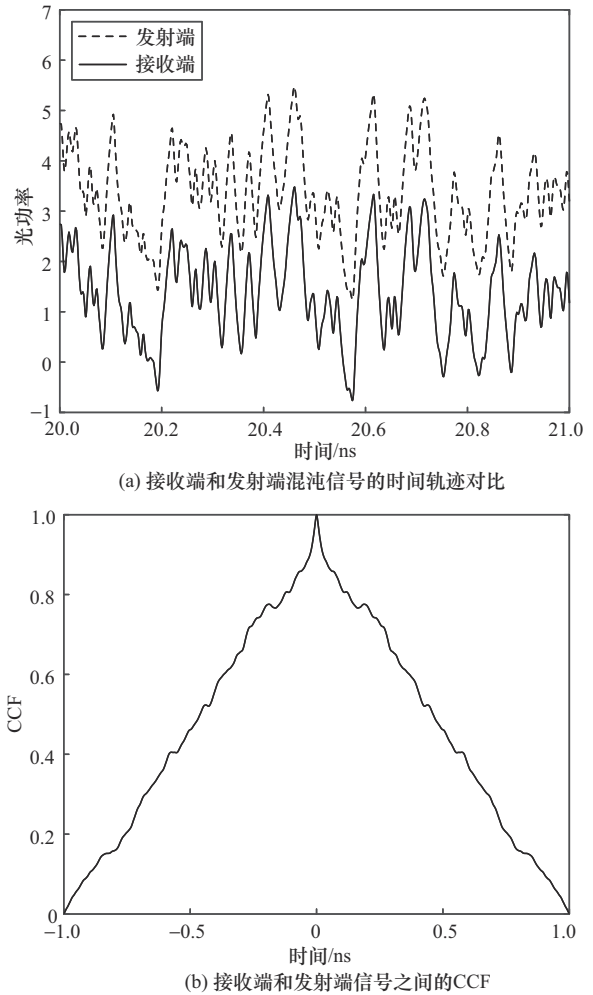


图 5 在 SNR=25 dB 的情况下, 系统的同步性和鲁棒性

当接收端和发射端系统参数完全匹配时, 系统理论上可以达到混沌同步。但是在现实实验中, 由于外部环境的影响 (如 TDS) 以及系统内部参数的不匹配等, 系统的同步性仍会受到影响, 因此讨论混沌同步的鲁棒性是非常有必要的。接下来, 引入失谐率来讨论系统参数不匹配情况下的混沌同步质量, 参数的失谐率 Δa_i ^[30] 定义为

$$\Delta a = \frac{a_i' - a_i}{a_i} \quad (12)$$

其中, a_i' 为接收端的参数值, a_i 为发射端的参数值。

当 SNR=25 dB 时, 反馈系数 κ_{fi} 、线宽增强因子 α 、等效带通滤波器的高截止时间 τ_i 、等效带通滤波器的低截止时间 θ_i 、光纤延迟线时延 T_i 和 MZI 的不平衡时延 δT_i 这 6 个参数在不匹配条件下的 CCF 值变化如图 6 所示。从图 6(a) 和图 6(b) 可以明显看出, 若 κ_{fi} 和 α 不匹配, 则会显著影响混沌同步的性能, 而且这 2 个参数是由系统内部器件所决定的, 因此可以作为通信系统的密钥。从图 6(c) 和图 6(d) 可以看出, CCF 值几乎不受这 2 个参数的影响, 当 τ_i 的失谐率达到 20% 时, 系统的 CCF 值仍在 0.997 6, 混沌同步质量依然良好; 当 θ_i 的失谐率达到 80% 时, 系统的 CCF 值接近 1, 这也说明系统的混沌同步质量良好。 τ_i 和 θ_i 这 2 个参数的失配主要是由外部环境变换引起的, 进一步证明了

本文所设计的系统具有较好的鲁棒性。从图 6(e) 和图 6(f) 可以看出, 当 T_i 的失谐率达到 20% 时, 系统的 CCF 值仍为 0.991, 同步质量好, 具有较强的鲁棒性; 当 δT_i 的失谐率达到 5% 时, 系统 CCF 值就已经降为 0.825 了, 混沌同步对此实验参数较为敏感, 因此 MZI 的不平衡时延 δT_i 也可以作为系统的密钥。

2.4 信息的加密传输和恢复

本节验证系统实现混沌保密通信的可行性和可靠性。信息通过相位调制器 PM₁ 对混沌载波进行相位调制, 采用 2PSK, 速率为 20 Gbit/s, 调制过程如式(13)所示。

$$Em = Kx_1(t) \cos(\pi m(t)) \quad (13)$$

其中, K 表示调制深度, 取 $K=2$, $x_1(t)$ 表示发射端

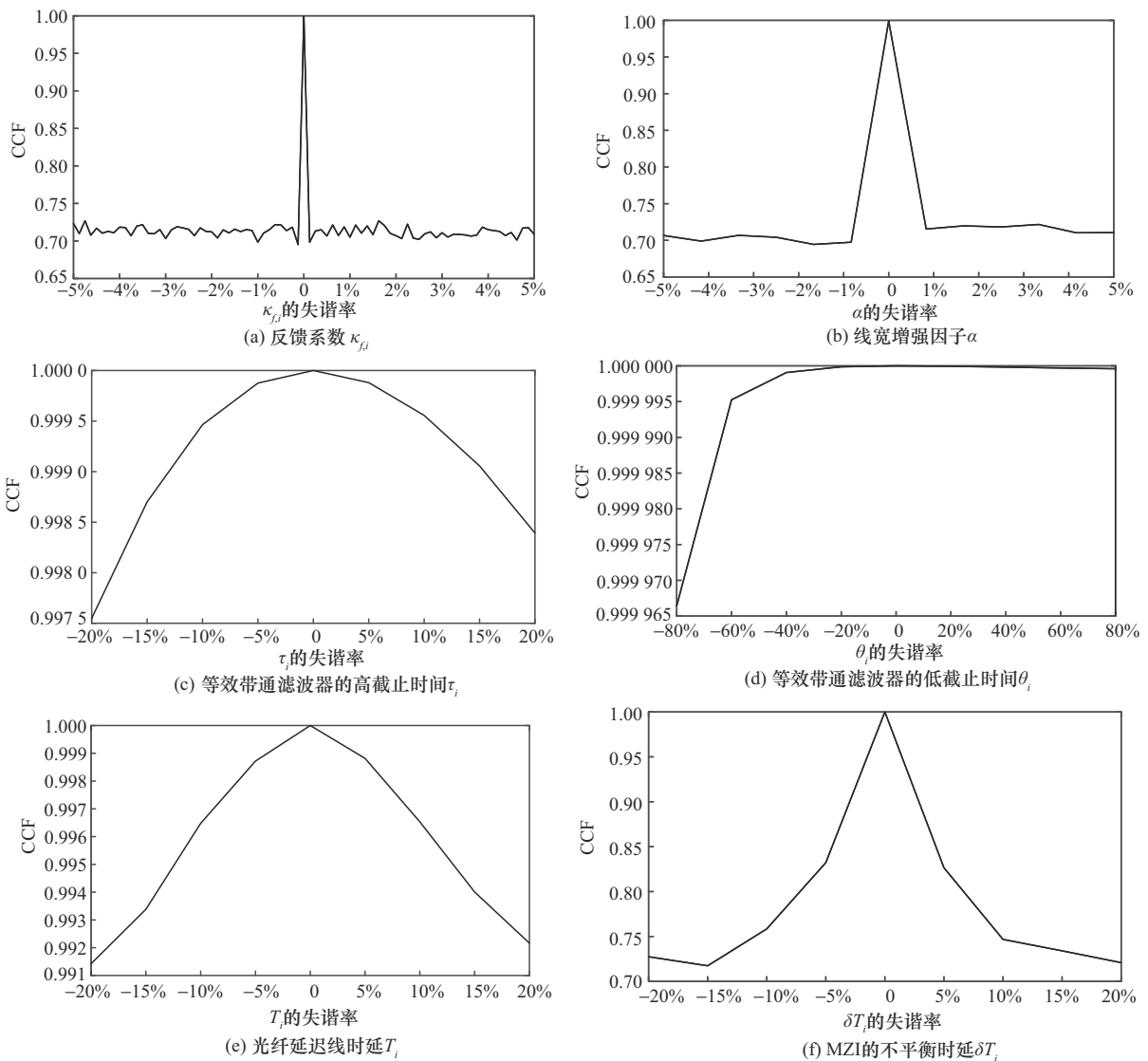


图 6 在 SNR=25 dB 的情况下, 各参数不匹配对 CCF 的影响

的混沌载波, $m(t)$ 为加载的信息序列。由于信息是相位调制进入混沌系统的, 不改变信号强度, 且参与到混沌信号的生成过程中, 因此信息可以很好地隐藏在混沌载波中, 进一步保证了通信的安全性。图 7 为原始信息 $m(t)$ 的时域波形。加密后的消息如图 8 所示, 图 8(a)和图 8(c)分别表示未加载信息 $m(t)$ 的混沌信号时域波形和频谱, 图 8(b)和图 8(d)分别表示加载信息 $m(t)$ 的混沌信号时域波形和频谱, 对比混沌信号时间轨迹图可知, 信息 $m(t)$ 在传输过程中得到了很好的隐藏; 从 2 个频谱图可以看出, 信号的频谱得到了一定的展宽, 使得信号传输速率得到了提升。

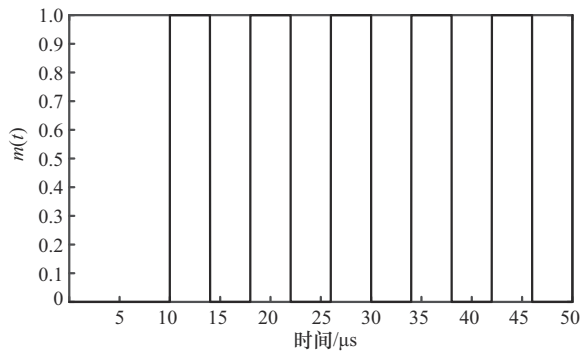
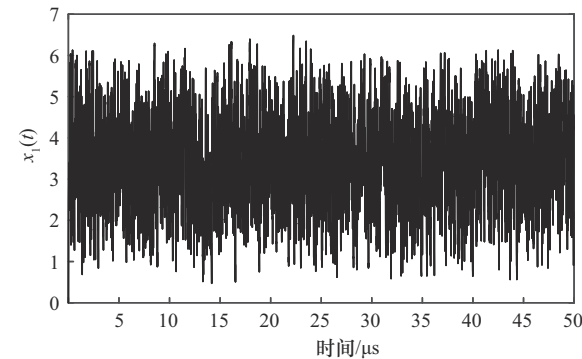
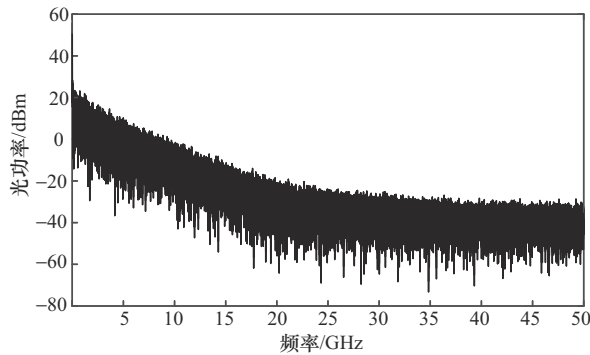


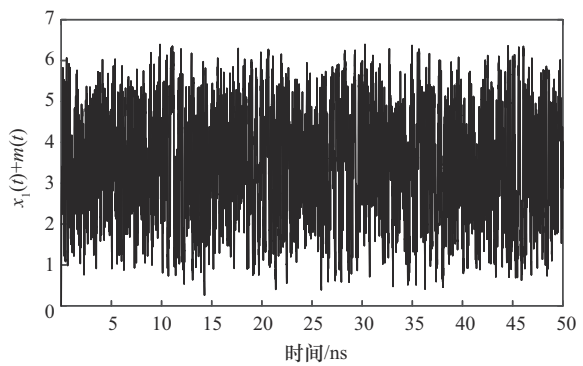
图 7 原始信息 $m(t)$ 的时域波形



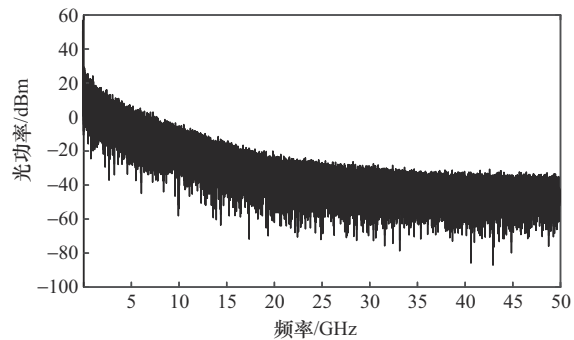
(a) 未加载信息 $m(t)$ 的混沌信号时域波形



(c) 未加载信息 $m(t)$ 的混沌信号频谱



(b) 加载信息 $m(t)$ 的混沌信号时域波形



(d) 加载信息 $m(t)$ 的混沌信号频谱

图 8 未加载信息和加载信息时混沌信号的时域和频域对比

在相位调制过程中, 由于采用 2PSK 调制技术, 即当 $m(t)=1$ 时, 信号相位为 π , 在时域波形图上波形的表现为翻转 180° ; 当 $m(t)=0$ 时, 波形不翻转, 因此在接收端可以通过信号的差值运算实现对信号的解密, 即 $|y_1(t)-x_1(t)|$, 由式(5)和式(7)可得

$$\begin{aligned} & (y_1 - x_1) + \tau_1 \frac{d(y_1 - x_1)}{dt} + \frac{1}{\theta_1} \int_0^t (y_1 - x_1) ds = \\ & -\beta_1 \left[\cos^2(\Delta(y_2)_{T_1} + \varphi_1) + \cos^2(\Delta(x_2)_{T_1} + \varphi_1) \right] = \\ & -\beta_1 \left[1 - \sin(\Delta(y_2 + x_2)_{T_1}) \cos(\Delta(y_2 - x_2)_{T_1}) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)可知, 两信号相减得到的解密信号不是简单的 0 和 1, 而是具有一定值的信号, 因为两信号差值由 $x_2(t)$ 和 $y_2(t)$ 决定, 而 $x_2(t)$ 和 $y_2(t)$ 与相位调制的信息 $m(t)$ 相关联, 如式(15)所示。

$$\begin{aligned} & (y_2 - x_2) + \tau_2 \frac{d(y_2 - x_2)}{dt} + \frac{1}{\theta_2} \int_0^t (y_2 - x_2) ds = \\ & \beta_2 \left[1 - \sin(\Delta(2x_1 + Em)_{T_2}) \cos(\Delta(Em)_{T_2}) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

由式(14)和式(15)可知, 可以通过 $|y_1(t)-x_1(t)|$ 来解密信息。在传输信道 SNR=25 dB、传输速率为 20 Gbit/s 的情况下, 得到的解调信号如图 9 所示。图 9(a)是发射端传输的有用信息 $m(t)$, 图 9(b)是通

通过对 $|y_1(t)-x_1(t)|$ 归一化后的解密信号, 图9(c)是对两信号差值进行最佳判决后恢复出的信号 $m'(t)$, 可以看出 $m'(t)$ 与 $m(t)$ 基本一致, 该系统的误码率达到了 2×10^{-5} , 信息被成功恢复和提取, 证明了该系统的可行性。

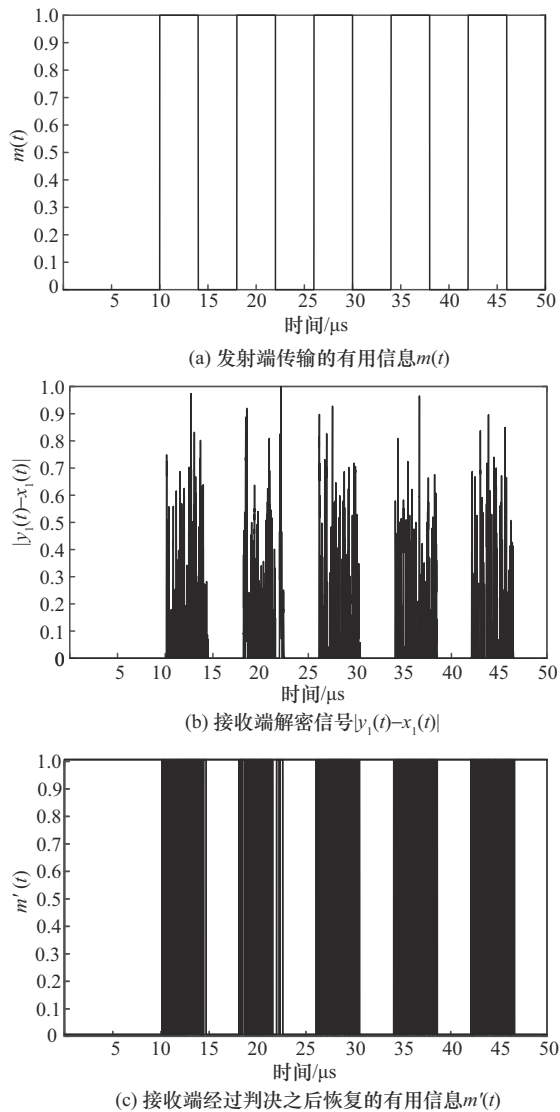


图9 在SNR=25 dB、传输速率为20 Gbit/s的情况下的解调信号

3 结束语

本文对基于全光混沌注入双环电光相位反馈环的混沌保密通信系统的时延特征隐藏、同步性和鲁棒性等展开了研究。采用光反馈和级联相位调制反馈环耦合的方式, 在较小的反馈增益系数时较好地实现了TDS隐藏, 多反馈回路的引入在一定程度上也扩展了混沌保密通信系统的密钥空间, 可有效抵御非法窃密者的暴力攻击。同时, 电光部分的混沌

同步是通过开环结构实现的, 系统具有较强的鲁棒性。本文仅验证了调制格式为2PSK、通信速率为20 Gbit/s时系统的通信性能, 接下来可探讨4PSK或QAM调制格式和更高速率下系统的通信性能, 以及基于机器学习的光混沌同步方案来解决收发两端的光混沌同步问题。

参考文献:

- [1] 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.
YI L L, KE J X. Research progress of chaotic secure optical communication[J]. Journal on Communications, 2020, 41(3): 168-181.
- [2] WU J G, XIA G Q, TANG X, et al. Time delay signature concealment of optical feedback induced chaos in an external cavity semiconductor laser[J]. Optics Express, 2010, 18(7): 6661-6666.
- [3] ZHAO Q C, WANG Y C, WANG A B. Eavesdropping in chaotic optical communication using the feedback length of an external-cavity laser as a key[J]. Applied Optics, 2009, 48(18): 3515-3520.
- [4] JAFARI A, SEDGHI H, MABHOUTI K, et al. Slave-master dynamics of semiconductor laser with short external cavity[J]. Optics Communications, 2011, 284(12): 3018-3029.
- [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] HONG Y H, SPENCER P S, SHORE K A. Wideband chaos with time-delay concealment in vertical-cavity surface-emitting lasers with optical feedback and injection[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2014, 50(4): 236-242.
- [7] LI N Q, PAN W, XIANG S Y, et al. Loss of time delay signature in broadband cascade-coupled semiconductor lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(23): 2187-2190.
- [8] 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.
- [9] JIANG N, ZHAO A K, LIU S Q, et al. Generation of broadband chaos with perfect time delay signature suppression by using self-phase-modulated feedback and a microsphere resonator[J]. Optics Letters, 2018, 43(21): 5359-5362.
- [10] NGUIMDO R M, COLET P. Electro-optic phase chaos systems with an internal variable and a digital key[J]. Optics Express, 2012, 20(23): 25333-25344.
- [11] NGUIMDO R M, COLET P, LARGER L, et al. Digital key for chaos communication performing time delay concealment[J]. Physical Review Letters, 2011, 107(3): 034103.
- [12] NGUIMDO R M, LAVROV R, COLET P, et al. Effect of fiber dispersion on broadband chaos communications implemented by electro-optic nonlinear delay phase dynamics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(18): 2688-2696.
- [13] LI Q L, LU S S, BAO Q, et al. Simultaneous trilateral communication based on three mutually coupled chaotic semiconductor lasers with optical feedback[J]. Applied Optics, 2018, 57(2): 251-257.
- [14] WANG C, JI Y F, WANG H X, et al. Security-enhanced electro-optic feedback phase chaotic system based on nonlinear coupling of two delayed interfering branches[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4):

7203415.

- [15] 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.
- [16] LAVROV R, PEIL M, JACQUOT M, et al. Electro-optic delay oscillator with nonlocal nonlinearity: optical phase dynamics, chaos, and synchronization[J]. *Physical Review E*, 2009, 80(2): 026207.
- [17] FADIL E A, ABASS A K, TAHHAN S R. Secure WDM-free space optical communication system based optical chaotic[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(8): 477.
- [18] LIU J Y, ZHOU X F, LI Q L, et al. Secondary-encryption optical chaotic communication system based on one driving laser and two responding lasers[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2022, 163: 112554.
- [19] LIU J Y, ZHOU X F, CHEN W H. Research on the performance of multimode optical chaotic secure communication system with multidimensional keys and a complex entropy source[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(4): 7246910.
- [20] LIU J Y, ZHOU X F, HU M, et al. Bidirectional high-speed chaotic communication system based on an all-optical time-delay feedback loop[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(7): 076104.
- [21] ZHONG D Z, ZHAO K K, HU Y L, et al. Four-channels optical chaos secure communications with the rate of 400 Gb/s using optical reservoir computing based on two quantum dot spin-VCSELs[J]. *Optics Communications*, 2023, 529: 129109.
- [22] LI Q L, LU S S, BAO Q, et al. Simultaneously bidirectional transmission of message between three coupled semiconductor lasers[J]. *Optics Communications*, 2018, 423: 155-161.
- [23] GONG X Y, WANG H X, JI Y F, et al. Optical chaos generation and synchronization in secure communication with electro-optic coupling mutual injection[J]. *Optics Communications*, 2022, 521: 128565.
- [24] QUAN W, WANG H X, JI Y F. Three-loop electro-optical phase chaotic secure communication system with time-delay signatures concealment and key space enhancement[J]. *Optics Communications*, 2022, 512: 128065.
- [25] LIU Q, WANG Y, WANG J, et al. Optical image encryption using chaos-based compressed sensing and phase-shifting interference in fractional wavelet domain[J]. *Optical Review*, 2018, 25(1): 46-55.
- [26] ELSONBATY A, HEGAZY S F, OBAYYA S S A. Simultaneous concealment of time delay signature in chaotic nanolaser with hybrid feedback[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 342-351.
- [27] 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]. *Applied Optics*, 2019, 58(7): 1715-1722.
- [28] WANG L S, WANG J L, WU Y S, et al. Chaos synchronization of semiconductor lasers over 1040-km fiber relay transmission with hybrid amplification[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(6): 953-960.
- [29] GAO X J, ZHU W, YANG Q, et al. Time delay estimation from the time series for optical chaos systems using deep learning[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7904-7915.
- [30] ZHAO A K, JIANG N, PENG J F, et al. Parallel generation of low-correlation wideband complex chaotic signals using CW laser and external-cavity laser with self-phase-modulated injection[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(5): 200026.

[作者简介]



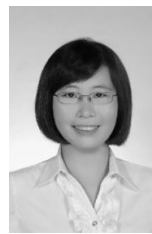
周雪芳 (1976-), 女, 江西丰城人, 博士, 杭州电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为光混沌保密通信、光纤传感技术和光纤激光器。



王飞 (1999-), 男, 河北衡水人, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为光混沌同步保密通信、光通信、非线性光学等。



杨国伟 (1984-), 男, 浙江杭州人, 博士, 杭州电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线光通信、神经网络算法。



毕美华 (1981-), 女, 山东济宁人, 博士, 杭州电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为新型光纤传输系统、接入网系统安全算法等。



许蒙蒙 (1992-), 女, 河南商丘人, 博士, 杭州电子科技大学讲师, 主要研究方向为光通信。



胡森 (1982-), 男, 浙江温州人, 博士, 杭州电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为视觉感知、激光雷达、光电对抗、遥感卫星等。