

引用格式: ZHONG Dongzhou, XU Zhe, ZHAO Keke, et al. Exploring of Chaotic Secure Communications with High-speed Using Optical Reservoir Computers[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4):0406005

钟东洲,徐喆,赵可可,等. 基于光学储备池计算的高速混沌保密通信的研究[J]. 光子学报, 2022, 51(4):0406005

基于光学储备池计算的高速混沌保密通信的研究

钟东洲,徐喆,赵可可,胡亚兰,邓万安,侯鹏,张金波

(五邑大学 智能制造学部,广东 江门 529020)

摘要:利用一个带有光反馈和光注入的光泵浦自旋垂直腔表面发射激光器的两个混沌偏振分量形成两个并行储备池计算机。这些储备池用来学习另外一个光泵浦自旋垂直腔表面发射激光器(发射激光器)混沌动力学行为。训练基于自旋垂直腔表面发射激光器的储备池获得一个发射的偏振分量和它相应的训练储备池之间的高质量混沌同步。在这种高质量同步条件以及确保安全性前提下,实现了 16QAM 信息的双信道保密通信。此外,针对两个解密信息,进一步讨论在不同参数下它们的误码率。结果表明,不同参数改变下的误码率均为 0。研究结果表明,时延光学混沌储备池计算为光学混沌保密通信的实际应用提供了一种有效的方法。

关键词:自旋垂直腔面发射激光器;储备池计算;混沌光通信;混沌同步

中图分类号:TN29

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225104.0406005

0 引言

文献[1-3]提出的光泵浦自旋垂直腔表面发射激光器(Spin-Vertical Cavity Surface-Emitting Laser, Spin-VCSEL)比电泵浦 VCSEL 表现出更优越的性能。例如,它们有更快的调制动态、更大的调制带宽,更低的阈值电流。与常规的 VCSEL 相比,它们有更强的偏振控制性^[4-6]。利用这些特性,光泵浦 VCSEL 在高速光通信、光信息处理、数据存储、量子计算、生物传感领域中有新的应用前景。在光泵浦自旋 VCSEL 中,不同形式的超快不稳定现象(包括周期性振荡、偏振转换和混沌动态)被观察^[7-8]。光泵浦自旋 VCSEL 的混沌动态被应用于精准测距^[9-10]、保密通信^[11]等领域。

由于弱材料性和激光腔的各向异性,电泵浦 VCSEL 输出通常包含两个垂直偏振分量(Polarization Component, PC), x 偏振分量(x -PC)和 y 偏振分量(y -PC)^[12-13]。这两个偏振分量有利于实现双信道光通信。近年来,基于电泵浦 VCSEL 的双信道保密通信受到广泛关注^[14-16]。在这些工作中,驱动-响应电泵浦 VCSEL 系统常用于保密通信。在这个系统中,通过引入驱动 VCSEL 的外部扰动和光反馈,能够产生混沌 x -PC 和 y -PC。当响应 VCSEL 的参数与驱动 VCSEL 参数一致时,响应 VCSEL 能够发射相似的混沌 x -PC 和 y -PC。此外,每一对 PC(如两个 x -PC 或两个 y -PC)之间的混沌同步在保密通信的安全性和加密信息解码中扮演重要的角色。然而,高质量混沌同步依赖于如下条件:驱动和响应电泵浦 VCSEL 结构上完全对称,并且它们的参数完全匹配。以前工作表明,由于驱动和响应 VCSEL 中的两个 PC 的存在,这些激光器的结构对称性被破坏,这导致了混沌同步质量的恶化^[17]。在这个不对称结构条件下,通过限制驱动 VCSEL 自反馈延时和信道延时之间时延差,高质量的混沌同步可能被实现^[14]。但是,上面描述的条件和限制在实际中不可持续。由于实际中驱动和响应 VCSEL 之间不可避免地不完美匹配和时延差的瞬时变化,高质量混

基金项目:国家自然科学基金(No.62075168),广东省基础与应用研究基金(No. 2020A151511088),广东省普通高校重点领域专项(No. 2020zdzx3052),广东省普通高校创新团队项目(No.2021KCXTD051)

第一作者:钟东洲(1977—),男,教授,博导,主要研究方向为光子储备池计算、光学混沌计算、激光雷达测距、光学混沌保密通信。Email: dream_yu2002@126.com

收稿日期:2022-01-10;录用日期:2022-02-23

<http://www.photon.ac.cn>

沌同步的实现面临许多实际的挑战。

近年来,深度学习神经网络已经广泛应用于光通信的性能监测以及非线性均衡^[18]。2007年,一个带有单隐层人工神经网络用于预测混沌时间序列^[19]。2019年,基于对混沌同步的深度学习,KE Junxiang和YI Lilin等实验上实现了32 Gb/s的混沌光通信^[20]。上述文献报道的深度学习神经网络是通过软件程序来实现混沌时间序列和混沌同步的预测。然而,使用深度学习神经网络方法对更为复杂的混沌光通信的相关性能进行预测时,需要消耗大量的计算机硬件。2012年,APPELTANT等提出了基于延时反馈的储备池计算(Reservoir Computing,RC)^[21]。与深度神经网络方法相比,基于延时反馈的RC的中心思想是:一个非线性系统作为一个物理节点,通过时间复用方法,实现空间和时间的交换,是一种有效的方法用来简化硬件结构,不需要形成复杂的内部连接结构。因此基于延时反馈的RC是一种简单而有效的神经网络计算硬件实现方法^[22]。它由非线性系统和延时反馈环路组成。其中,非线性系统的瞬时动态被采样后,考虑为虚拟节点状态。最先由非线性电路系统构成时延RC,应用于处理时间相关的信号,其性能可与基于复杂神经网络软件结构的RC性能相比拟^[23-24]。随后,人们相继使用光电反馈系统^[25]、有源非线性光学器件(半导体光放大器^[26]和光反馈半导体激光器^[27]等非线性光学系统构建基于延时反馈的RC。特别注意的是,针对时间序列数据的预测学习,基于非线性半导体激光器的延时反馈RC具有如下优势:快速、高效和并行计算能力。许多工作的研究结果表明,这种方法可以有效地预测电路或非线性光学系统的混沌轨迹^[28-32]、而且能很好预测混沌轨迹的同步。例如,2018年,ANTONIK等实验证明了一个训练的储备池可以产生与驱动混沌系统相似的动力学行为(相似谱、Lyapunov指数等)^[33]。2019年,THOMAS与合作者利用RC对耦合混沌系统进行重构,其重构范围跨越一系列动态关系,包括广义同步^[34]。我们最近的研究工作表明,基于延迟的储备池计算方法可以实现高质量的混沌同步^[35]。因此,基于时延的RC方法为保密通信中混沌同步质量差、不稳定等问题的解决提供了一种有效的途径。

吴正茂等提出基于一个带有光注入和光反馈的VCSEL的延时储备池计算系统^[36]。这种RC被称为基于VCSEL的RC系统。在该系统中,利用VCSEL输出的非线性动态 x 偏振和 y 偏振实现了两个并行储备池计算机。它们能够很好地并行预测两个独立的混沌时间序列。在上述基于VCSEL的RC方案中,使用的激光器几乎都是电泵浦Spin-VCSEL,这种VCSEL的输出 x 偏振和 y 偏振在外部扰动和光学反馈的作用下被不断地转换,从而影响两个并行RC的预测性能。与电泵浦Spin-VCSEL相比,光泵浦Spin-VCSEL除了能对激光器的输出进行灵活的自旋控制之外,还增加了两个关键控制参数,如光泵浦强度和椭圆极化率。基于此,光泵浦Spin-VCSEL具有更好的偏振可控性^[4-6],这有利于实现并行储备池计算。此外,在较短延迟反馈或没有反馈的情况下,它可以产生超快的混沌响应。在足够的虚拟节点情况下,它可以形成非常短的虚拟节点间的间距。这些说明,基于光泵浦VCSEL的两个混沌偏振的两个储备池可以并行处理高速混沌时间序列。

本文利用基于带有光注入和光反馈的光泵浦Spin-VCSEL发射的两个混沌偏振分量作为两个非线性节点,形成两个并行的RC。其中,非线性节点的间距被设置为超短长度。利用这两个RC,论述两对PC的混沌同步质量表现。利用基于两个并行RC的良好的混沌同步,探讨双信道混沌光通信实现方案和性能。其次,探讨采样周期和虚拟节点间距对训练误差的影响,并且评估不同参数空间中混沌同步的预测学习表现。最后,详细分析基于延迟的RC系统被攻击时的安全性。

1 理论和模型

图1给出了利用两个并行RC实现双信道混沌光通信的方案图。VCSEL₁和VCSEL₂都是光泵浦Spin-VCSEL。受到光反馈的VCSEL₁产生的两个混沌偏振分量用于预测学习,其目的是为了实现VCSEL₁和VCSEL₂之间的通信和同步。为了实现两个并行RC,同时受到光注入和光反馈的VCSEL₂产生的两个混沌偏振分量被考虑为非线性节点。CW是连续激光器。6个光隔离器(IS_{*s*})($s=1,2,\dots,6$)用于避免光反馈。中性密度滤波器被用来控制光强度。可变光衰减器(VOA_{*s*})($s=1,2$)被用来控制反馈强度。PM₁和PM₂是相位调制器。偏振控制器(PC_{*s*})($s=1,2,\dots,6$)用于控制光的偏振。光纤分束器(FBS_{*s*})($s=1,2$)用于分离光为两个相同的分量。下标为1~3的光纤偏振分束器(FPBS)用于分离光为两个偏振分量。OSC₁和OSC₂是示

波器。DL₁和DL₂是延迟线。光电探测器(PD_s)(s=1,2,⋯,6)用于将光波转为电流信号。OC是光环形器。FC是光纤耦合器。此外,假设实验方案中所用的光纤长度不足1 km,以致光纤的色散效应和非线性效应可以忽略。

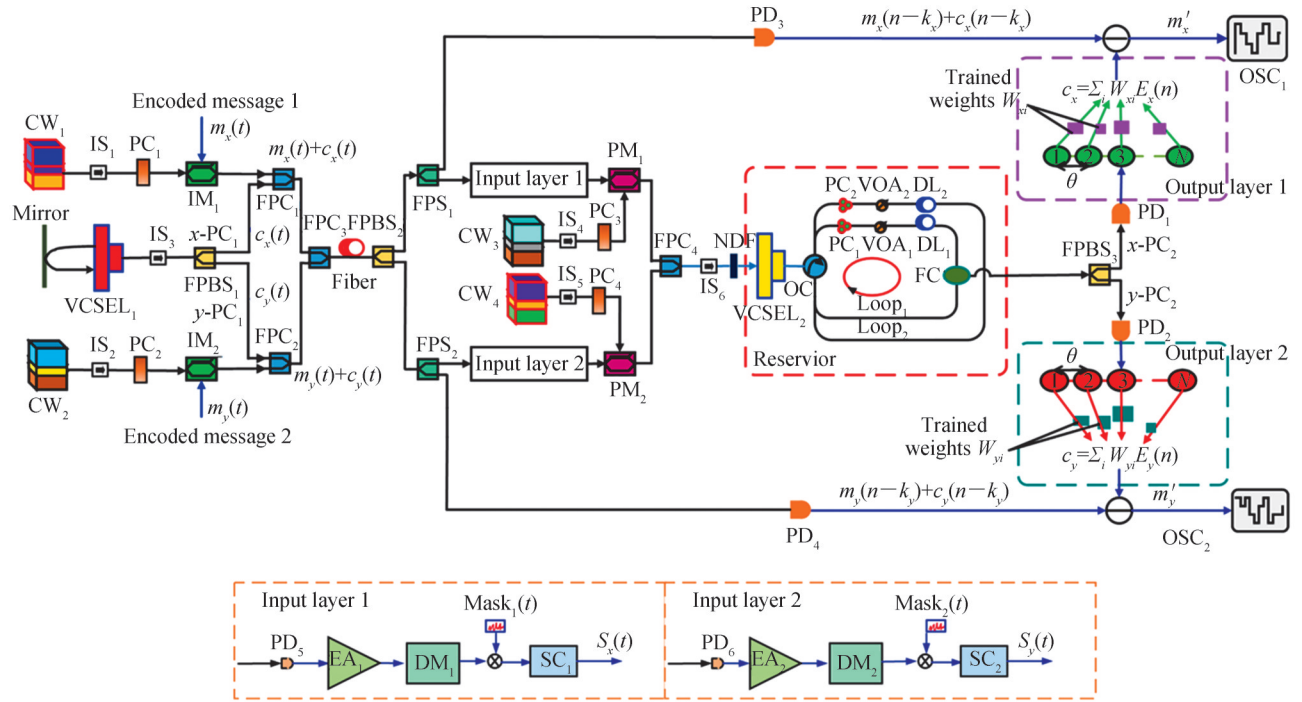


图1 使用基于光泵浦 Spin-VCSEL 的两个偏振分量的并行储备池计算双路混沌光通信方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of dual-channel chaotic optical communication using two parallel reservoir computers based on two polarization components of the optically pumped spin-VCSEL

在该系统中,受到光反馈 VCSEL₁的输出混沌通过 FPBS₁分离成 x -PC₁和 y -PC₁,其光强分别定义为 $c_x(t)$ 和 $c_y(t)$ 。解密信号 1 和 2 分别为 $m_x(t)$ 和 $m_y(t)$ 。利用强度调制器(IM₁和 IM₂), $m_x(t)$ 和 $m_y(t)$ 被分别调制到连续激光器(CW₁和 CW₂)输出的光波。通过 FPC₁和 FPC₂, $m_x(t)$ 和 $m_y(t)$ 被分别隐藏在 $c_x(t)$ 和 $c_y(t)$ 中。两束混合光 [$m_x(t)+c_x(t)$]和 [$m_y(t)+c_y(t)$]通过 FPC₃耦合到光纤中。这些从光纤尾部输出的混合光再一次通过 FPBS₂分离。来自 FPBS₂的混合光 [$m_x(t)+c_x(t)$]通过 FBS₁分离成两束光,其中一束光通过 PD₃转换为电流信号,另一束光注入到输入层 1。来自 FPBS₂的混合光 [$m_y(t)+c_y(t)$]也被分离成两束光,其中一束光通过 PD₄转换成电流信号,另一束光注入到输入层 2。

输入层提供了与储备池的输入连接。两路混合光首先通过 PD₅和 PD₆转换成电流信号,接着被电放大器(EA, $s=1,2$)放大,最后通过离散模块(DMs)采样而作为输入数据。这两路采样数据分别定义为 $u_x(n-L_x)$ 和 $u_y(n-L_y)$ 。这里, $u_x(n-L_x)=m_x(n-L_x)+c_x(n-L_x)$,和 $u_y(n-L_y)=m_y(n-L_y)+c_y(n-L_y)$, n 是离散时间指数, L_x 和 L_y 是分别针对 x -PC₁和 y -PC₁的信道延时的离散长度。特别地,考虑 $c_x(n-L_x)$ 和 $c_y(n-L_y)$ 为两个独立预测目标。这些采样数据分别与一个掩模信号(Mask)相乘。这个 Mask 是一个通过半导体激光器产生的混沌信号^[30,37]。通过比例电路(SC_s)($s=1,2$)以比例系数 γ 进行比例运算后,产生两个输入层的输出信号,其分别命名为 $S_x(t)$ 和 $S_y(t)$ 。然后,利用 PM₁和 PM₂,它们分别被调制到 CW₃和 CW₄光场的相位上。两个调制光场的偏振被调整后,分别与 VCSEL₂的 x -PC₂和 y -PC₂相匹配,然后注入到 VCSEL₂。

在储备池中,受到由双反馈环(Loop₁和 Loop₂)提供的双反馈 VCSEL₂被用来作为非线性节点。从 VCSEL₂输出的 x -PC₂和 y -PC₂的混沌状态被用来作为虚拟节点,以实现两个并行储备池。通过反馈环(Loop₁和 Loop₂),两个偏振分量 x -PC₂和 y -PC₂反馈回 VCSEL₂。在反馈环(Loop₁和 Loop₂)中,光衰减器(VOA₁和 VOA₂)和偏振控制器(PC₁和 PC₂)分别用来控制反馈光束的光强和偏振。沿着延迟线(DL₁和 DL₂)中任意一个的反馈时间考虑为 τ_2 。在输出层, x -PC₂和 y -PC₂通过 FPBS₃进行分离。它们输出的光强

$(I_{2x} = |E_{2x}|^2$ 和 $I_{2y} = |E_{2y}|^2$) 以间隔 θ 进行提取后, 考虑为虚拟节点状态。于是, 沿着每一个延迟线的虚节点数 N 有 $N = \tau_2/\theta$ 。沿着 DL_1 和 DL_2 虚节点状态进行加权和线性求和, 其值分别为 $c'_x(n)$ 和 $c'_y(n)$ 。权重需要使用线性最小二乘法^[37]进行训练, 使得每一个预测目标与相应 RC 输出之间的均方根误差最小。在这样一个系统中, 通个训练输出权重, $c'_x(n)$ 和 $c'_y(n)$ 可能分别同步于 $c_x(n-L_x)$ 和 $c_y(n-L_y)$ 。在这两个良好的同步条件下, 加密信号 $m_x(n-L_x)$ 通过 $u_x(n-L_x)$ 与 $c'_x(n)$ 之间的同步相减而解密, 相应的解密信号定义为 m'_x 。另外一个解密信号 m'_y 可通过 $u_y(n-L_y)$ 与 $c'_y(n)$ 之间的同步相减而获得。

基于自旋翻转模型 (SFM), 受到光反馈的 VCSEL₁ 的非线性动态可以描述为^[38]

$$\frac{dE_{1x}(t)}{dt} = k(1 + i\alpha)[M_1(t)E_{1x}(t) + in_1(t)E_{1y}(t) - E_{1x}(t)] - i\gamma_{1p}E_{1x}(t) - \gamma_{1a}E_{1x}(t) + \sqrt{\beta_{sp}\gamma_1(n_1(t) + M_1(t))}\xi_{1x} + k_{1f}E_{1x}(t - \tau_1)e^{-i\omega_1\tau_1} \quad (1)$$

$$\frac{dE_{1y}(t)}{dt} = k(1 + i\alpha)[M_1(t)E_{1y}(t) + in_1(t)E_{1x}(t) - E_{1y}(t)] - i\gamma_{1p}E_{1y}(t) - \gamma_{1a}E_{1y}(t) + \sqrt{\beta_{sp}\gamma_1(n_1(t) - M_1(t))}\xi_{1y} + k_{1f}E_{1y}(t - \tau_1)e^{-i\omega_1\tau_1} \quad (2)$$

$$\frac{dM_1(t)}{dt} = -\gamma_1[M_1(t)(1 + |E_{1x}(t)|^2 + |E_{1y}(t)|^2)] + \gamma_1\eta - i\gamma_1n_1(t)[E_{1y}(t)E_{1x}^*(t) - E_{1x}(t)E_{1y}^*(t)] \quad (3)$$

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = \gamma_1p\eta - \gamma_{1s}n_1(t) - \gamma_1n_1(t)(|E_{1x}(t)|^2 + |E_{1y}(t)|^2) - i\gamma_1M_1(t)[E_{1y}(t)E_{1x}^*(t) - E_{1x}(t)E_{1y}^*(t)] \quad (4)$$

假定连续激光器 CW₃ 与 CW₄ 有同样的中心频率, 可以得到受到光反馈和光注的 VCSEL₂ 的非线性动力学方程为^[38]

$$\frac{dE_{2x}(t)}{dt} = k(1 + i\alpha)[M_2(t)E_{2x}(t) + in_2(t)E_{2y}(t) - E_{2x}(t)] - i(\gamma_{2p} + \Delta\omega)E_{2x}(t) - \gamma_{2a}E_{2x}(t) + \sqrt{\beta_{sp}\gamma_2(n_2(t) + M_2(t))}\xi_x + k_{2f}E_{2x}(t - \tau_2)e^{-i\omega_2\tau_2} + k_xE_{x, inj} \quad (5)$$

$$\frac{dE_{2y}(t)}{dt} = k(1 + i\alpha)[M_2(t)E_{2y}(t) + in_2(t)E_{2x}(t) - E_{2y}(t)] + i(\gamma_{2p} - \Delta\omega)E_{2y}(t) - \gamma_{2a}E_{2y}(t) + \sqrt{\beta_{sp}\gamma_2(n_2(t) - M_2(t))}\xi_y + k_{2f}E_{2y}(t - \tau_2)e^{-i\omega_2\tau_2} + k_yE_{y, inj} \quad (6)$$

$$\frac{dM_2(t)}{dt} = -\gamma_2[M_2(t)(1 + |E_{2x}(t)|^2 + |E_{2y}(t)|^2)] + \gamma_2\eta - i\gamma_2n_2(t)[E_{2y}(t)E_{2x}^*(t) - E_{2x}(t)E_{2y}^*(t)] \quad (7)$$

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = \gamma_2p\eta - \gamma_{2s}n_2(t) - \gamma_2n_2(t)(|E_{2x}(t)|^2 + |E_{2y}(t)|^2) - i\gamma_2M_2(t)[E_{2y}(t)E_{2x}^*(t) - E_{2x}(t)E_{2y}^*(t)] \quad (8)$$

式中, E_x 和 E_y 分别是 x -PC 和 y -PC 的复慢变振幅。下标 $1x$ 和 $1y$ 分别表示 VCSEL₁ 的 x -PC 和 y -PC。下标 $2x$ 和 $2y$ 分别表示 VCSEL₂ 的 x -PC 和 y -PC。在这两个激光器中, 圆偏振电场分量通过晶体双折射进行耦合, 其以速率 γ_p 和二色性 γ_a 为特征。式(1)~(8)中出现的归一化载流子变 M 和 n 分别表示为 $M = (n_+ + n_-)/2$ 和 $n = (n - n_-)/2$, 其中 n_+ 和 n_- 分别为上旋和下旋的归一化电子浓度; k 为腔衰减速率; α 为线宽增强因子; γ_1 和 γ_2 为电子浓度衰减速率; γ_{1s} 和 γ_{2s} 为自旋弛豫速率; η 是归一化泵浦率; p 为泵浦偏振椭圆率^[9]; k_{1f} 和 k_{2f} 为反馈强度; k_x 和 k_y 分别是 x -PC₂ 和 y -PC₂ 的注入强度; $E_{x, inj}$ 和 $E_{y, inj}$ 分别是来自连续激光器 CW₃ 和 CW₄ 的注入光场复振幅。 $\Delta\omega$ 是 VCSEL₂ 与 CW₃(CW₄) 之间的中心频率失谐; ω_1 和 ω_2 分别是 VCSEL₁ 和 VCSEL₂ 的中心频率; β_{sp} 是自发辐射系数, 也可以看作是噪声强度。 $\xi_{1x}, \xi_{2x}, \xi_{1y}$ 和 ξ_{2y} 均为独立的高斯白噪声, 其均值为 0 和方差为 1, 其中, $\langle \xi_i(t)\xi_j^*(t') \rangle = 2\delta_{ij}\delta(t - t')$ 。

注入的复电场振幅 $E_{x, inj}$ 和 $E_{y, inj}$ 可以描述为^[36]

$$E_{j, inj}(t) = \sqrt{I_d} e^{i\text{inS}_j(t)} \quad j = x, y \quad (9)$$

式中, I_d 为来自连续激光器 CW₃ 激光器或 CW₄ 输出光强。 $S_j(t)$ 表示掩模输入信号, 表示为

$$S_j(t) = \text{Mask}_j(t) \times [u_j(n - L_j)] \times \gamma \quad (10)$$

式中, 掩模 Mask 是混沌信号^[30, 37]。 γ 是比例因子。 $L_x = \tau_x/h$ 和 $L_y = \tau_y/h$, h 为步长, τ_x 和 τ_y 分别为 x -PC₁ 和 y -PC₁ 的信道延迟。

在如图1所给出的系统中,每对偏振分量(两个 x -PC或者两个 y -PC)强度之间的混沌同步在安全性和加密信号恢复中起着关键作用。下面,使用储备池计算方法,讨论混沌同步问题。根据滞后混沌同步理论,得到滞后同步解为

$$c'_x(n) = c_x(n - L_x), c'_y(n) = c_y(n - L_y) \quad (11)$$

其中与时间相关的输出 $c'_x(n)$ 和 $c'_y(n)$ 考虑为来自 x -PC₂和 y -PC₂的输出光强状态的线性函数,表示为

$$c'_x(n) = W_{x,1}b_{\text{out}} + W_{x,2}c_x(n) + \sum_{i=1}^N W_{x,i+2}I_{2x,i}(n) \quad (12)$$

$$c'_y(n) = W_{y,1}b_{\text{out}} + W_{y,2}c_y(n) + \sum_{i=1}^N W_{y,i+2}I_{2y,i}(n) \quad (13)$$

式中, W_x 和 W_y 都是输出权重矩阵; $W_{x,i}$ 和 $W_{y,i}$ 分别是 W_x 和 W_y 的第 i 个元素; $I_{2x,i}(n)$ 和 $I_{2y,i}(n)$ 分别表示两个偏振分量(x -PC₂和 y -PC₂)光强的第 i 个输出状态; b_{out} 是一个常数且等于1。 W_x 和 W_y 可以通过线性岭回归方法计算,其表达式见文献[32]。在完全的延迟同步下[见式(11)],可以得到

$$\begin{cases} m'_x(n) \approx m_x(n - L_x) \\ m'_y(n) \approx m_y(n - L_y) \end{cases} \quad (14)$$

2 结果与讨论

在本文计算中,VCSEL₁和VCSEL₂的参数值见表1。VCSEL₁和VCSEL₂的中心波长均为1 550 nm。加密信息 $m_x(n)$ 和 $m_y(n)$ 都是正交幅度调制信号(16QAM)。 $u_x(n-L_x)$ 和 $u_y(n-L_y)$ 的采样频率为 $1/T_0$ 。式(1)~(8)通过四阶龙格-库塔方法进行数值解,其步长为0.1 ps。在这个系统中,16QAM信号的速率和储备池数据处理速率依赖于VCSEL₁和VCSEL₂有效带宽。图2(a)和2(b)分别描述了VCSEL₁输出的 x -PC₁和 y -

表1 文中用于计算的参数值
Table 1 The parameter values used for calculation

The parameter and symbol	Value	The parameter and symbol	Value
The field decay rate k	300 ns^{-1}	Feedback delay time τ_1	0.5 ns
Line-width enhancement factor a	3	Feedback delay time τ_2	200 ps
Birefringence γ_{1p}	20 ns^{-1}	Pump power η	10
Birefringence γ_{2p}	200 ns^{-1}	Polarization ellipticity P	-1
Dichroism γ_{1a}	0.4 ns^{-1}	Injection strength k_x, k_y	12 ns^{-1}
Dichroism γ_{2a}	0 ns^{-1}	Feedback strength k_{1f}	3.5 ns^{-1}
Electron density decay rate γ_1, γ_2	1 ns^{-1}	Feedback strength k_{2f}	10 ns^{-1}
Frequency detuning $\Delta\omega$	$-80 \times 10^9 \text{ rad/s}$	Central frequency ω_1, ω_2	$12e^{14} \text{ rad/s}$
spin relaxation rate γ_{1s}	50 ns^{-1}	Central wavelength	1 550 nm

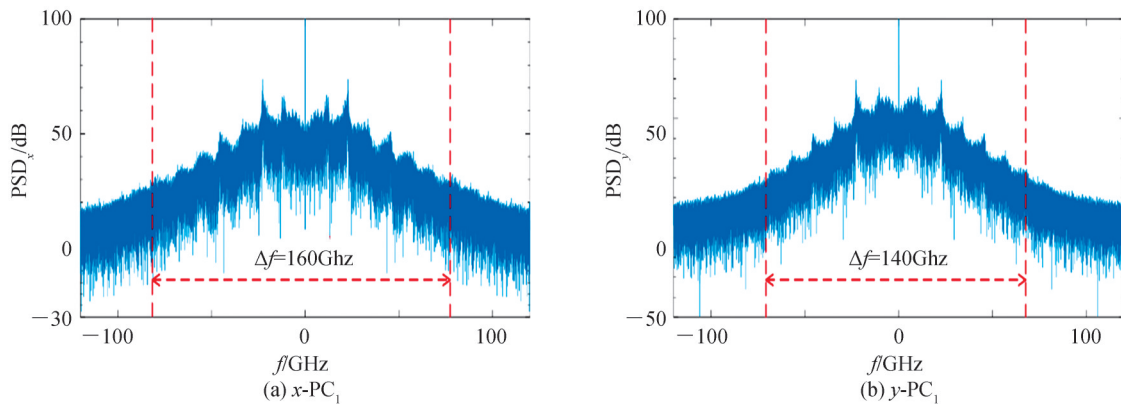


图2 VCSEL₁输出的 x -PC₁和 y -PC₁的功率谱密度分布
Fig. 2 PSD distributions of the x -PC₁ and y -PC₁ from the VCSEL₁ output

PC₁的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)分布。这里, PSD_{*x*}是*x*-PC₁的PSD; PSD_{*y*}是*y*-PC₁的PSD。从图2中可以看出, *x*-PC₁和*y*-PC₁的有效3 dB带宽分别为160 GHz和140 GHz。同样, 获得*x*-PC₂和*y*-PC₂的有效带宽分别约为160 GHz和140 GHz, 这表明在该系统可以实现高速混沌光通信。

这里, *x*-PC₂和*y*-PC₂用来分别执行混沌*x*-PC₁和*y*-PC₁的预测。延迟输出*x*-PC₁和*y*-PC₁中的11 000个采样数据, 作为两个输入数据, 采样10 ps间隔进行记录。为了消除暂态, 首先丢弃最前面的1 000个采样数据, 然后使用后面的5 000个采样数据对储备池进行训练, 最后使用余下5 000个采样数据对储备池进行预测。此外, 两个掩模信号都是由SL产生的混沌信号, 其见文献[30, 37]。调整这些掩模信号的振幅, 使其标准差为1, 平均值为0。每个储备池的虚拟节点的间隔用 θ 表示, 并设置为1 ps。输入数据的采样周期 T_0 设置为200 ps, 因此16 QAM速率为5 Gb/s。虚拟节点数 N 为200。这里, $N = \tau_2/\theta$ 和 $\tau_2 = T_0$ 。比例因子 γ 设置为1。针对这两个预测任务, 计算目标值 $c_x(n-L_x)$ 和储备池输出 $c'_x(n)$ 之间的归一化均平方误差(Normalized Mean Squared Error, NMSE), 以测量基于*x*-PC₂储备池的性能, 此外, $c_y(n-L_y)$ 和 $c'_y(n)$ 之间的NMSE被进一步计算, 其计算结果是为了测量基于*x*-PC₂的储备池的性能。其描述为

$$\text{NMSE}_{x,y} = \frac{1}{L} \frac{\sum_{n=1}^L (c'_{x,y}(n) - c_{x,y}(n-L_{x,y}))^2}{\text{var}(c'_{x,y}(n))} \quad (15)$$

式中, 下标*x*和*y*分别代表*x*-PC和*y*-PC, L 是测试数据序列中的数据总数, var表示方差; NMSE_{*x*}或NMSE_{*y*}表示目标值与其相应的储备池输出偏离程度。当NMSE_{*x*}、NMSE_{*y*}=0时, $c'_x(n)$ 和 $c'_y(n)$ 分别与 $c_x(n-L_x)$ 和 $c_y(n-L_y)$ 完全匹配。假如NMSE_{*x*}、NMSE_{*y*}=1, $c'_x(n)$ 和 $c'_y(n)$ 分别与 $c_x(n-L_x)$ 和 $c_y(n-L_y)$ 完全失配。此外, 当NMSE_{*x*}和NMSE_{*y*}均小于0.1时, 两个储备池对两个目标能良好的预测。

为了直观地观察基于VCSEL₂的储备池系统对*x*-PC₁和*y*-PC₁混沌动力学的预测能力, 图3给出了 $N=200$ 的预测结果。这里, $T=200$ ps, $\theta=1$ ps; $\gamma=1$; $\tau_x=15$ ns; $\tau_y=15$ ns; $\eta=10$; $k_{1t}=3.5$ ns⁻¹; $k_{2t}=10$ ns⁻¹; $k_x, k_y=12$ ns⁻¹。 $c_x(n-L_x)$ 和 $c_y(n-L_y)$ 是两个预测目标。 $c'_x(n)$, $c'_y(n)$ 分别是基于*x*-PC₂的储备池和基于*y*-PC₂的储备池的输出。从图中可以看出, $c_x(n-L_x)$ 与 $c'_x(n)$ 、以及 $c_y(n-L_y)$ 与 $c'_y(n)$ 的曲线基本一致。在 $T_0=200$ ps和 $\theta=1$ ps的条件下, 对 $c_x(n-L_x)$ 预测的NMSE_{*x*}为0.047, 对 $c_y(n-L_y)$ 预测的NMSE_{*y*}为0.044(见图3(a))。这些意味着, 这两个储备池可以分别准确地预测*x*-PC₁和*y*-PC₁的混沌动力学。

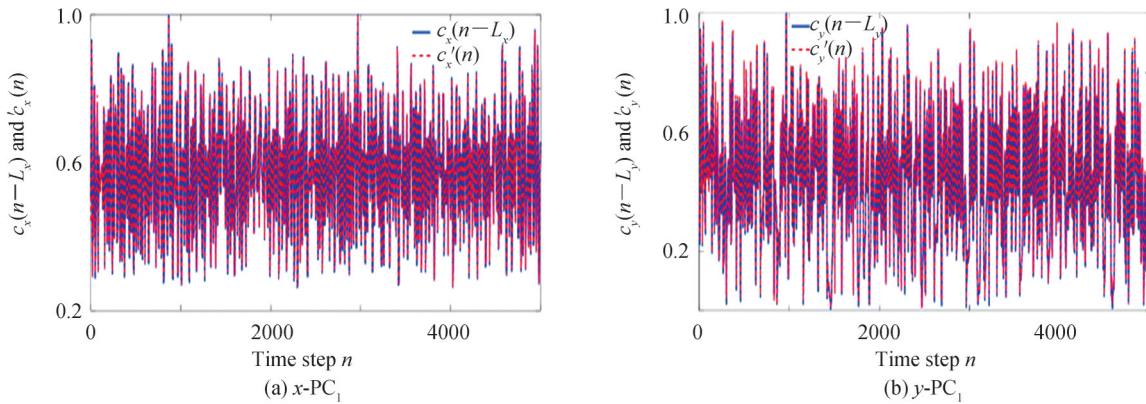


图3 混沌序列预测轨迹

Fig. 3 Trajectory of chaotic sequence prediction

为了进一步观察两个关键参数(T_0 和 θ)对这两个储备池预测能力的影响, 当 $\theta=1$ ps时, 图4是两个训练误差(NMSE_{*x*}和NMSE_{*y*})与采样周期 T_0 的依赖关系。这里, 除 T_0 外的参数与图3中的参数相同。从图4中可以看出, 当 T_0 介于100 ps到500 ps之间时, NMSE_{*x*}小于0.058 2, 和NMSE_{*y*}小于0.054 3。然而, 这两个训练误差随着 T_0 的增加而振荡减小。较长的采样周期 T_0 导致训练误差振荡减小的原因可以解释为: 在本文中, $\theta = T_0/N$ 固定在1 ps, 较小的 N 伴随着较小的 T_0 。这意味着状态空间有更低的维数, 使得系统的训练实现更加困难, 从而导致更大的NMSE。

此外, NMSE_{*x*}和NMSE_{*y*}随虚拟节点间距 θ 的依赖关系如图5所示, 其中, 除 θ 外的参数与图3中相同。

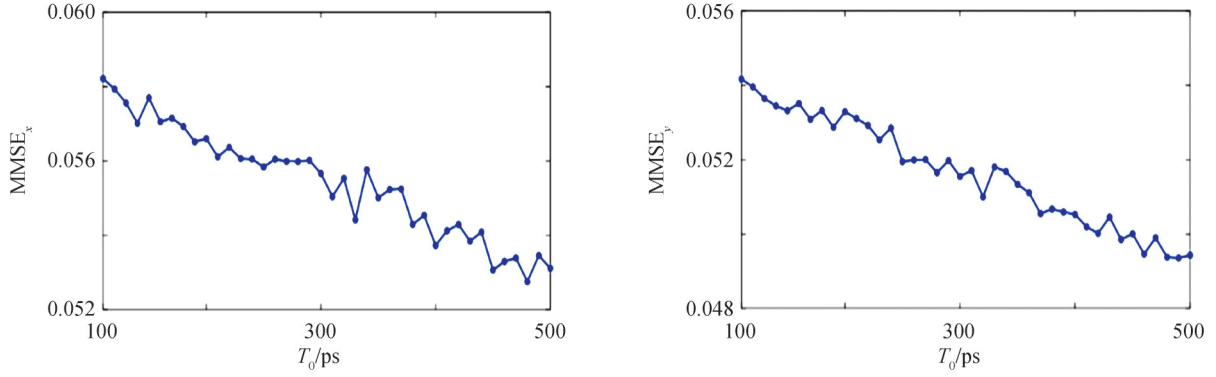

 图4 $NMSE_x$, $NMSE_y$ 与采样周期 T_0 的依赖关系

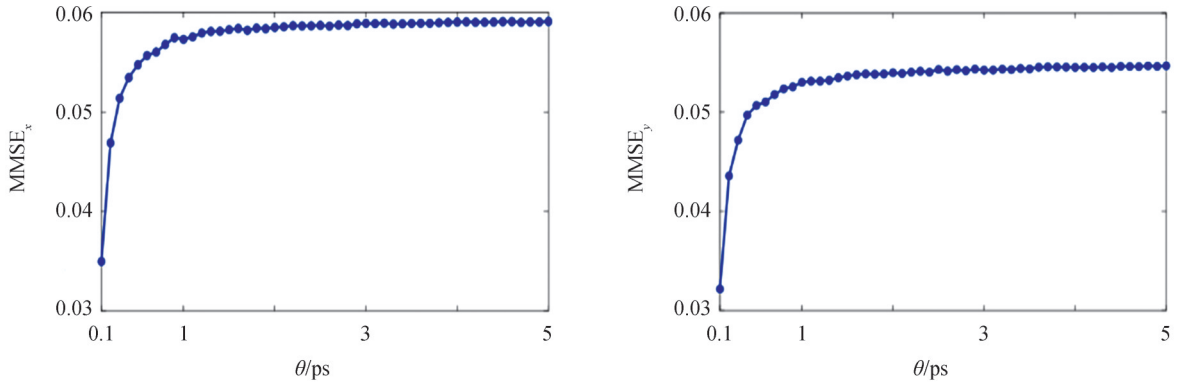
 Fig. 4 Dependence of $NMSE_x$ and $NMSE_y$ on the sampling period T_0

 图5 $NMSE_x$, $NMSE_y$ 与虚拟节点间距 θ 的依赖关系

 Fig. 5 Dependence of $NMSE_x$ and $NMSE_y$ on the virtual node interval θ

从图5中可以看出:当 θ 从0.1 ps增加到1 ps时, $NMSE_x$ 和 $NMSE_y$ 分别快速地增加到0.055和0.051;当 θ 从1 ps进一步增加到5 ps, $NMSE_x$ 和 $NMSE_y$ 分别逐渐稳定在0.059和0.0526。这可以解释为:在图1所示的两个超短反馈环中,当 $T_0=N\theta$ 固定在200 ps时,较大的 θ 伴随着较小的 N ,说明此时具有较低的空间维数。在这种情况下,训练的储备池对目标信号的预测变得不稳定和更加困难。此外,一个大的 θ 可以导致两个相邻节点之间不够耦合。结果,上述两个因素的联合作用可能会导致相对较差的性能。从图5可以看出,基于 x -PC₂的储备池和基于 y -PC₂的储备池可以分别复制 x -PC₁和 y -PC₁的延迟混沌动力学行为。为了进一步观察基于VCSEL的储备池方法所获得混沌同步质量,相关系数被引进并且表示为

$$\rho_{x,y} = \frac{\langle [I_{x,y}(n-L_{x,y}) - \langle I_{x,y}(n-L_{x,y}) \rangle] [I'_{x,y}(n) - \langle I'_{x,y}(n) \rangle] \rangle}{\left\{ \langle [I_{x,y}(n-L_{x,y}) - \langle I_{x,y}(n-L_{x,y}) \rangle]^2 \rangle \langle [I'_{x,y}(n) - \langle I'_{x,y}(n) \rangle]^2 \rangle \right\}^{1/2}} \quad (13)$$

式中, $I'_{x,y}(n) = |c'_{x,y}(n)|$ 和 $I_{x,y}(n-L_{x,y}) = |c_{x,y}(n-L_{x,y})|$,符号 $\langle \rangle$ 表示时间平均值。 ρ 介于从-1到1。随着 ρ 的绝对值越大,可以获得的更高的同步质量。当 ρ 等于 ± 1 时,该系统中存在同相和反相同步。

当 $T=200$ ps, $\theta=1$ ps, $N=200$, $\tau_x=15$ ns, $\tau_y=15$ ns时,图6给出了相关系数(ρ_x 和 ρ_y)在两个不同的参数空间中的演化。图6(a)是在 η 和 γ 参数空间中的相关系数演化,其中, $\Delta\omega=-80 \times 10^9$ rad/s, $k_{2f}=10$ ns⁻¹, $k_x=k_y=12$ ns⁻¹。从图6(a)可以看出,当 η 介于1到5之间, γ 介于0.1到2之间时, ρ_x 和 ρ_y 分别大于0.943和0.965。图6(b)是在 $\Delta\omega$ 和 γ 参数空间中相关系数演化,其中, $\eta=10$, $k_{2f}=10$ ns⁻¹, $k_x=k_y=12$ ns⁻¹。从图6(b)可以看出,当 $\Delta\omega$ 变化范围介于 -80×10^9 rad/s到 80×10^9 rad/s间时, γ 变化范围介于0.1到2时, ρ_x 和 ρ_y 分别大于0.943和0.971。图6(c)是在 k_{2f} 和 η 参数空间中相关系数演化,这里, $\gamma=1$, $\Delta\omega=-80 \times 10^9$ rad/s, $k_x=k_y=12$ ns⁻¹。从图6(c)可以发现,当 k_{2f} 从1 ns⁻¹增加到20 ns⁻¹时,以及 η 从1增加到15时, ρ_x 和 ρ_y 分别大于0.89和0.92。此外,在 k_{2f} 和 η 的非常大空间中, ρ_x 和 ρ_y 均大于0.96。图6(d)是在 k_{2f} 和 $k_x(k_y)$ 参数空间中相关系数演

化, $\gamma=1$, $\Delta\omega=-80\times 10^9\text{ rad/s}$, $\eta=10$ 。从图 6(d)可以看出,在 1 ns^{-1} 到 20 ns^{-1} 的范围内, $k_x(k_y)$ 在 0.1 ns^{-1} 和 20 ns^{-1} 的范围内, ρ_x 和 ρ_y 分别超过 0.935 和 0.964。图 6(e)是在 η 和 $\Delta\omega$ 参数空间中相关系数演化,其中 $k_{2f}=10\text{ ns}^{-1}$, $k_x=k_y=12\text{ ns}^{-1}$, $\gamma=1$ 。从图 6(e)可以看出, ρ_x 和 ρ_y 分别超过 0.926 和 0.965。这些结果表明,即使 VCSEL₁ 和 VCSEL₂ 中的一些关键参数存在不匹配,基于 x -PC₂ 的储备池和基于 y -PC₂ 的储备池也可以分别与延迟的 x -PC₁ 和 y -PC₁ 能很好地同步。这里,当系统关键参数进行优化后,如 $T_0=200\text{ ps}$, $\theta=1\text{ ps}$, $\gamma=1$, $\tau_x=15\text{ ns}$, $\tau_y=15\text{ ns}$, $\eta=10$, $k_{1f}=3.5\text{ ns}^{-1}$, $k_{2f}=10\text{ ns}^{-1}$, $k_x(k_y)=12\text{ ns}^{-1}$, ρ_x 和 ρ_y 分别为 0.96 和 0.97。

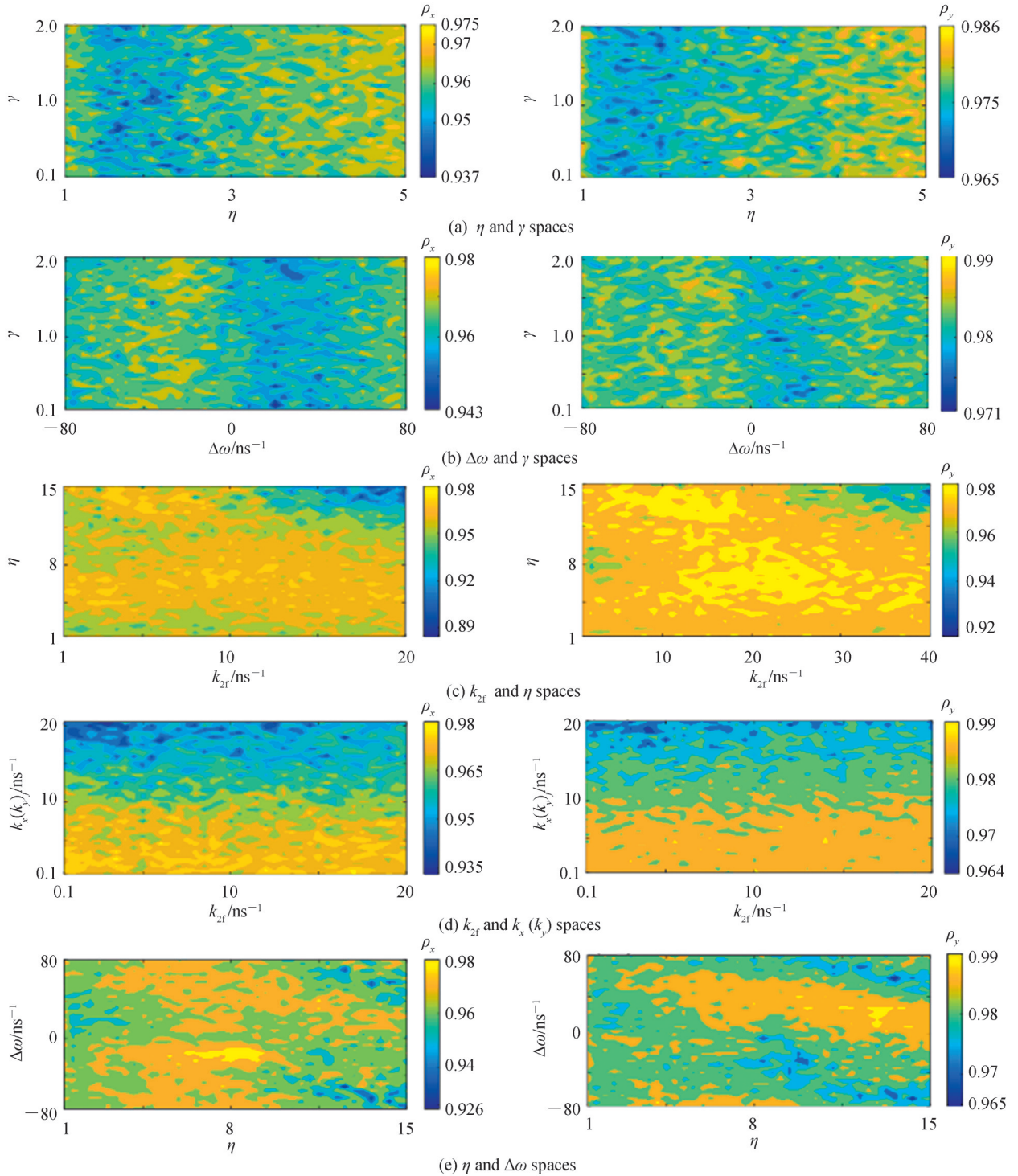


图 6 不同参数空间中相关系数(ρ_x, ρ_y)的演化

Fig. 6 Maps of the evolutions of the correlation coefficients (ρ_x, ρ_y) in different parameter spaces

为了观察在带有不同速率16QAM情况下,不同参数变化对相关系数 ρ_x 和 ρ_y 的影响,图7给出了相关的结果。图7(a)描述了 ρ_x 和 ρ_y 与 $\Delta\omega$ 的依赖关系,可以看出,当 $\Delta\omega$ 从 ρ_x 和 ρ_y 从 -80×10^9 rad/s增大到 80×10^9 rad/s时,在16QAM速率为5 Gb/s情况下, ρ_x 和 ρ_y 分别在0.978和0.986以及0.976和0.989之间振荡变化。当16QAM速率增至10 Gb/s时, ρ_x 和 ρ_y 分别在0.956和0.977以及0.957和0.978之间振荡变化。图7(b)给出了 ρ_x, ρ_y 与 $k_x(k_y)$ 的依赖关系,可以看出,当 $k_x(k_y)$ 从 0.1 ns^{-1} 增大到 20 ns^{-1} 时,对于速率为5 Gb/s的16QAM, ρ_x 和 ρ_y 分别在0.965和0.982以及0.981和0.989之间振荡变化。而对于速率为10 Gb/s的16QAM, ρ_x 和 ρ_y 分别在0.938和0.962以及0.964和0.978之间振荡变化。图7(c)描述了 ρ_x, ρ_y 与 k_{2t} 依赖关系,可以看出,当 k_{2t} 在 1 ns^{-1} 和 20 ns^{-1} 之间变化时,在16QAM速率为5 Gb/s情况下, ρ_x 和 ρ_y 分别在0.968和0.986以及0.977和0.991之间振荡变化。在16QAM速率为10 Gb/s条件下, ρ_x 和 ρ_y 分别在0.949和0.978以及0.947和0.98之间振荡变化。图7(d)给出了 ρ_x, ρ_y 与 η 依赖关系,可以看出,当 η 在1和15之间变化时,对于速率为5 Gb/s的16QAM, ρ_x 和 ρ_y 分别在0.964和0.981以及0.976和0.988之间振荡变化。对于速率为10 Gb/s的16QAM, ρ_x 和 ρ_y 分别在0.942和0.965以及0.955和0.974之间振荡变化。这些结果表明,随着16QAM信号速率的增加,基于 $x\text{-PC}_2$ 的储备池与延迟的 $x\text{-PC}_1$ 之间的同步质量以及基于 $y\text{-PC}_2$ 的储备池与 $y\text{-PC}_1$ 之间的同步质量开始略微降低。这是因为16QAM信号速率取决于采样周期 T_0 ,随着其速率增大, T 随之减小。根据 $T_0=N\theta$,在保证虚拟节点间隔 θ 不变情况下, T_0 的减小会导致虚拟节点数量 N 减小。此时,这两个储备池具有较低的空间维数。在这种情况下,这两个储备池对目标信号的预测变得略为困难。

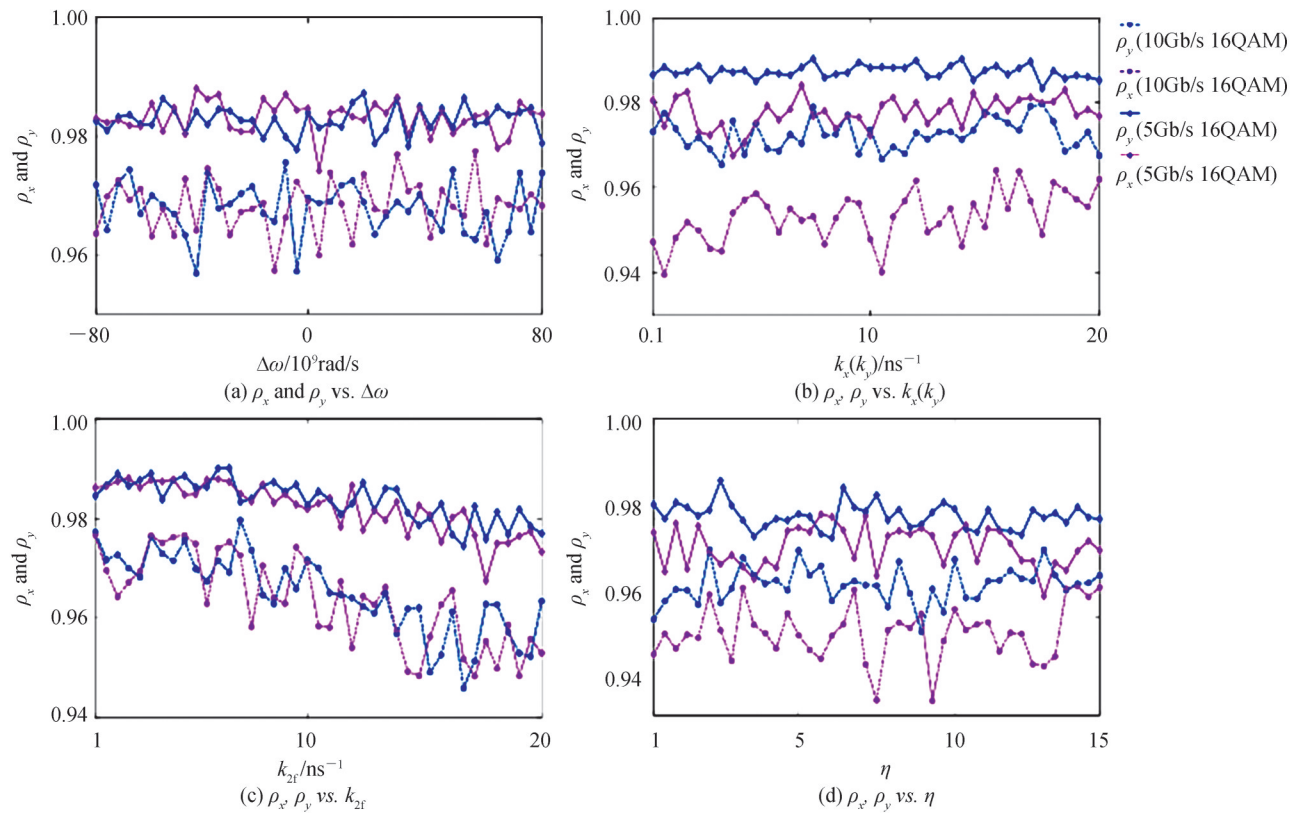


图7 相关系数 ρ_x 和 ρ_y 与不同参数的依赖关系
Fig. 7 Dependences of ρ_x and ρ_y on different parameters

这里,为了获得系统高的混沌同步质量($\rho_x=0.96$ 和 $\rho_y=0.97$),一些关键参数取值如下: $T_0=200$ ps, $\theta=1$ ps, $\gamma=1$, $\tau_x=15$ ns, $\tau_y=15$ ns, $\eta=10$, $k_{1t}=3.5 \text{ ns}^{-1}$, $k_{2t}=10 \text{ ns}^{-1}$, $k_x(k_y)=12 \text{ ns}^{-1}$, ρ_x 和 ρ_y 分别取0.96和0.97。在每对PC之间的高质量混沌同步通过使用两个训练储备池实现后,每一路16QAM通过储备池产生的混沌与混沌掩模信息相减而解调。图8给出了系统中编码信号、混合信号、解码信号的时间轨迹和星座图。这里,图8(a)是延迟加密信号 $m_x(n-L_x)$,混合信号 $u_x(n-L_x)$ 和解码信息 $m'_x(n)$ 的星座图,图8(b)是他们的时间轨迹;图8(c)分别给出了 $m_y(n-L_y)$, $u_y(n-L_y)$ 和 $m'_y(n)$ 的星座图,图8(d)是他们的时间轨迹。从

图8第二列可以看出,它们的星座轨迹和时间轨迹是完全混沌的。与延迟加密16 QAM相比,如图8第三列所示,解密信号 $[m'_x(n)$ 和 $m'_y(n)]$ 质量只有轻微地变差。此外,图9给出了延迟加密信息和它们的相应的解密信号的眼图。这里,图9(a)-(b)分别给出了 $m_x(n-L_x)$ 及其解密信号 $m'_x(n)$ 的眼图,图9(c)、(d)是 $m_y(n-L_y)$ 及其解密信号 $m'_y(n)$ 的眼图。从图9可以发现,延迟加密信号 $[m_x(n-L_x)]$ 眼图中的“眼睛”张开度与解密信号的“眼睛”张开度几乎一致。 $m_y(n-L_y)$ 眼图中的“眼睛”张开度与解密信号的“眼睛”张开度略有不同。其原因是:非常小的同步误差可能被转换成噪声,这导致了信噪比轻微的恶化。

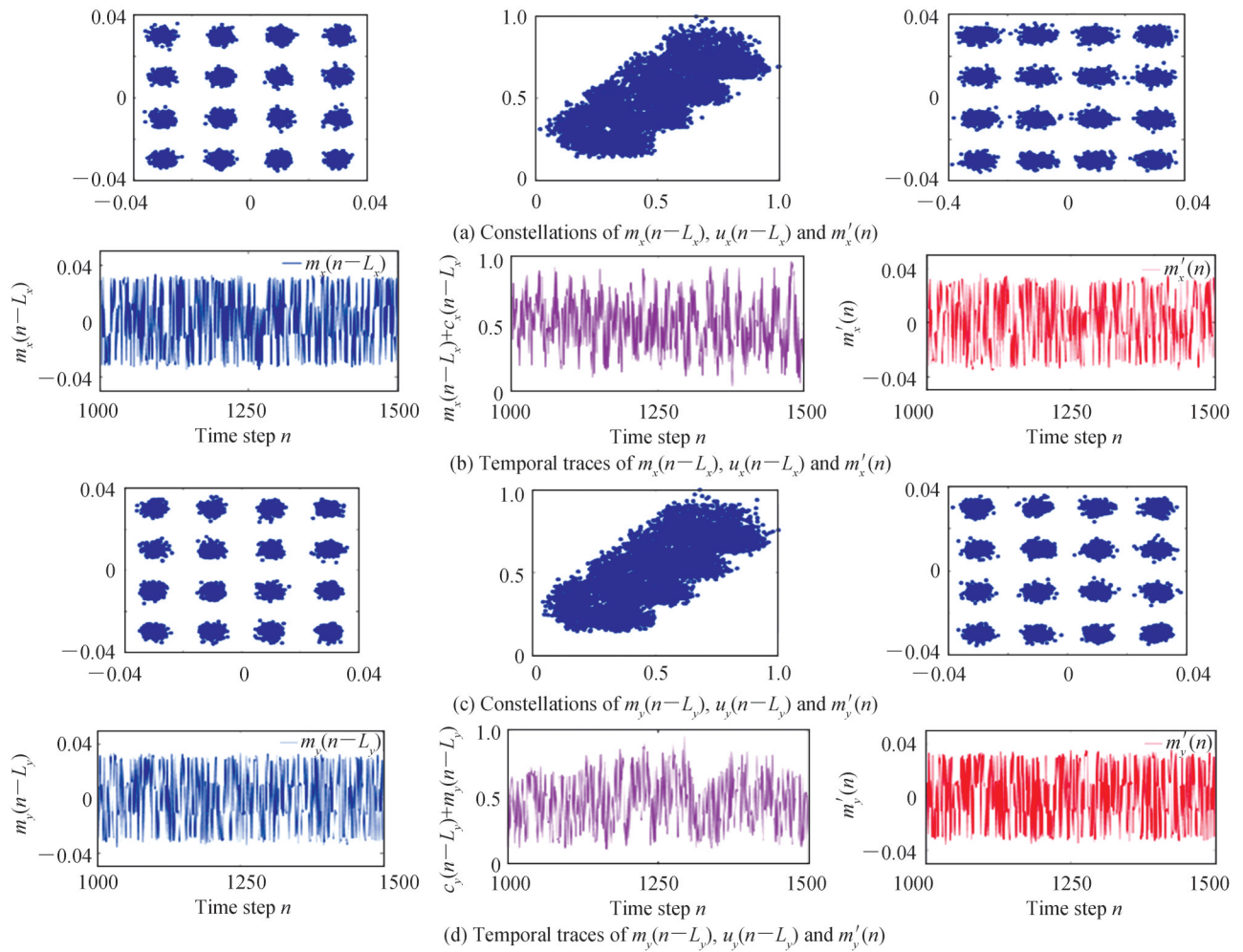
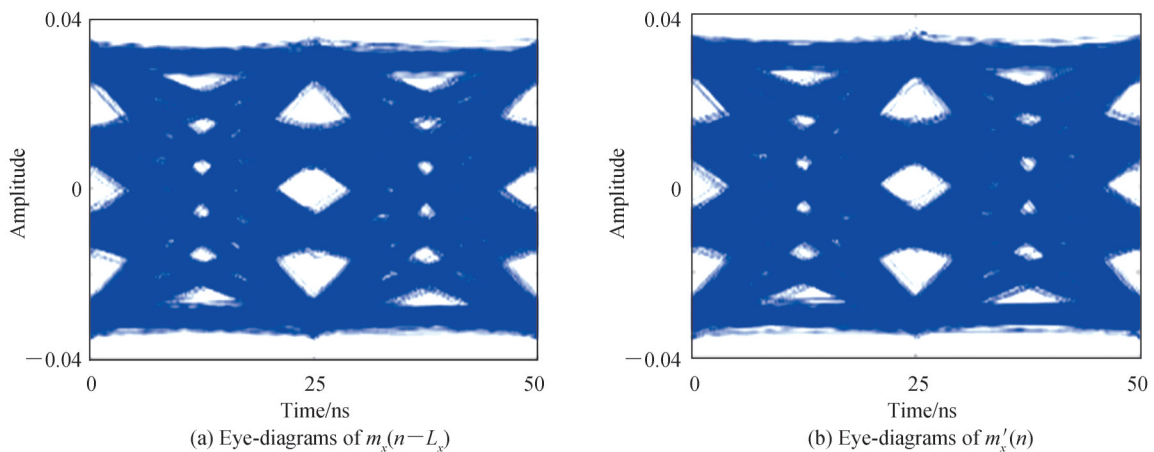


图8 系统中编码信号、混合信号、解密信号的时间轨迹和星座图

Fig. 8 Temporal traces and constellations of the encoded, chaos-masked, decoded 16 QAM messages in the system



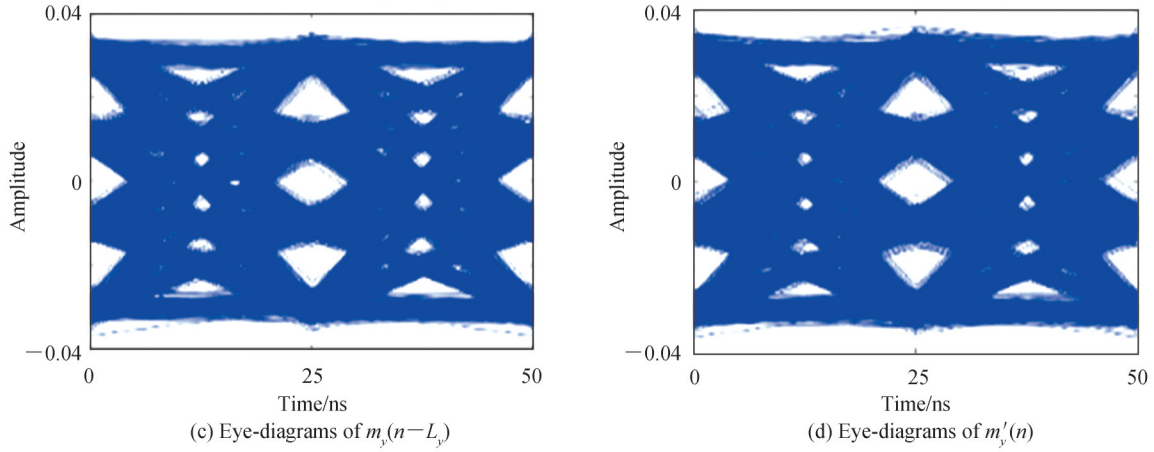


图9 延迟加密信号及其对应的解密信号的眼图

Fig. 9 Eye-diagrams of the delayed encoding messages and their corresponding decoded messages

图10(a)~10(d)给出了在不同参数(例如, k_x (k_y), k_{2f} , η 和 γ)条件下的误比特率(Bit Error Rate, BER)表现。本实验预测序列包含5 000个16QAM信号,对应20 000个比特,误比特率定义为错误比特数传输总比特数的比值。如图10(a)~(d)所示,随着 k_x 或 k_y 从 1 ns^{-1} 增加到 20 ns^{-1} , k_{2f} 从 1 ns^{-1} 增加到 20 ns^{-1} , η 从1增加到15, γ 从1增加到15, 和的BER始终为0,这意味着解密信号能有效地解调。

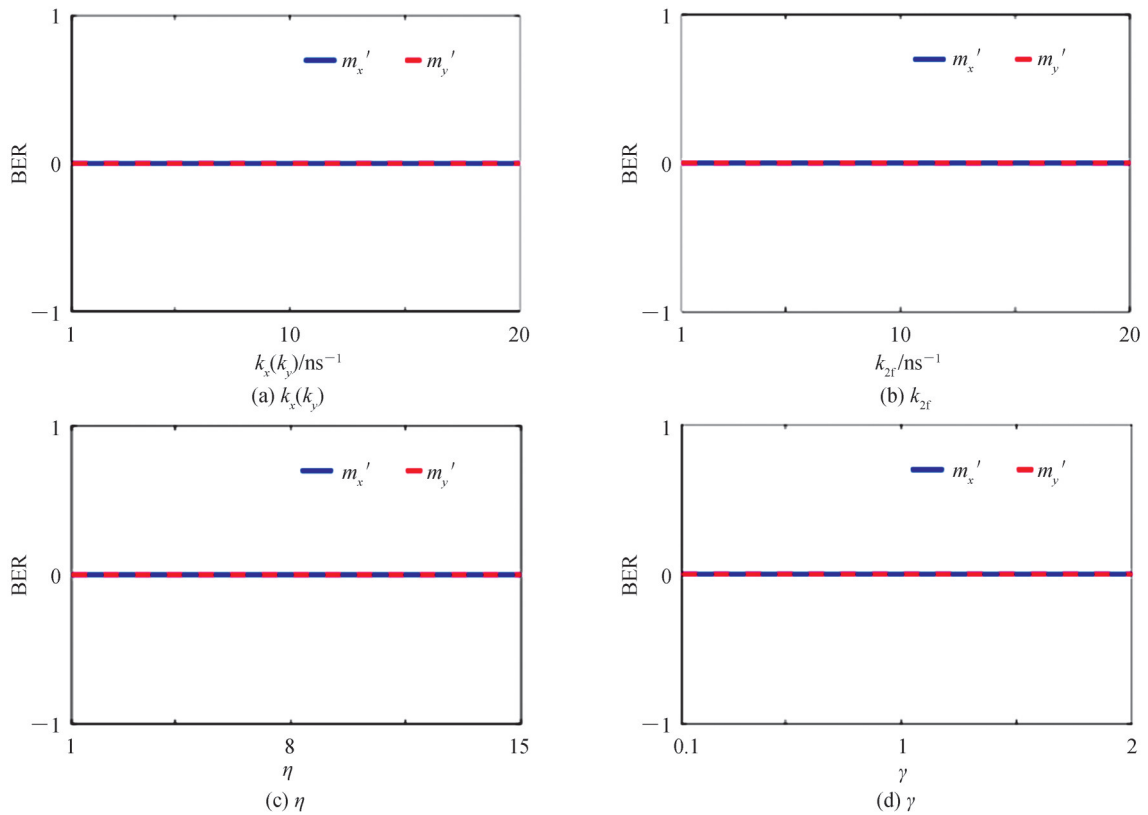

 图10 解密信号 $m'_x(n)$ 和 $m'_y(n)$ 的误比特率(BER)对不同参数的依赖关系

 Fig. 10 Dependences of the BERs of the decoded messages $m'_x(n)$ and $m'_y(n)$ on different parameters

讨论窃听者是否有可能攻击基于储备池计算机的光混沌通信系统。首先,从 VCSEL_1 输出的混沌波形取决于其参数和初始值。这些参数的微小变化可能会导致完全不同的混沌波形。在不同的混沌波形训练下,基于 VCSEL_2 的储备池会产生不同的输出。因此,带有与表1所示的保密参数相失配参数的 VCSEL_1 输出动态不可能与基于 VCSEL_2 的储备池输出的非线性行为相似,其中,这个储备池通过 VCSEL_1 发射的混沌

波形进行训练。这表明,通过重建 VCSEL₁的参数,几乎不可能破译加密信息。在图 11 中,证明了攻击者不能使用与 VCSEL₁ 保密参数不匹配的第一组参数组合来破译加密信息。图 11 给出了在带有不同参数组合的 VCSEL₁ 中,通过经由不同混沌掩模信号训练的两个并行储备池而获得的混沌同步和眼图。这里,针对图 11(a),第一组参数的组合为: $k=250 \text{ ns}^{-1}$; $\tau_1=2 \text{ ns}^{-1}$; $a=3$; $\eta=4$; $\gamma_{1p}=16 \text{ ns}^{-1}$; $P=1$; $\gamma_{1a}=1 \text{ ns}^{-1}$; $k_{it}=10 \text{ ns}^{-1}$; $\gamma_1=1 \text{ ns}^{-1}$; $\omega_1=2e^{14}$; $\gamma_{1s}=80 \text{ ns}^{-1}$; 针对图 11(b),第二组参数组合为: $k=200 \text{ ns}^{-1}$; $\tau_1=1 \text{ ns}$; $a=2$; $\eta=7$; $\gamma_{1p}=10 \text{ ns}^{-1}$; $P=1$; $\gamma_{1a}=0.4 \text{ ns}^{-1}$; $k_{it}=6 \text{ ns}^{-1}$; $\gamma_1=1 \text{ ns}^{-1}$; $\omega_1=2e^{14}$; $\gamma_{1s}=50 \text{ ns}^{-1}$ 。图 11(a)表明,每个经过训练的储备池预测的混沌时间序列与 VCSEL₁ 输出的偏振混沌时间序列完全不匹配,两个解密信息眼图中的“眼睛”完全关闭,这说明,信噪比被极大地提高,攻击者对解密信号无法正确地解密。在另一组不匹配的组合参数下,图 11(b)证明了与上述相似的结果。此外,除了所提出的基于 VCSEL₂ 的储层的参数外,作为传统的硬件混沌接收器,如果要正确解密信息,信道延迟不得不知道,这提供了额外的密钥空间^[32]。因此,系统结构被认为是安全的,能有效防止储备池受到攻击。最后,考虑是否有可能使用容易检测到的混沌掩模信号来训练储备池。图 12 进一步给出了通过由混沌掩模信号训练的两个并行的储备池而获得的混沌和眼图。从这个图可以证明,使用混沌掩模信号训练的基于 VCSEL₂ 的储备池不能用来解调加密信号。图 12(a)给出了 $c_x(n-L_x)$ 和 $c'_x(n)$ 之间的同步关系,图 12(b)给出了 $c_y(n-L_y)$ 和 $c'_y(n)$ 。从图 12(a)和 12(b)可以发现,每个储备池预测混沌时间序列可能与 VCSEL₁ 输出偏振分量的混沌时间序列不同步和不匹配。另外,图 12(c)是通过基于 x -PC₂ 的储备池而获得的解密信号 m'_x 的眼图,图 12(d)是通过基于 y -PC₂ 的储备池而获得解密信号 m'_y 的眼图。从图 12(c)和 12(d)可以看出,两个解密信息 [$c'_x(n)$ 和 $c'_y(n)$] 眼图中的“眼睛”完全关闭,表明攻击者无法正确地解密信息。其原因是:检测到的混沌掩模信号不能正确地训练储备池,导致储备池不能复制 VCSEL₁ 输出两个偏振分量的混沌动态。因此,如果攻击者没拥有发射 VCSEL₁ 的物理参数,攻击者通过信道中的混沌掩模信号不可能攻击该系统。

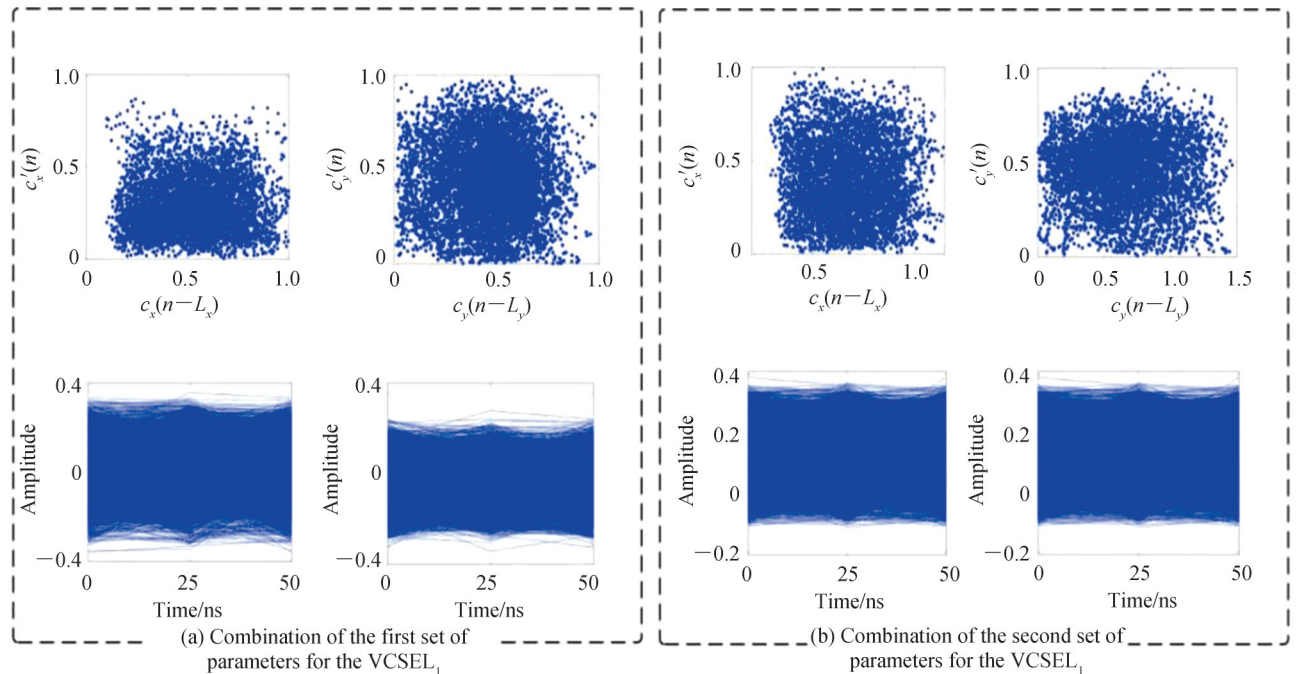


图 11 在带有不同参数组合的 VCSEL₁ 中,通过不同混沌掩模信号训练的两个并行储备池而获得的混沌同步和眼图
Fig.11 Chaos synchronizations and eye-diagrams using two parallel reservoirs trained by different chaos-masked messages in the VCSEL₁ with different parameter-combinations

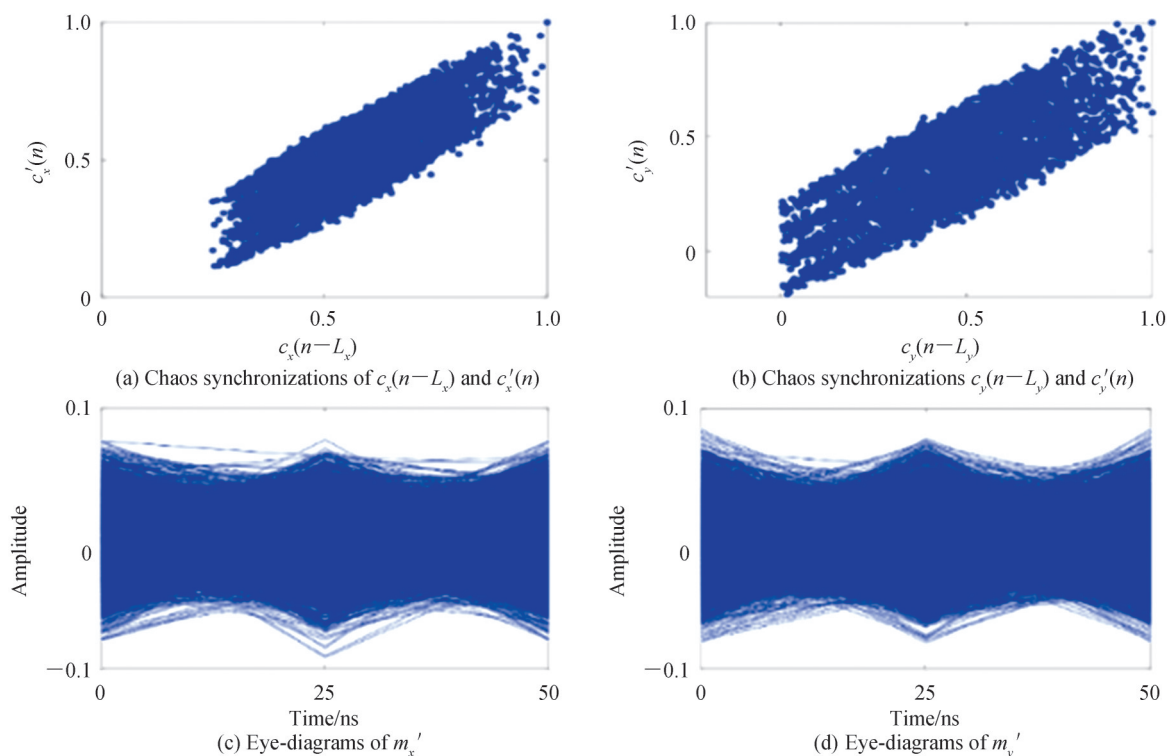


图 12 通过由混沌掩模信号训练的两个并行的储备池而获得的混沌同步和眼图

Fig. 12 Chaos synchronizations and eye-diagrams using two parallel reservoirs trained by the chaos-masked messages

3 结论

本文提出了使用两个并行光学储备池计算机分别学习一个光泵浦 Spin-VCSEL(发射激光器)的 x -PC 和 y -PC 的复杂混沌动态。这里,另一个光泵浦自旋 VCSEL 输出的 x -PC 和 y -PC 的非线性动态实现这两个储备池计算机。通过训练基于 VCSEL 的储备池,可以获得发射 PC 与其相应的储备池之间的高质量混沌同步。此外,讨论了两种不同速率 16QAM 下,不同参数变化对每一对 PC 的混沌同步质量的影响。结果发现,随着 16QAM 的速率增加,每一对 PC 的混沌同步质量略微减小。在这种高质量同步条件下,论述了速率为 $2 \times 5 \text{ Gb/s}$ 的 16QAM 信息的双信道保密通信。最后,研究了在不同参数下的两种解密信息的误比特率表现。结果发现,不同参数诱导的误码率均为 0。由基于 VCSEL 的储备池实现的每一对 PC 之间的混沌同步与传统的同步方案具有相同的安全水平。因此,利用基于延迟的储备池计算方法提出的混沌同步可以为光混沌同步保密通信应用提供参考。

参考文献

- [1] GERHARDT N C, HOFMANN M R. Spin-controlled vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Advances in Optical Technologies, 2012, 2012:268949.
- [2] LINDEMANN M, XU Gaofeng, PUSCH T, et al. Ultrafast spin-lasers[J]. Nature, 2019, 568: 212-215.
- [3] SUSANTO H, SCHIRES K, ADAMS M J, et al. Spin-flip model of spin-polarized vertical-cavity surface-emitting lasers: Asymptotic analysis, numerics, and experiments[J]. Physical Review A, 2015, 92: 063838.
- [4] ZHONG Dongzhou, XU Geliang, LUO Wei, et al. Reconfigurable dynamic all-optical chaotic logic operations in an optically injected VCSEL[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(12): 124204.
- [5] OESTREICH M, HUEBNER J, HÄGELE D, et al. Spintronics: spin electronics and optoelectronics in semiconductors [J]. Interacting Electrons in Nanostructures, 2001, 59: 181-194.
- [6] ZHONG Dongzhou, XU Geliang, LUO Wei, et al. Real-time multi-target ranging based on chaotic polarization laser radars in the drive-response VCSELs[J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21684-21704.
- [7] LI N, SUSANTO H, CEMLYN B, et al. Secure communication systems based on chaos in optically pumped spin-VCSELs[J]. Optics Letters, 2017, 42(17): 3494-3497.
- [8] SEYAB R A, ALEXANDROPOULOS D, ENNING I D H, et al. Instabilities in spin-polarized vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. IEEE Photonics Journal, 2011, 3(5): 799-809.

- [9] IYAMA K, WASHIZUKA T, YAMAGUCHI K. Three-dimensional object profiling by FMCW optical ranging system using a VCSEL[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 37, 3826–3833.
- [10] ZHONG Dongzhou, XIAO Zhenzhen, YANG Guangze, et al. Real-time ranging of the six orientational targets by using chaotic polarization radars in the three-node VCSEL network[J]. *Optics Express*, 2019, 27: 9857–9867.
- [11] JIANG Ning, XUE Chenpeng, LIU Ding, et al. Secure key distribution based on chaos synchronization of VCSELs subject to symmetric random-polarization optical injection[J]. *Optics Letters*, 2017, 42: 1055–1058.
- [12] MIGUEL M S, FENG Q, MOLONEY J V. Light-polarization dynamics in surface-emitting semiconductor lasers[J]. *Physical Review A*, 1995, 52: 1728.
- [13] ZHONG Dongzhou, WU Zhengmao. Complete chaotic synchronization mechanism of polarization mode of VCSEL with anisotropic optical feedback[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(8): 282–1631.
- [14] LIU Jiao, WU Zhengmao, XIA Guangqiong. Dual-channel chaos synchronization and communication based on unidirectionally coupled VCSELs with polarization-rotated optical feedback and polarization-rotated optical injection[J]. *Optics Express*, 2009, 17: 12619–12626.
- [15] JIANG N, PAN W, LUO B, et al. Bidirectional dual-channel communication based on polarization-division-multiplexed chaos synchronization in mutually coupled VCSELs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(13): 1094–1096.
- [16] WANG Hongxiang, LU Tianfeng, JI Yuefeng. Key space enhancement of a chaos secure communication based on VCSELs with a common phase-modulated electro-optic feedback[J]. *Optics Express*, 2020, 28: 23961–23977.
- [17] KREINBERG S, PORTE X, SCHICKE D, et al. Mutual coupling and synchronization of optically coupled quantum-dot micropillar laser at ultra-low light levels[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1539.
- [18] MIRASSO C R, VICENTE R, COLET P, et al. Synchronization properties of chaotic semiconductor lasers and applications to encryption[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2004, 5: 613–622.
- [19] LI X, WEI P, LUO B, et al. Mismatch robustness and security of chaotic optical communications based on injection-locking chaos synchronization [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42: 953–960.
- [20] KE Junxiang, YI Lilin, YANG Zhao, et al. 32 Gb/s chaotic optical communications by deep-learning-based chaos synchronization[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(23): 5776–5779.
- [21] LARGER L, SORIANO M C, BRUNNER D, et al. Photonic information processing beyond turing: an optoelectronic implementation of reservoir computing[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 3241–3249.
- [22] APPELTANT L, SORIANO M C, SANDE G VAN DER, et al. Information processing using a single dynamical node as complex system[J]. *Nature Communications*, 2011, 2 (468): 1–6.
- [23] HAYNES N D, SORIANO M C, ROSIN D P, et al. Reservoir computing with a single time-delay autonomous Boolean node[J]. *Physical Review E*, 2015, 91(2): 020801.
- [24] VANDOORNE K, DIERCKX W, SCHRAUWEN B, et al. Toward optical signal processing using photonic reservoir computing[J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11182–11192.
- [25] PAQUOT Y, DUPORT F, SMERIERI A, et al. Optoelectronic reservoir computing [J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 287.
- [26] DEJONCKHEERE A, DUPORT F, SMERIERI A, et al. All-optical reservoir computer based on saturation of absorption[J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 10868–10881.
- [27] VATIN J, RONTANI D, SCIAMANNA M. Enhanced performance of a reservoir computer using polarization dynamics in VCSELs[J]. *Optics Letters*, 2018, 43: 4497–4500.
- [28] TAKANO K, SUGANO C. Compact reservoir computing with a photonic integrated circuit [J]. *Optics Express*, 26, 2018: 29424–29439.
- [29] WENG Tongfeng, YANG Huijie, GU Changui, et al. Synchronization of chaotic systems and their machine-learning models[J]. *Physical Review E*, 2019, 99:042203.
- [30] KURIKI Y, NAKAYAMA J, TAKANO K, et al. Impact of input mask signals on delay-based photonic reservoir computing with semiconductor lasers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5777–5788.
- [31] BUENO J, MAKRTOL S, FROEHLI L, et al. Reinforcement learning in a large-scale photonic recurrent neural network[J]. *Optica*, 2018, 5(6): 2334–2536.
- [32] MARTINENGI R, RYBALKO S, JACQUOT M, et al. Photonic nonlinear transient computing with multiple-delay wavelength dynamics[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(24): 244101.
- [33] THOMAS L, WALKER D M, SMALL M, et al. The reservoir’s perspective on generalized synchronization[J]. *Chaos*, 2019, 29: 093133.
- [34] ZHONG Dongzhou, YANG Hua, XI Jiangtao, et al. Predictive learning of multi-channel isochronal chaotic synchronization by utilizing parallel optical reservoir computers based on three laterally coupled semiconductor lasers with delay-time feedback[J]. *Optics Express*, 2021, 29: 5279–5294.
- [35] HOU Y, XIA G, YANG W, et al. Prediction performance of reservoir computing system based on a semiconductor laser

- subject to double optical feedback and optical injection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10211–10219.
- [36] NAKAYAMA J, KANNO K, UCHIDA A. Laser dynamical reservoir computing with consistency: an approach of a chaos mask signal[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8679–8692.
- [37] LANG R, KOBAYASHI K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347–355.
- [38] TAN Xiangsheng, HOU Yushuang, WU Zhengmao, et al. Parallel information processing by a reservoir computing system based on a VCSEL subject to double optical feedback and optical injection[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 26070–26079.

Exploring of Chaotic Secure Communications with High-speed Using Optical Reservoir Computers

ZHONG Dongzhou, XU Zhe, ZHAO Keke, HU Yalan, DENG Wanan, HOU Peng,
ZHANG Jinbo

(*Intelligent Manufacturing Faculty, Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529020, China*)

Abstract: Optically pumped spin-polarized vertical-cavity surface-emitting lasers might provide properties superior to electrically pumped vertical-cavity surface-emitting lasers, such as faster modulation dynamics, larger modulation bandwidth, lower threshold, and stronger polarization determination. New applications of optically pumped spin-vertical-cavity surface-emitting lasers are foreseen in high-speed optical communication, optical information processing, data storage, quantum computing and biochemical sensing. Various forms of ultrafast instability are observed in optically pumped spin-vertical-cavity surface-emitting lasers, including periodic oscillations, polarization switching, and chaos dynamics. Due to weak material and cavity anisotropy, the output of electrically pumped vertical-cavity surface-emitting laser usually includes two orthogonal polarization components, which is beneficial to realize dual channel optical communication. Therefore, the dual-channel secure communications based on electrically pumped vertical-cavity surface-emitting lasers have received extensive attention in recent years. In most of these examples, the drive-response electrically-pumped vertical-cavity surface-emitting lasers system was always used for secure communications. In such a system, chaotic x -polarization component and y -polarization component were yielded via the introduction of the external perturbations, typically feedback in the drive vertical-cavity surface-emitting laser. The response vertical-cavity surface-emitting laser yielded similar chaotic x -polarization component and y -polarization component when its parameters were identical to those of the drive vertical-cavity surface-emitting laser. Moreover, chaos synchronization between each pair of polarization components played a key role in security and encrypted message recovery. However, the realization of high-quality chaos synchronizations relies on the assumptions that the drive and response electrically pumped vertical-cavity surface-emitting lasers are completely symmetrical in structure, and their parameters match perfectly. In addition, previous works showed that due to the existence of two polarization components in drive and response vertical-cavity surface-emitting lasers, the structural symmetry of these two lasers is broken, which leads to the degradation of the quality of chaos synchronization. Under this asymmetric structure, high-quality chaos synchronization can be received by limiting a certain delay difference between the self-feedback delay of the drive vertical-cavity surface-emitting laser and the channel delay. The assumptions and limits as described above do not hold in practice. Realization of high-quality chaos synchronization will meet much more challenges in practice due to the inevitable imperfect match between the driving and response vertical-cavity surface-emitting lasers, and the variation of the delay difference at any time. Optically-pumped spin-vertical-cavity surface-emitting laser has better controllability for polarization switch, which is conducive to the realization of two parallel reservoir computers. Moreover, it can yield ultrafast chaotic dynamic without feedback or subject to short feedback delay, thus forming very short spacing between two virtual nodes under sufficient nodes, denoting two reservoir computers using two chaotic polarization components of optically-pumped spin-vertical-cavity surface-emitting laser can deal with two high-speed chaotic time-series in parallel data. In this work, we utilize two parallel reservoir computers using the two polarization components of an optically

pumped spin-vertical-cavity surface-emitting laser with both optical feedback and optical injection, to model the chaotic dynamics of the output two polarization components from another optically pumped spin-vertical-cavity surface-emitting lasers as a transmitter. High-quality chaotic synchronization between a transmitting polarization component and its corresponding trained reservoir can be realized by training vertical-cavity surface-emitting laser-based reservoir. Under such a synchronization condition, we demonstrate the successful dual-channel secure communications with 16QAM messages under guaranteeing their securities. We further discuss the bit error ratio performances for two decoded messages under different parameters. We demonstrate that all bit error ratio via different parameters keep at 0. Our findings show that a delay-based optical reservoir computing provides an effective method for the practical application of optical secure communication.

Key words: Vertical cavity surface-emitting laser; Reservoir Computing; Chaos optical communication; Chaos Synchronization

OCIS Codes: 140.1540; 140.7260; 200.4700; 060.4510