

混沌光子储备池计算研究进展

赵清春 殷洪玺

(大连理工大学信息与通信工程学院 光通信与信息光子技术实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要 混沌光子储备池计算是一种利用光混沌系统作为储备池实现信息处理的新技术,具有处理速度快、计算容量大、物理实现简单等优点,在未来光子计算机、智能信息处理等领域有广阔的应用前景。详细介绍了混沌光子储备池计算的概念、原理、实现过程和实现方案,比较了各种实现方案的优缺点。总结了目前混沌光子储备池计算中一些有待解决的问题,展望了混沌光子储备池计算的未来发展趋势。

关键词 光计算;光信息处理;储备池计算;神经网络;混沌激光

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.030003

Research Progress of Reservoir Computing Using Chaotic Laser

Zhao Qingchun Yin Hongxi

(Laboratory of Optical Communications and Photonic Technology, School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract Chaotic photonic reservoir computing is a new information processing technique, which employs chaotic laser as the reservoir. The advantages of the new technique are of high processing speed, big computing capacity and simple physical implementation. This new kind of computing can be applied in the future photonic computer, intelligent information processing and other fields. This paper introduces the concept, principles, processes and implementation of chaotic photonic reservoir computing in detail. The advantages and disadvantages of different implementation schemes are compared. Some issues to be resolved for the chaotic photonic reservoir computing are listed. The trends of chaotic photonic reservoir computing are also demonstrated.

Key words optics in computing; optical information processing; reservoir computing; neural network; chaotic laser

OCIS codes 140.1540; 190.3100; 060.4230

1 引言

光的超快速度和光波的复用能力使得光在信息处理方面具有超高运算速度和并行处理等优点。相对于成熟的电子计算而言,光子计算目前还处于起步阶段。目前的工作主要围绕全光逻辑门、慢光、光存储和码型转换等一些基础研究开展。这些基础研究都是未来光子计算需要克服的技术难题。这些瓶颈的根源是相对于电子而言,光子没有静止质量,无法静止下来。另外,光学的非线性控制也有困难。

光信息处理的研究起源于20世纪70年代,受限于当时的光电技术,实现光信息处理所需的器件的功耗、体积和尺寸等都存在问题,发展缓慢。在20世纪80年代这方面的研究几乎处于停滞状态。随着电子技术和光子技术的进步,半导体工艺、光电集成等技术获得了突飞猛进的发展。因此,光信息处理又引起了人们极大的研究兴趣^[1~3]。

在如今的信息时代,信息量呈爆炸式增长,这直接导致了待处理数据量的快速增长。按照摩尔定律,目

收稿日期: 2012-11-05; **收到修改稿日期**: 2012-11-27; **网络出版日期**: 2013-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(61071123, 61172059)、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室(北京大学)开放基金及教育部博士研究生学术新人奖资助课题。

作者简介: 赵清春(1982—),男,博士研究生,主要从事混沌激光通信方面的研究。E-mail: zhaqingchun2000@163.com

导师简介: 殷洪玺(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光网络和光子集成等方面的研究。

E-mail: hxyin@dlut.edu.cn(通信联系人)

前电子器件已经面临难以克服的瓶颈。另一方面,经典的算法在一些复杂应用方面,特别是在人工智能方面,也具有局限性。人工神经网络(ANN)的提出解决了这些难题。人工神经网络是一种模拟大脑处理信息的数学模型,它的自学习功能、联想存储功能和高速寻优解功能,使得它成为仿生学中的一个成功典范。然而,训练人工神经网络曾经是一个难题。储备池计算(RC)采用一个随机生成、保持不变的储备池来取代经典人工神经网络的中间层,从而简化了网络的训练过程^[4]。研究发现,目前的储备池计算需要大量随机的、相互连接的非线性节点来构成储备池,通常有成百上千个节点。从物理器件实现的角度看,这需要耗费大量器件且实现困难。

众所周知,混沌是一种非线性现象,一个混沌系统包含很多非线性状态。用一个混沌非线性系统来取代目前储备池计算中的储备池,这可以节约很多资源,且很好地解决了物理实现的难题。这是因为目前储备池计算的物理实现中,需要大量的硬件开销来实现储备池中的众多节点;而单个混沌非线性系统可以取代这些节点,物理实现得以简化。此处,借助激光实现混沌光子储备池计算,不但可以利用光学处理信息的超快速度和并行能力,而且可以应用混沌储备池计算的大容量、物理实现简单等优点,是一种融合了多种学科优势的新兴技术,应用前景广阔。

本文介绍了混沌光子储备池计算的概念、原理、实现过程和实现方案。指出了目前混沌光子储备池计算中一些有待解决的问题,并展望了混沌光子储备池计算的未来发展趋势。

2 基本概念

混沌光子储备池计算是一门涉及多学科的技术,它涵盖了神经科学、复杂性科学、计算科学、电子学、光子学以及非线性科学等学科领域,如图1所示。在全面阐述混沌光子储备池计算之前,首先对这些学科领域中的一些基本概念做简单解释。

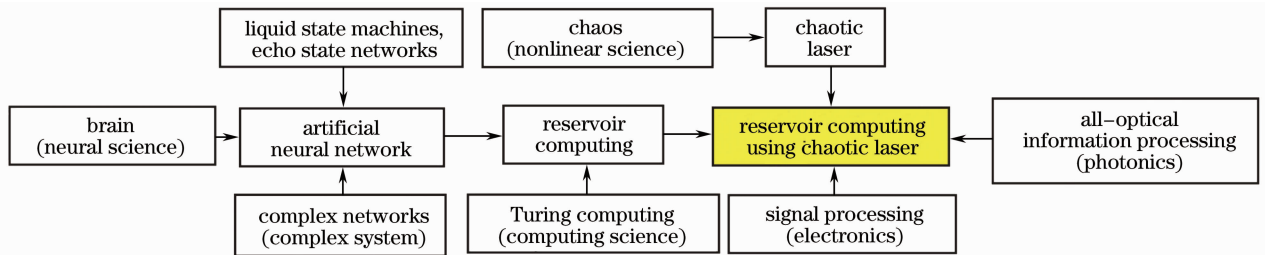


图1 混沌光子储备池计算涉及的学科领域

Fig. 1 Scientific subjects involved in chaotic photonic reservoir computing

2.1 Turing 计算机和 Von Neumann 计算机

Turing 机的基本思想是用机器来模拟人用纸笔进行数学运算的过程。Turing 结构的计算机包括以下几个部分:无限长的纸带、读写头、状态寄存器和控制规则。这只是一个理想的设备,但却是现代电子计算机的雏形。

1945年,Von Neumann 提出了在数字计算机内部的存储器中存放程序的概念,这是所有现代电子计算机的模板。Von Neumann 计算机主要由运算器、控制器、存储器和输入输出设备组成,其特点是:程序和数以二进制(代替十进制)代码的形式存放于存储器中,所有的指令均由操作码和地址码组成,以运算器和控制器作为计算机结构的中心等。

2.2 人工神经网络

人工神经网络是一种模拟大脑进行信息处理的仿生学数学模型。人工神经网络由大量的节点和它们之间的连接构成^[5]。人工神经网络的主要特点表现在3个方面:自学习功能、联想存储功能和高速寻优解功能。

2.3 回声状态网络、液体状态机与储备池计算

回声状态网络(ESN)是一种新型的递归神经网络^[6,7],其基本思想是使用大规模随机连接的递归网络来取代经典神经网络的中间层,从而简化网络的训练过程。其特点是:核心结构是一个随机生成且保持不变的储备池,输出权值是唯一需要调整的部分,简单的线性回归就可完成网络的训练。

液体状态机(LSM)由 Maass 提出^[8],其目标是解决时序信号的实时计算问题,应用领域是神经微电路。虽然回声状态网络和液体状态机提出的角度和目的有所不同,但可以证明它们在本质上是一致的^[9]。文献中基于二者内部结构上的统一把它们统称为储备池计算^[4,10,11]。

2.4 混沌与激光混沌

混沌是非线性科学中的一个重要组成部分。混沌是由确定性非线性动力学系统产生的一种随机现象。与随机运动不同的是,混沌运动在动力学上是确定的。混沌是非线性系统普遍存在的现象,在自然界中普遍存在。混沌系统有如下一些特点:对初始条件敏感;存在临界点,即从规则、周期运动到非线性、非周期、非规则的临界点;长期不可预测性等。

激光混沌是指激光器或一些光电器件[如 Mach-Zehnder 调制器(MZM)]在受到扰动(如光注入、光反馈和光电反馈)时输出的激光呈现混沌现象。激光混沌的优点是带宽大、维度高、相干性低和自相关函数呈 δ 线形等,目前在保密光通信、高速随机码发生器、激光雷达和光时域反射仪等领域的应用有诸多报道^[12~20]。本文将主要介绍激光混沌在高速、实时和大容量信息处理方面的应用。

3 工作原理

传统的储备池计算的实现过程如图 2(a)所示,包括输入层、储备池和输出层 3 个部分。输入层将输入信号通过随机、固定的输入连接送至储备池。储备池由大量的随机、固定连接的节点组成。这些节点构成一个递归网络,网络中包含内部形成的反馈。输出层给出储备池中节点的状态或对输入信号进行分类。

以一个非线性系统作为节点的储备池计算的实现过程如图 2(b)所示。与传统的储备池计算不同的是,在该方案中储备池是由一个非线性系统作为单个节点取代大量的节点实现的,即将反馈环分为 N 个时间间隔,并通过时分复用实现。输入层的输入信号经采样后,使得信号的持续时间为 τ (即反馈环的延迟时间)。在任意时刻 t ,输入状态 $I(t)$ 与模板 M 相乘,构成时域的输入流 $J(t)$ 。该输入流再与储备池的延迟状态 $x(t-\tau)$ 相加,然后反馈回非线性系统。此时,输出为 $\sum_{i=1}^N \omega_i x[t-\tau(N-i)/N]$ 。

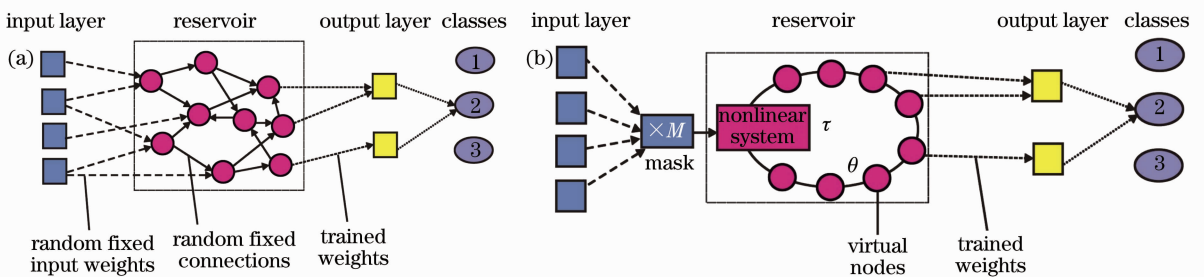


图 2 (a)传统的储备池计算框图;(b)以非线性系统作为节点的储备池计算框图

Fig. 2 (a) Setup for classical reservoir computing; (b) setup for reservoir computing using a single nonlinear system as a node

4 实现方案

目前,利用单个非线性系统作为节点实现信息处理的储备池计算方案主要有混沌电路储备池计算、光电储备池计算、全光储备池计算和光电波长混沌储备池计算。这些方案采用不同的非线性系统实现。下面分别论述它们的实现过程和特点。

4.1 混沌电路储备池计算

2010年1月,欧盟第七届科技框架计划出巨资资助非线性系统用于储备池计算的研究。他们启动了 PHOCUS 计划,即“基于延迟耦合系统的光子液体状态机”^[21],参加单位有西班牙的巴利阿里群岛大学、坎塔布里亚大学、国家研究理事会,德国的法兰克福高等研究院、波茨坦附耳气候影响研究所,法国的弗朗什孔岱大学以及比利时的布鲁塞尔自由大学,共 4 个国家 7 个单位,总经费 181 万欧元,汇集了光子学、神经科

学、非线性动力学、复杂系统和电子系统等各个领域的专家和学者。

2011年9月,该项目组的成员单位报道了他们的研究成果^[22]。他们利用混沌电路作为单个非线性节点实现了储备池计算。该装置可以实现语音识别和时间序列预测等功能。这是一种可以节约成本的储备池计算新手段。

图3给出了该方案的实现过程。预处理将输入 $I(t)$ 与模板 M 相乘构成输入流 $J(t)$, 输入增益为 γ , 后处理产生量化后的输出。文献[22]中采用经典的 Mackey-Glass 混沌电路作为单个的非线性节点。其动力学行为可用微分方程表示为^[23]

$$\frac{dx}{dt} = -ax + k_f \frac{x(t - \tau_f)}{1 + x^b(t - \tau_f)}, \quad (1)$$

式中 k_f 为反馈强度, τ_f 为时间延迟, 常数 $a = 1, b = 10$ 。在数值仿真中, 固定 $k_f = 2, \tau_f = 14$ s。图4是数值仿真产生的 Mackey-Glass 混沌的时间序列和吸引子。

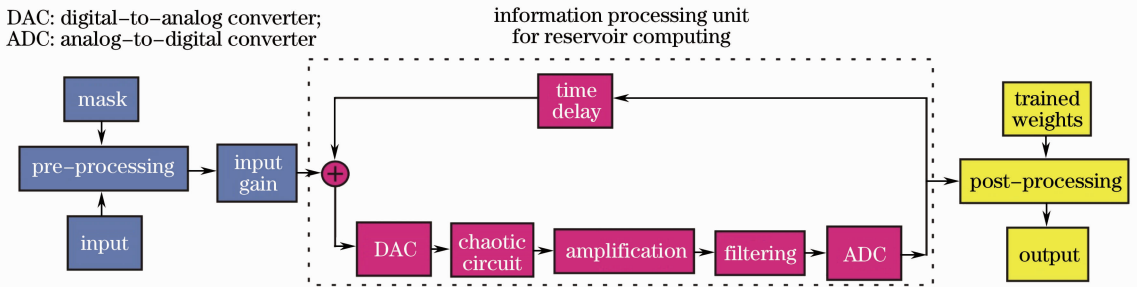


图3 基于混沌电路实现的储备池计算的流程图

Fig. 3 Flow chart for realization of reservoir computing based on chaotic circuits

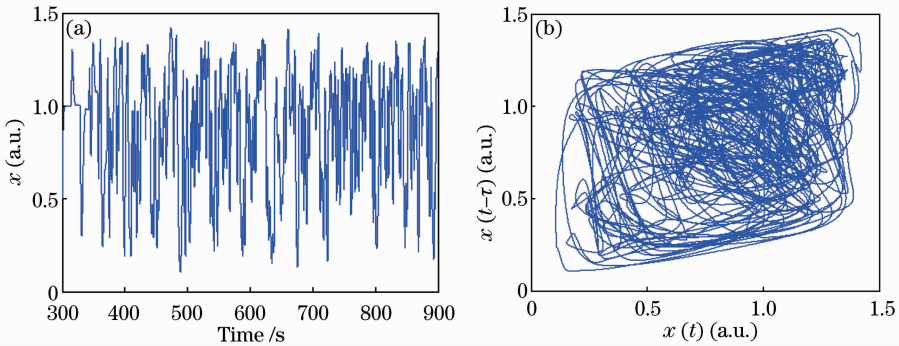


图4 数值仿真产生 Mackey-Glass 混沌。(a)时间序列;(b)混沌吸引子,其中延迟量 $\tau = 200$ s

Fig. 4 Numerical generation of Mackey-Glass chaos. (a) Time trace; (b) chaotic attractor for the delay $\tau = 200$ s

该混沌电路储备池计算系统的性能主要取决于反馈环的增益、输入增益、时间延迟、虚拟节点之间的时间间隔、混沌电路的产生方式以及模板等。这些因素直接决定了该系统的处理速度低、实时性差和处理信息的容量小等弊端。

4.2 光电储备池计算

2012年1月,法国弗朗什孔岱大学等单位报道了光电储备池计算的实验结果^[24]。实验所采用的装置如图5所示。激光二极管(LD)产生恒定功率的激光,然后注入到 Mach-Zehnder 强度调制器(MOD)。调制器的输出光进入光纤(用于构成光纤反馈)。光电探测器(PD)用于将光变为电信号,滤波器滤掉高频噪声。滤波器的一端输出进入宽带微波功率放大器,最后反馈回调制器。此装置通过扰动强度调制器,使其产生非线性效应。这与扰动半导体激光器产生混沌激光的原理是不同的。该光

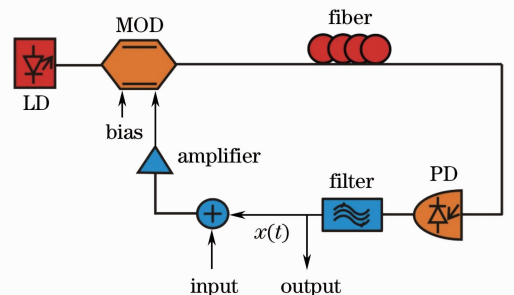


图5 光电储备池计算装置图

Fig. 5 Setup for opto-electronic reservoir computing

电装置作为非线性系统,实现储备池计算。待处理的信息(即图5中的输入信号)经射频耦合器一端进入反馈环。输出信号从滤波器的一端输出。

图5中由光电反馈产生混沌的系统的动力学行为可以用延迟微分方程表示为

$$\frac{1}{\theta} \int_{t_0}^t x(\xi) d\xi + x(t) + \tau \frac{dx(t)}{dt} = \beta \cos^2[x(t-T) + \phi], \quad (2)$$

式中 $x(t) = \pi V(t)/2V_\pi$ 为驱动调制器的归一化电压, $V(t)$ 为微波功率放大器的输出, V_π 为调制器的半波电压; $\theta = 1/(2\pi f_L)$ 是反馈回路的低频截止的特征时间, $\tau = 1/(2\pi f_H)$ 则是高频截止的特征时间, f_L 和 f_H 分别是反馈回路所表现出的带通滤波器的低频和高频截止频率; β 是归一化的反馈增益, T 为延迟时间, ϕ 为相位。

求解(2)式时,令 $y = \int_{t_0}^t x(\xi) d\xi$, 得到一阶时间延迟微分方程组

$$\begin{cases} x' = -x/\tau - y/\theta + \beta \cos^2[x(t-T) + \phi]/\tau \\ y' = x \end{cases} \quad (3)$$

在求解(3)式时,参数值选取为: $\tau = 19.89$ ps, $\theta = 51.34$ ps, $\beta = 5$, $T = 2.5$ ns, $\phi = -\pi/4$, $V_\pi = 5$ V^[25]。图6是数值仿真产生的光电反馈混沌激光,射频带宽约为6 GHz。相比于混沌电路,这将大大提高信息处理的速度和容量。

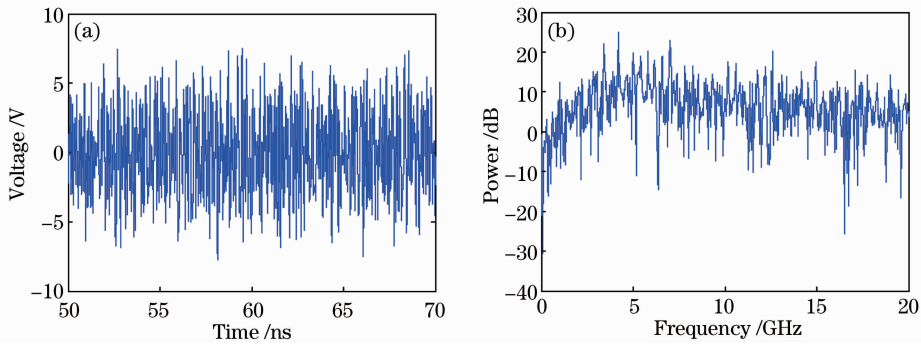


图6 光电反馈混沌激光。(a)时序图和(b)射频功率谱图

Fig. 6 Generation of chaotic laser subject to opto-electronic feedback. (a) Time traces; (b) radio-frequency power spectra

4.3 全光储备池计算

2012年9月比利时法语布鲁塞尔自由大学等单位报道了他们的全光储备池计算实验结果^[26]。实验装置如图7所示。超辐射发光二极管(SLED)作为白光光源,产生的光进入强度调制器MOD。之后,光经可调光衰减器(VOA)、滤波器和耦合器后进入光纤反馈环。在反馈环中,光经隔离器(ISO)后进入半导体光放大器(SOA),通过滤波器滤掉噪声,再经可调光衰减器和光纤延迟线(ODL)后构成反馈环。输入信号由任意波形发生器(AWG)产生,并送至强度调制器的射频输入端。输出信号经耦合器后进入光电探测器(PD)变为电信号输出,并做后续的数字化处理。注意该装置产生混沌的方式是靠SOA的非线性,即光借助SOA的非线性在光纤反馈环内形成混沌激光。

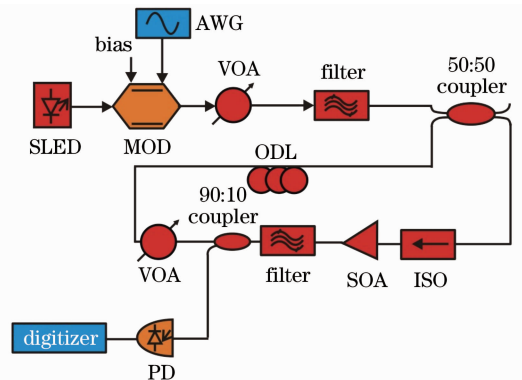


图7 全光储备池计算装置图

Fig. 7 Setup for all-optical reservoir computing

该装置是一套全光储备池计算系统,目前处理速度可达到每符号7.8 μ s。其处理速度主要受限于任意波形发生器的带宽和光电探测器之后的模数转换器的性能。然而,该装置与光电储备池计算系统相比,其记忆能力和信道均衡能力有所下降,这是由SOA的自发辐射噪声引起的。

4.4 光电波长混沌储备池计算

2012年6月,法国弗朗什孔岱大学报道了光电波长混沌储备池计算的实验结果^[27]。实验装置如图8所示。与前面几种装置不同的是,该装置采用波长混沌激光系统作为非线性节点。波长混沌激光的特点是产生激光的波长呈现混沌状态,而光功率保持恒定^[28,29]。前面几种装置中的激光产生的是强度混沌。所谓强度混沌是指输出光的光功率是混沌状态,而波长保持不变^[12,14]。波长混沌激光的产生过程为:分布布拉格反射激光二极管(DBR-LD)在抽运电流注入下产生激光输出,经透镜准直后,进入隔离器,然后经偏振片POL进入双折射片(BP),产生非线性效应,经过偏振片和透镜后进入光电探测器变为电信号。电信号最后注入到DBR激光器,形成反馈环。经反馈环振荡后,激光器可以产生波长混沌。该波长混沌激光系统用于储备池计算时,需要模数转换器将光电探测器产生的模拟电信号数字化。然后进入现场可编程门阵列(FPGA),实现时间延迟的控制。FPGA产生的数字信号再进入数模转换器变为电信号,并注入到DBR激光器的抽运电流端。输入信号和输出信号分别接FPGA的两端,从而实现储备池计算的功能。

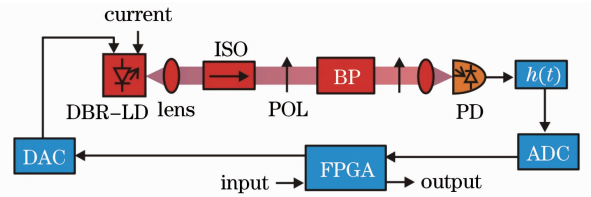


图8 光电波长混沌储备池计算装置图

Fig. 8 Setup for opto-electronic wavelength chaos reservoir computing

5 应用和有待深入研究的问题

由于混沌光子储备池计算在未来的光子计算机、智能信息处理等领域具有重要的应用前景,所以,其研究方兴未艾。目前主要集中在时间序列预测和语音识别等一些智能信息处理领域,未来的研究归纳起来主要有以下几个方面:1)实时视频流中的图像识别;2)光通信中的信号处理;3)小型化以及集成化的混沌光子储备池计算的实现;4)并行信息处理的实现;5)混沌光子储备池计算的性能描述以及性能优化;6)信息处理能力的理论研究;7)处理速度的优化;8)新型的储备池计算实现方案。

这些问题的研究和解决有助于推动混沌光子储备池计算的快速发展,并能促进光子计算机的研究和光信号处理的发展。

6 结束语

本文综述了混沌光子储备池计算的最近研究进展,给出了一些相关的基本概念,介绍了混沌光子储备池计算的原理、实现过程和实现方案。展望了混沌光子储备池计算的未来发展趋势。虽然混沌光子储备池计算的研究尚处于起步阶段,但它具有处理速度快、处理能力大和物理硬件实现简单等诸多优点,它的实现和应用有助于推动全光信号处理以及光子计算机的发展,是一种具有广阔应用前景的技术。

参 考 文 献

- 1 R. S. Tucker. The role of optics in computing[J]. *Nature Photon.*, 2010, **4**(7): 405
- 2 H. J. Caulfield, S. Dolev. Why future supercomputing requires optics[J]. *Nat. Photonics*, 2010, **4**(5): 261~263
- 3 D. Woods, T. J. Naughton. Optical computing: photonic neural networks[J]. *Nature Phys.*, 2012, **8**(4): 257~259
- 4 M. Lukoševičius, H. Jaeger. Reservoir computing approaches to recurrent neural network training[J]. *Computer Science Review*, 2009, **3**(3): 127~149
- 5 Yan Pingfan, Zhang Changshui. *Artificial Neural Network and Simulation Evolutionary Computation* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005
阎平凡, 张长水. *人工神经网络与模拟进化计算* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- 6 M. C. Ozturk, D. Xu, J. C. Principe. Analysis and design of echo state networks[J]. *Neural Computation*, 2007, **19**(1): 111~138
- 7 Luo Xiong, Li Jiang, Sun Zengqi. Review on echo state networks[J]. *J. University of Science and Technology Beijing*, 2012, **34**(2): 217~222
罗 熊, 黎 江, 孙增圻. 回声状态网络的研究进展[J]. *北京科技大学学报*, 2012, **34**(2): 217~222

- 8 W. Maass, T. Natschlagler, H. Markram. Real-time computing without stable states; a new framework for neural computation based on perturbations[J]. *Neural Computation*, 2002, **14**(11): 2531~2560
- 9 D. Verstraeten, B. Schrauwen, M. D'Haene *et al.*. An experimental unification of reservoir computing methods[J]. *Neural Networks*, 2007, **20**(3): 391~403
- 10 M. Lukoševičius, H. Jaeger, B. Schrauwen. Reservoir computing trends[J]. *KI-Künstliche Intelligenz*, 2012, **26**(4): 365~371
- 11 Peng Yu, Wang Jianmin, Peng Xiyuan. Survey on reservoir computing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, **39**(10): 2387~2396
彭宇, 王建民, 彭喜元. 储备池计算概述[J]. 电子学报, 2011, **39**(10): 2387~2396
- 12 A. Argyris, D. Syvridis, L. Larger *et al.*. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. *Nature*, 2005, **438**(7066): 343~346
- 13 Q. Zhao, H. Yin, X. Chen. Long-haul dense wavelength division multiplexing between chaotic optical secure channel and conventional fiber-optic channel[J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(23): 5585~5590
- 14 Q. Zhao, H. Yin. Performance analysis of dense wavelength division multiplexing secure communications with multiple chaotic optical channels[J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(5): 693~698
- 15 Zhang Shenghai, Tan Jianfeng, Yang Hua *et al.*. Chaos driving synchronization of vertical cavity surface emitting lasers with optical feedback[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402013
张胜海, 谭建锋, 杨华等. 光反馈垂直腔面发射半导体激光器的混沌驱动同步[J]. 中国激光, 2011, **38**(4): 0402013
- 16 Wang Bingjie, Qian Jianjun, Zhao Tong *et al.*. Anti-jamming performance of chaotic lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0514002
王冰洁, 钱建军, 赵彤等. 混沌激光雷达抗干扰性能分析[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0514002
- 17 Lü Yuxiang, Niu Libing, Zhang Jianzhong *et al.*. 500 Mb/s fast true random bit generator based on chaotic laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502010
吕玉祥, 牛利兵, 张建忠等. 基于混沌激光的 500 Mb/s 高速真随机数发生器[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0502010
- 18 Zhang Shenghai, Zhao Zhenhua, Yang Hua. Chaos control and synchronization in electrical-optical bistable systems through active-passive method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(5): 051901
张胜海, 赵振华, 杨华. 基于主动被动法对电光双稳态系统的混沌控制和同步研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(5): 051901
- 19 Zhang Qiao, Pan Wei, Li Nianqiang *et al.*. Investigation on security enhancement of chaotic optical communication systems via coupling delay[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0102009
张巧, 潘炜, 李念强等. 利用耦合时延增强激光混沌系统安全性能研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(1): 0102009
- 20 Shen Cuili, Ye Huiying, Wei Fupeng *et al.*. Analysis of chaos synchronization in new three-laser scheme[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(10): 101401
申翠丽, 叶会英, 魏富鹏等. 新型三激光器结构的混沌同步特性[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(10): 101401
- 21 <http://www.ifisc.uib-csic.es/phocus>
- 22 L. Appeltant, M. C. Soriano, G. Van der Sande *et al.*. Information processing using a single dynamical node as complex system[J]. *Nature Communications*, 2011, **2**: 468
- 23 N. Li, W. Pan, L. Yan *et al.*. On joint identification of the feedback parameters for hyperchaotic systems; an optimization-based approach[J]. *Chaos Solitons & Fractals*, 2011, **44**(4-5): 198~207
- 24 L. Larger, M. Soriano, D. Brunner *et al.*. Photonic information processing beyond Turing: an optoelectronic implementation of reservoir computing[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(3): 3241~3249
- 25 L. X. Wang, N. H. Zhu, J. Y. Zheng *et al.*. Chaotic ultra-wideband radio generator based on an optoelectronic oscillator with a built-in microwave photonic filter[J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(15): 2935~2940
- 26 F. Duport, B. Schneider, A. Smerieri *et al.*. All-optical reservoir computing[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(20): 22783~22795
- 27 R. Martinenghi, S. Rybalko, M. Jacquot *et al.*. Photonic nonlinear transient computing with multiple-delay wavelength dynamics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, **108**(24): 244101
- 28 J. P. Goedgebuer, L. Larger, H. Porte. Optical cryptosystem based on synchronization of hyperchaos generated by a delayed feedback tunable laser diode[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(10): 2249~2252
- 29 V. S. Udaltsov, J. P. Goedgebauer, L. Larger *et al.*. Communicating with optical hyperchaos; information encryption and decryption in delayed nonlinear feedback systems[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(9): 1892~1895