

07.3

## Экспериментальная реализация резервуарных вычислений на основе полупроводникового лазера с оптоэлектронной обратной связью

© Г.О. Даниленко, Д.А. Павлов, Е.А. Викторов, А.В. Ковалев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: avkovalev@itmo.ru

Поступило в Редакцию 23 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 8 мая 2024 г.

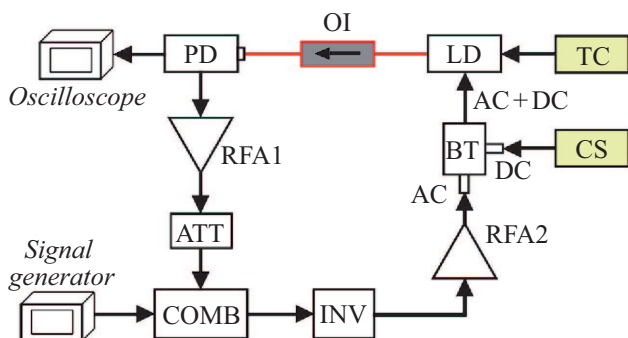
Принято к публикации 13 мая 2024 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований системы резервуарных вычислений на основе полупроводникового лазера с оптоэлектронной обратной связью. Определены емкость памяти системы и погрешность предсказания хаотического временного ряда системы Макки–Гласса. Исследовано влияние значения тока накачки, силы обратной связи и количества узлов системы на ее производительность.

**Ключевые слова:** резервуарные вычисления, полупроводниковые лазеры, оптоэлектронная обратная связь.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.17.58577.19971

Резервуарные вычисления (РВ) — подход к машинному обучению, основанный на нелинейном отклике динамической системы на входной сигнал. Системы РВ используются для решения зависящих от времени задач и анализа больших данных, отличаются упрощенным подходом к обучению системы и энергоэффективностью при реализации на основе физических устройств. Экспериментально продемонстрированы системы на основе оптоэлектронных осцилляторов [1,2], полупроводниковых лазеров с оптической обратной связью (ОС) [3], фотонных интегральных схем [4]. Среди физических, и, в частности, оптических реализаций РВ особенно распространены системы с временным запаздыванием (РВСЗ) [5]. В основе РВСЗ лежит использование единственного нелинейного узла и запаздывающей во времени ОС. При этом осуществляется временное мультиплексирование для создания  $N$  виртуальных узлов, подобных узлам рекуррентных нейронных сетей, которые распределены в контуре ОС через фиксированные временные интервалы  $t_N$  [3,5].



**Рис. 1.** Схема оптоэлектронной системы резервуарных вычислений. Красные линии — оптический сигнал, черные линии — электрический сигнал. Вариант рисунка с выделенными цветом линиями представлен в электронной версии статьи.

В настоящей работе экспериментально исследована система РВСЗ на основе полупроводникового лазера с оптоэлектронной ОС, ранее рассмотренная в теоретических работах [6–8], определены ее емкость памяти и погрешность предсказания хаотического временного ряда в зависимости от параметров системы.

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. В данной установке используются стандартные оптические компоненты с одномодовыми волоконными выводами с коннекторами FC/APC, она является нечувствительной к изменениям состояния поляризации и фазы оптического поля. В качестве источника лазерного излучения для реализации данного подхода использовался одночастотный непрерывно излучающий лазер. Ширина полосы модуляции тока накачки лазера определяет достижимые в данной системе значения частоты ввода данных в систему и количества узлов (см. далее). В настоящей работе используется лазерный диод с распределенной обратной связью Nolatech DFB-1550-14BF (LD) с длиной волны 1550 nm, пороговым током 9 mA и выходной мощностью 5 mW при токе 40 mA, температура которого стабилизирована посредством контроллера температуры ELECDEMO KW\_DFB (TC). Питание LD осуществляется стабилизированным источником тока Keysight N6705C (CS). Лазерное излучение проходит через оптический изолятор (OI) и регистрируется фотоприемником Alphalas UPD-15-IR2-FC (PD), одна часть его выходного сигнала записывается осциллографом UXR0204A Keysight и служит для регистрации значений узлов системы РВ, а другая подается в ОС. Электронная часть ОС состоит из неинвертирующего усилителя радиочастотного сигнала WYDZ-LNA-10M-6GHz 30 dB (RFA1), аттенуатора DYKB DC-6GHz с изменяемым с шагом 0.25 dB коэффициентом аттенуации (ATT), объединителя радиочастотных сигналов SHWLCB2-204000S (COMB), инвертирующего усилителя Mini-Circuits ZX60-V82-S+20-6000MHz

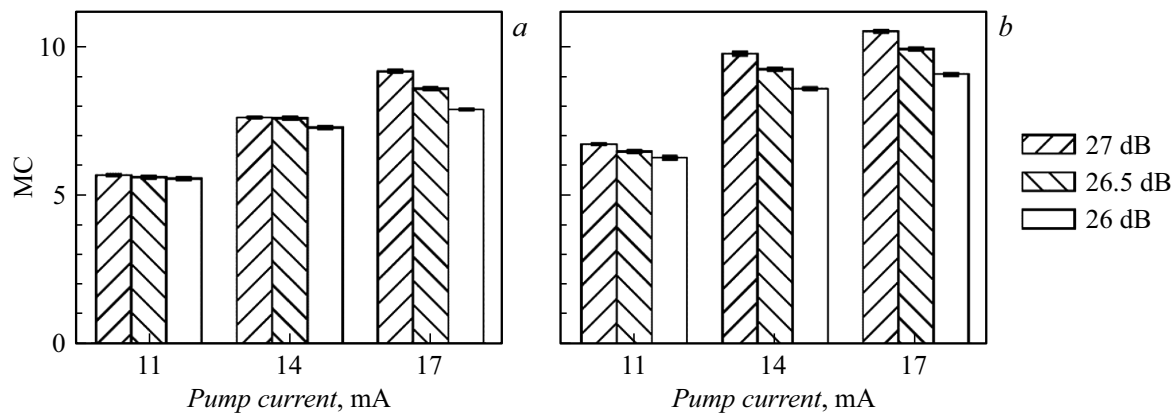


Рис. 2. Емкость памяти (MC) системы в зависимости от тока накачки и силы обратной связи.  $N = 20$  (a) и  $40$  (b).

13 dB (RFA2), инвертора сигнала (INV) и устройства подачи смещения Mini-Circuits ZX85-12G-S+ (BT). Входной сигнал подается в систему с помощью генератора сигналов произвольной формы Keysight M8195A.

Сила ОС системы  $k_{fb}$  определяется как итоговый коэффициент усиления:  $k_{fb} = k_1 - k_a + k_2$ , где  $k_{1,2}$  — фиксированный коэффициент усиления RFA1 (RFA2), равный 30 (13) dB,  $k_a$  — изменяемый коэффициент ослабления аттенюатора, при помощи которого осуществляется изменение силы обратной связи. Экспериментально определенное с использованием прямоугольных импульсов от генератора сигналов запаздывание сигнала ОС равняется 23.8 ns, что соответствует частоте обхода 42 MHz. Энергопотребление системы PB составляет не более 2 W без учета потребления генератора и осциллографа.

Значения входного сигнала вводятся в систему PB последовательно путем модуляции тока накачки LD. Время ввода одного значения  $T_S = Nt_N$  близко ко времени запаздывания сигнала ОС, однако несколько отличается от него для исключения резонансных эффектов, существенно ухудшающих производительность системы [8]. При этом для задания весов входного слоя резервуара каждое входное значение на  $i$ -м шаге ввода  $S_i$  модулируется в течение времени ввода так называемой маской [5] — определенной на временном интервале  $T_S$  кусочно-постоянной функцией со случайными фиксированными значениями, которые изменяются для каждого интервала  $t_N$ . Временной профиль кусочно-постоянной функции определяет количество виртуальных узлов в резервуаре. Выходное значение системы PBC3 формируется путем регистрации значений интенсивности лазерного излучения LD с помощью PD и осциллографа в моменты времени, соответствующие виртуальным узлам, и умножения их на весовые коэффициенты выходного слоя, определяемые на этапе обучения посредством линейной регрессии [5,9].

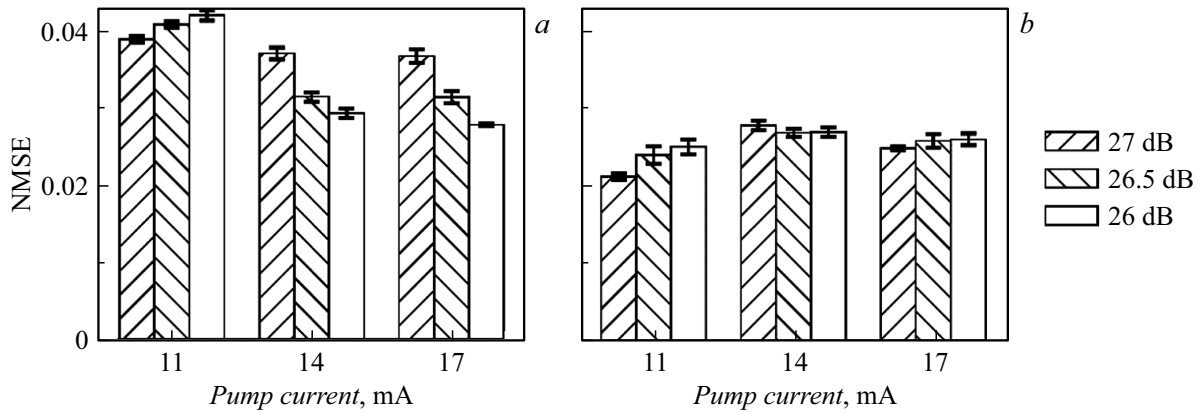
Наилучшая производительность рассматриваемой системы была ранее теоретически предсказана вблизи границы неустойчивости стационарного режима гене-

рации [6,7], которая экспериментально находится при  $k_{fb} = 27$  dB ( $k_a = 16$  dB) для тока накачки 9–25 mA. Полоса модуляции тока накачки используемого лазера по уровню  $-10$  dB ограничивается частотой 1.4 GHz, а полоса пропускания ОС соответствует 0.01–2 GHz. Исследование характеристик системы PB проводилось в зависимости от силы ОС, тока накачки LD и числа узлов системы  $N$ . Частота ввода символов  $1/T_S = 40$  MHz, определяет частоту модуляции тока накачки и соответственно частоту модуляции мощности лазерного излучения как  $1/t_N = 1/(T_S N) = 0.8$  и 1.6 GHz для 20 и 40 узлов соответственно. Для обеспечения синхронного считывания виртуальных узлов значения выходного сигнала PD записывались осциллографом с частотой дискретизации, кратной частоте модуляции тока накачки: 4 и 8 GHz для 20 и 40 узлов соответственно. Для определения среднеквадратичного отклонения для каждой измеряемой характеристики системы процесс PB повторялся пять раз.

Емкость памяти (memory capacity, MC) характеризует способность системы восстанавливать введенные ранее входные данные [9]. Она рассчитывается как

$$MC = \sum_{d=1}^{\infty} mc_d = \sum_{d=1}^{\infty} \frac{\text{cov}^2(O_i, S_{i-d})}{\sigma^2(O_i)\sigma^2(S_i)}, \quad (1)$$

где  $mc_d$  — функция памяти, cov — ковариация,  $O_i$  — выходное значение на  $i$ -м шаге ввода,  $S_{i-d}$  — входное значение, введенное на  $d$  шагов ранее,  $\sigma^2$  — дисперсия. Функция памяти  $mc_d$  показывает связь выходных данных резервуара с входными данными, которые были введены  $d$  шагов назад [10]. Входной сигнал формировался последовательностью 5000 случайных значений из интервала  $[-1,1]$  с равномерным распределением. Экспериментальные значения MC в зависимости от тока накачки и силы обратной связи представлены на рис. 2. Наибольшая емкость памяти равняется 10.5 для  $N = 40$ ,  $k_{fb} = 27$  dB и тока накачки 17 mA. Увеличение тока накачки приводит к увеличению емкости памяти, т.е. система становится более линейной. В работе [3], где



**Рис. 3.** Погрешность предсказания (NMSE) временного ряда хаотической системы Макки–Гласса в зависимости от тока накачки и силы обратной связи.  $N = 20$  (a) и  $40$  (b).

также реализована физическая система РВ на основе лазера, емкость памяти не превышает 8. В нашей системе РВ, при увеличении числа узлов до  $N = 40$  емкость памяти увеличивается незначительно, что может быть связано с влиянием ограниченности полосы модуляции LD и полосы пропускания ОС.

Задача предсказания хаотического временного ряда системы Макки–Гласса позволяет оценить способность системы РВ предсказывать значения ряда на один шаг вперед [3]. Динамическая система Макки–Гласса определяется уравнением

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{\alpha y(t - \tau)}{1 + y^\beta(t - \tau)} - \gamma y(t), \quad (2)$$

где  $\alpha = 0.2$ ,  $\beta = 10$ ,  $\gamma = 0.1$  и  $\tau = 17$ . Для получения временного ряда уравнение (2) решалось методом Эйлера с шагом 0.17 при сохранении каждой третьей точки [3].

Погрешность предсказания оценивается как нормализованная среднеквадратичная погрешность (NMSE):

$$\text{NMSE} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{(Y_i - O_i)^2}{\sigma^2(Y_i)}, \quad (3)$$

где  $L$  — длина проверочной выборки, равная 1500,  $Y_i$  — целевое (истинное) значение на шаге  $i$  из временного ряда, определяемого уравнением (2),  $O_i$  — предсказанное значение на шаге  $i$ . Для данной задачи погрешность предсказания находится в пределах 0.02–0.04 (рис. 3), что соизмеримо с результатами [1,3], а относительное среднеквадратичное отклонение не превышает 4%, что подтверждает устойчивую повторяемость вычислений.

Таким образом, в настоящей работе была экспериментально исследована система резервуарных вычислений на основе полупроводникового лазера с оптоэлектронной обратной связью, характеризующаяся малым энергопотреблением (не более 2 W). Определена

емкость памяти системы, максимальное значение которой составило  $\sim 10$ , и решена задача предсказания временных рядов системы Макки–Гласса с наименьшей погрешностью предсказания 0.02. Данные результаты указывают на перспективность рассматриваемой системы.

#### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-01050 (<https://rscf.ru/project/23-72-01050/>).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] M.C. Soriano, P. Massuti-Ballester, J. Yelo, I. Fischer, in *ICANN 2019: Workshop and special sessions*, ed. by I. Tetko, V. Kůrková, P. Karpov, F. Theis. Lecture Notes in Computer Science (Springer, Cham, 2019), vol. 11731. p. 170–174. DOI: 10.1007/978-3-030-30493-5\_18
- [2] Y. Chen, L. Yi, J. Ke, Z. Yang, Y. Yang, L. Huang, Q. Zhuge, W. Hu, *Opt. Express*, **27** (20), 27431 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.027431
- [3] J. Bueno, D. Brunner, M.C. Soriano, I. Fischer, *Opt. Express*, **25** (3), 2401 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.002401
- [4] K. Harkhoe, G. Verschaffelt, A. Katumba, P. Bienstman, G. Van der Sande, *Opt. Express*, **28** (3), 3086 (2020). DOI: 10.1364/OE.382556
- [5] L. Appeltant, M.C. Soriano, G. Van der Sande, J. Danckaert, S. Massar, J. Dambre, B. Schrauwen, C.R. Mirasso, I. Fischer, *Nat. Commun.*, **2**, 468 (2011). DOI: 10.1038/ncomms1476
- [6] P.S. Dmitriev, A.V. Kovalev, A. Locquet, D. Rontani, E.A. Viktorov, *Opt. Lett.*, **45** (22), 6150 (2020). DOI: 10.1364/OL.405177
- [7] G.O. Danilenko, A.V. Kovalev, E.A. Viktorov, A. Locquet, D.S. Citrin, D. Rontani, *Chaos*, **33** (1), 013116 (2023). DOI: 10.1063/5.0127661

- [8] G.O. Danilenko, A.V. Kovalev, E.A. Viktorov, A. Locquet, D.S. Citrin, D. Rontani, *Chaos*, **33** (1), 113125 (2023). DOI: 10.1063/5.0172039
- [9] L. Larger, A. Baylón-Fuentes, R. Martinenghi, V.S. Udaltsov, Y.K. Chembo, M. Jacquot, *Phys. Rev. X*, **7** (1), 011015 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevX.7.011015
- [10] H. Jaeger, *Short term memory in echo state networks*, GMD report (GMD Forschungszentrum Informationstechnik, St. Augustin, 2002), vol. 152. DOI: 10.24406/publica-fhg-291107