

Чеховской Игорь Сергеевич i.s.chekhovskoy@nsu.ru

Новосибирский государственный университет (ЛМУФ ММФ НГУ, ЛНФ ФФ НГУ, ЛабНОВС ФФ НГУ), старший научный сотрудник.

Тема работы: Резервуарные вычисления на основе активного многосердцевинного оптического волокна

Отчёт: об использовании вычислительных ресурсов кластера НГУ, октябрь 2026 года

Состав коллектива:

И. С. Чеховской, НГУ, ФИЦ ИВТ СО РАН;

С. Мицай, Университет ИТМО;

Г. Патрин, НГУ, ФИЦ ИВТ СО РАН;

М. П. Федорук, НГУ, ФИЦ ИВТ СО РАН;

А. Кохановский, Университет ИТМО.

Аннотация:

Работа посвящена численному исследованию фотонного резервуарного вычислителя на основе активного многосердцевинного волокна с запаздывающей оптической обратной связью. В качестве нелинейного элемента используется само волокно: распространение оптических полей по сердцевинам описывается системой связанных нелинейных уравнений Шрёдингера с насыщаемым усилением. Обратная связь обеспечивает память о предыдущих входных символах, а связь между сердцевинами и распределение накачки задают пространственное преобразование сигнала. Обучается только линейный выходной слой.

Для подбора рабочих режимов вычислителя проводилась многопараметрическая оптимизация с помощью библиотеки Optuna. Проверялись различные числа сердцевин, длины волокна, коэффициенты и фазы обратной связи, пространственное распределение накачки, масштабы входного сигнала и размеры временной маски. Расчёты проводились на вычислительных ресурсах НГУ. На задаче предсказания хаотического ряда Макки–Гласса получено существенное снижение ошибки при переходе от одного волоконного канала к нескольким связанным сердцевинам. Кроме того, найден режим, в котором временная маска не требуется.

Научное содержание работы

Постановка задачи

Резервуарные вычисления позволяют использовать динамику физической системы для обработки временных последовательностей. В отличие от обычных рекуррентных нейронных

сетей, внутренние параметры резервуара не обучаются. На его вход подаётся сигнал, а набор состояний физической системы служит признаками для линейной регрессии. В оптическом варианте такой подход привлекателен возможностью обработки сигналов с высокой скоростью.

Одна из распространённых схем основана на нелинейном элементе с задержанной обратной связью. Чтобы получить достаточно большое число виртуальных узлов, каждый входной символ обычно разбивается на много временных отсчётов и умножается на маску. Это увеличивает продолжительность обработки одного символа. Мы исследовали другой вариант: использовать не только временные, но и пространственные степени свободы активного многосердцевидного волокна. Цель заключалась в том, чтобы оценить, насколько межсердцевидная связь и независимо задаваемое усиление позволяют уменьшить размер временной маски без потери точности предсказания.

Современное состояние проблемы

Фотонные резервуары с обратной связью изучаются как на основе одного нелинейного узла, так и с использованием оптических усилителей, микрорезонаторов и многомодовых волокон. В одномодовом варианте основным способом увеличения размерности состояния остаётся временное мультиплексирование. Пространственная структура многомодовых систем даёт дополнительные степени свободы, но извлечение отдельных пространственных каналов и управление ими могут быть сложными.

Многосердцевидное волокно занимает промежуточное положение: каждая сердцевина формирует отдельный доступный канал, но поля в соседних сердцевинах связаны и обмениваются энергией. В активном волокне можно дополнительно менять распределение эффективного усиления за счёт накачки. В работе рассматривалось, можно ли использовать эту управляемую нелинейную динамику как резервуар для предсказания временных рядов.

Описание работы и использованные алгоритмы

Схема вычислителя приведена на рис. 1. Входной оптический сигнал проходит временную и пространственную модуляцию и поступает в активное многосердцевидное волокно. Часть выходного поля после задержки возвращается на вход, другая часть регистрируется. В численной модели накачка не распространяется отдельным полем: её влияние представлено эффективными коэффициентами усиления и энергиями насыщения в сердцевинах. Для формирования признаков используются интенсивности оптических полей, а не их комплексные амплитуды.

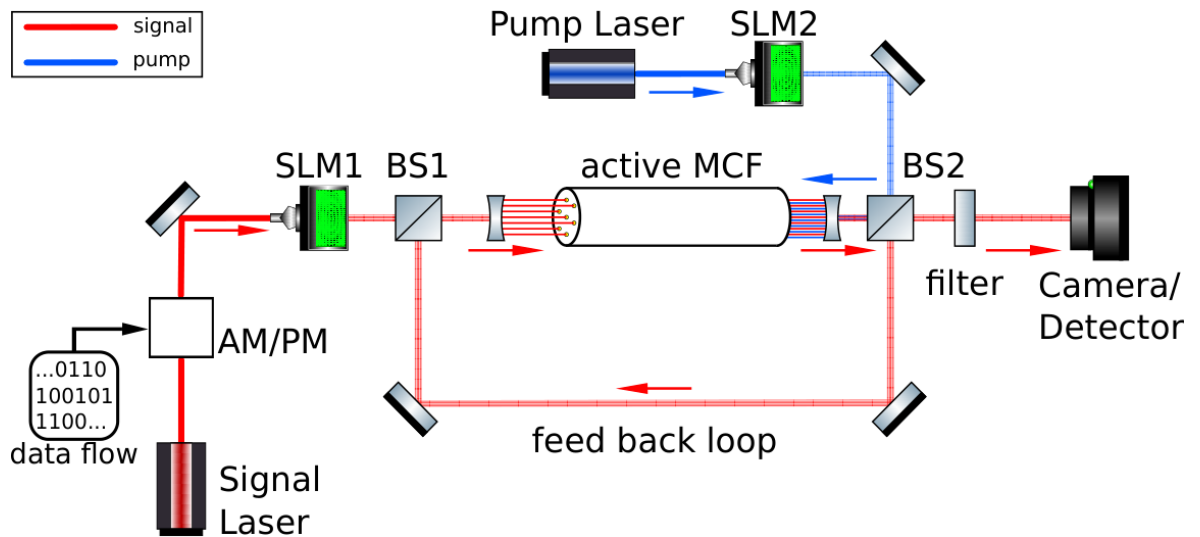


Рис. 1. Схема резервуарного вычислителя на основе активного многосердцевинного волокна с задержанной оптической обратной связью.

Были рассмотрены односердцевинная система и многосердцевинные волокна с гексагональным расположением 7 и 19 сердцевин (рис. 2). Межсердцевинная связь рассчитывается по геометрии волокна и перекрытию мод. Нелинейная эволюция описывается системой связанных нелинейных уравнений Шрёдингера, учитывающей керровскую нелинейность, линейную связь между сердцевинами, потери и насыщаемое усиление. Для решения используется метод расщепления по физическим процессам с преобразованием Фурье по времени, реализованный в программном комплексе fiberprop.

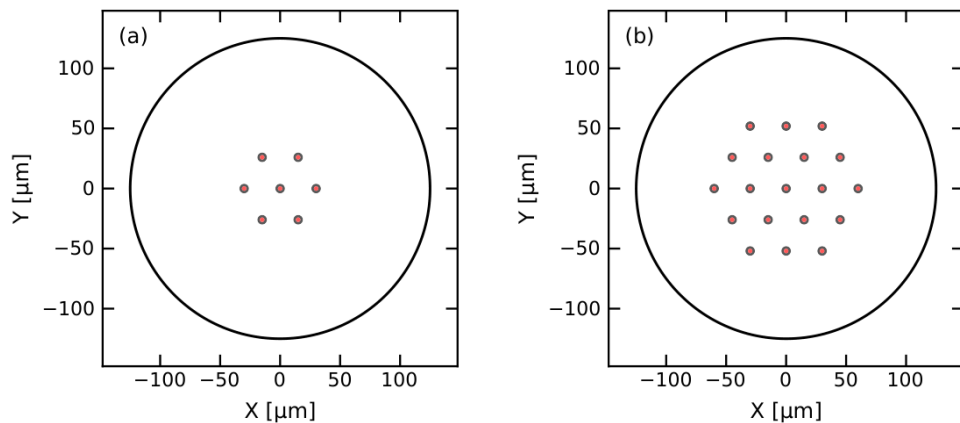


Рис. 2. Геометрии семи- и девятнадцатисердцевинного волокна, использованные в расчётах.

В основных расчётах резервуарного вычислителя дисперсионный член был отключён, а шум усиленного спонтанного излучения не добавлялся. Это позволило отдельно исследовать влияние обратной связи, нелинейности, межсердцевинной связи и насыщения усиления. Поэтому полученные результаты характеризуют численную модель в выбранных условиях, а не экспериментально измеренные характеристики готового устройства.

Работоспособность резервуара проверялась на задаче предсказания хаотического ряда Макки–Гласса на один шаг вперёд. Использовались параметры $\tau = 17$, $n = 10$, $\beta = 0,2$ и $\gamma = 0,1$. После переходного участка длиной 500 отсчётов оставлялась последовательность из 10 000 символов, разделённая по времени на обучающую, валидационную и тестовую части в соотношении 8000:1000:1000. Перемешивание по времени не применялось. Исходный ряд и его аттрактор показаны на рис. 3.

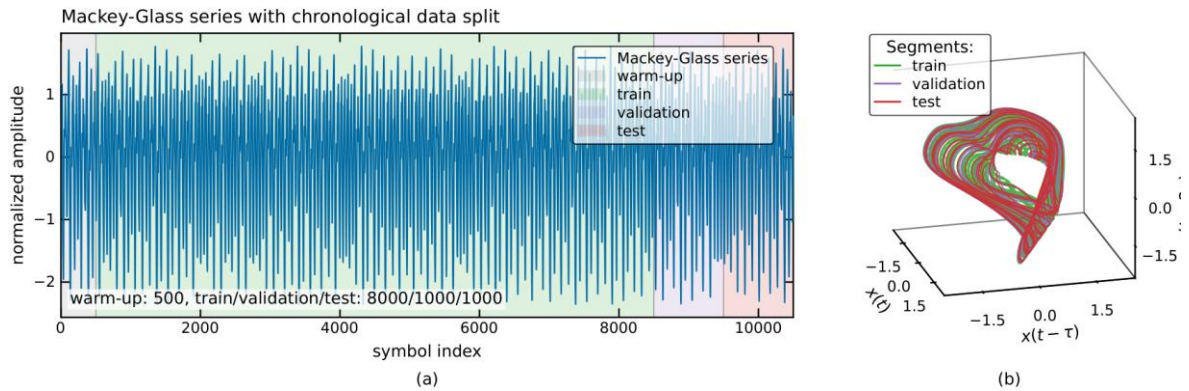


Рис. 3. Хаотический ряд Макки–Гласса, разбиение на выборки и проекция аттрактора. Рисунок из препринта arXiv:2606.17671.

Для каждого символа измеренные интенсивности в отдельных сердцевинах и отсчётах временной маски объединялись в вектор признаков. При N сердцевинах и M временных позициях его размерность равна $D = N \times M$. Выходные веса определялись гребневой регрессией (ridge regression) с константой регуляризации, выбираемой по валидационной выборке. Для выбора регуляризации применялось правило одной стандартной ошибки на последовательных временных блоках валидации. Тестовая часть использовалась только после окончания подбора режима.

Затем проводилась оптимизация параметров самого оптического резервуара. При помощи Optuna подбирались коэффициент обратной связи k , её фазовый сдвиг, длина волокна, масштаб входного сигнала, размер маски, задержка и мощность накачки каждой сердцевины. В использованной области поиска k менялся от 0,5 до 0,99, длина волокна от 0,01 до 1,5 м, мощность накачки одной сердцевины от 0 до 3 Вт; размер временной маски подбирался в пределах от 5 до 1000 отсчётов. Для варианта без временной маски M фиксировалось равным единице. Критерием оптимизации служила ошибка NRMSE на валидационной выборке.

Результаты расчётов

В таблице приведены лучшие найденные режимы для рассматриваемых вариантов резервуара. В ней отдельно показаны ошибки на валидационной и тестовой выборках. Режимы с временной маской при 40 ГГц и с одной пространственной маской при 1 ГГц нельзя

сравнивать как эксперимент с изменением только одного параметра, поскольку вместе со способом кодирования меняется и частота модуляции.

Число сердцевин	Режим работы		NRMSE (валидация)	NRMSE (тест)
1	Временная маска, 40 ГГц	87	0,596	0,625
7	Одинаковая временная маска, 40 ГГц	02	0,0651	0,0723
19	Одинаковая временная маска, 40 ГГц	02	0,0611	0,0593
7	Только пространственная маска, 1 ГГц		0,0323	0,0326
19	Только пространственная маска, 1 ГГц		0,0157	0,0147

Таблица 1. Лучшие режимы для предсказания ряда Макки–Гласса (по данным статьи arXiv:2606.17671).

В односердцевинном варианте при 40 ГГц ошибка на валидационной выборке составила около 0,596. При семи сердцевинах и одинаковой временной маске ошибка снизилась до 0,0651, то есть приблизительно в девять раз. При этом в найденных режимах размер маски уменьшился с 787 до 102 отсчётов. Для девятнадцатисердцевинного варианта получено значение 0,0611. Сравнение показывает, что использование связанных пространственных каналов существенно обогащает набор признаков на выходе резервуара.

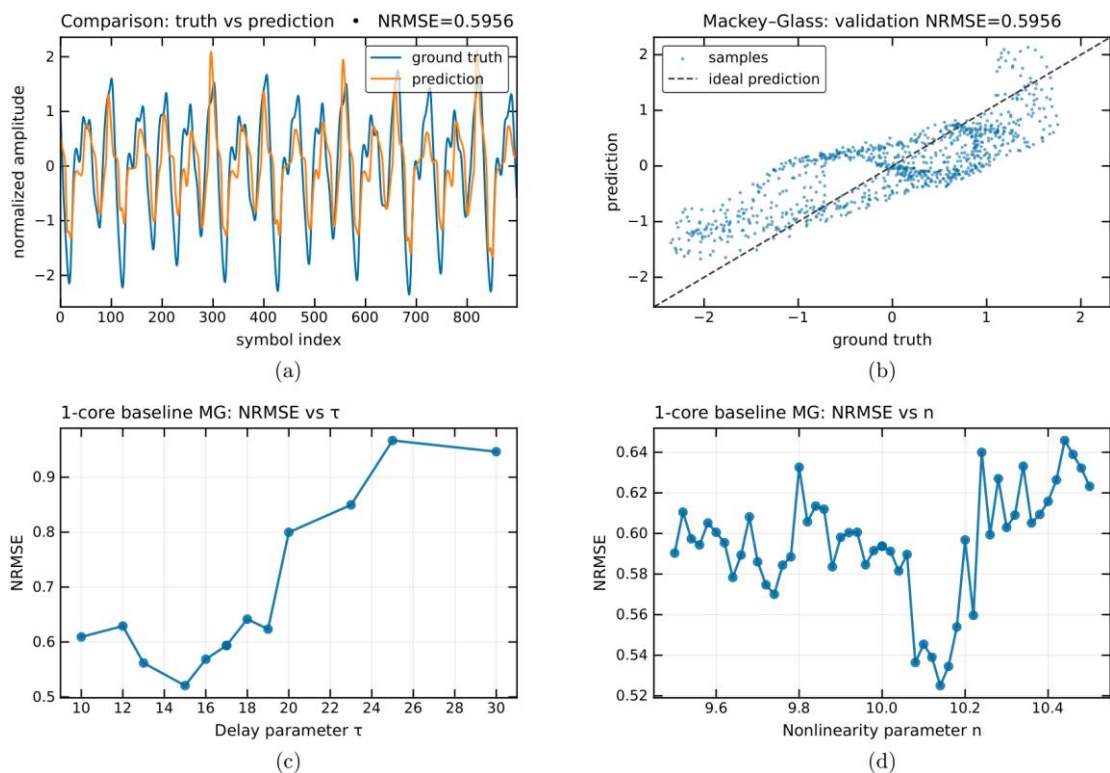


Рис. 4. Односердцевинный резервуар: пример предсказания ряда, зависимость предсказанного значения от исходного и чувствительность ошибки к параметрам задачи.

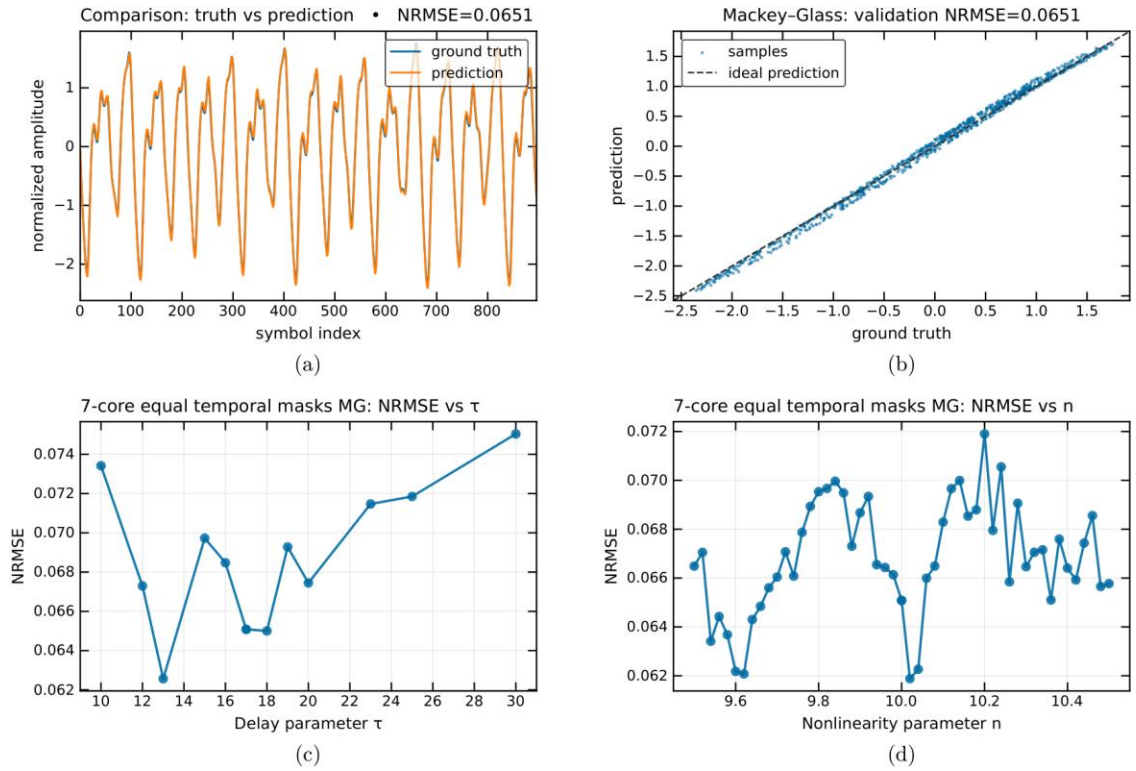


Рис. 5. Резервуар с семью сердцевинами и одинаковой временной маской: результаты предсказания ряда Макки–Гласса.

Отдельный интерес представляет режим без временной маски. При частоте модуляции 1 ГГц оказалось достаточно одного временного отсчёта на символ. В семисердцевинной системе валидационная NRMSE составила 0,0323, а в девятнадцатисердцевинной 0,0157. В этом случае память задаётся задержанной обратной связью, а разнообразие признаков формируется за счёт пространственного распределения входа и нелинейного взаимодействия полей в сердцевинах. Для семисердцевинного варианта результаты показаны на рис. 6.

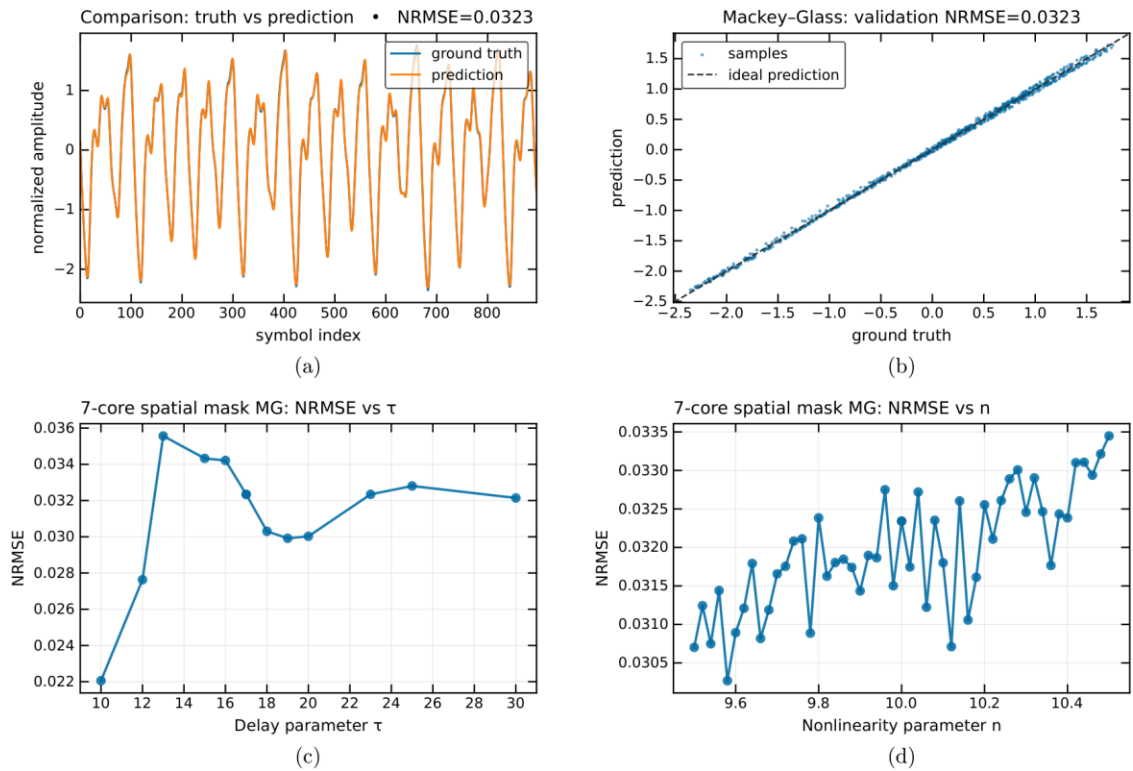


Рис. 6. Резервуар с семью сердцевинами при пространственном кодировании без временной маски ($M = 1$, частота 1 ГГц).

Таким образом, численные расчёты показали возможность использовать активное многосердцевинное волокно не только как набор параллельных выходных каналов, но и как нелинейное преобразование с управляемой рабочей точкой. На исследованной задаче пространственные степени свободы позволяют сократить число последовательно передаваемых временных отсчётов. Полученные оценки относятся к выбранной модели и задаче предсказания; для оценки практической устойчивости потребуются расчёты с шумом, дисперсией, изменением параметров и последующая экспериментальная проверка.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Оптимизация резервуарного вычислителя требует большого числа независимых расчётов для разных сочетаний параметров. Каждое испытание включает моделирование распространения оптического сигнала по связанным сердцевинам с обратной связью, получение состояний резервуара, обучение линейного выходного слоя и оценку ошибки. При увеличении числа сердцевин, числа временных отсчётов и длины входной последовательности стоимость одного испытания заметно возрастает.

Использование кластера НГУ позволило распараллелить поиск рабочих режимов Optuna между отдельными процессами и существенно сократить время подбора параметров по сравнению с последовательным выполнением того же набора испытаний. Общее журнальное хранилище поддерживало накопление результатов параллельных запусков и возобновление

расчётов после остановки. За счёт этого удалось исследовать односердцевинную, семи- и девятнадцатисердцевинную конфигурации, подобрать распределение накачки и сравнить режимы с временным и пространственным кодированием.

Результаты численных расчётов вошли в препринт Reservoir computing based on multicore fibers [1]. Они могут быть использованы при дальнейшем моделировании резервуарных вычислителей с учётом шума и дисперсии, а также при подготовке экспериментальной реализации на основе активного многосердцевинного волокна.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. I. S. Chekhovskoy, S. Mitsai, G. Patrin, M. Fedoruk, A. Kokhanovskiy. Reservoir computing based on multicore fibers. arXiv:2606.17671 (2026). <https://arxiv.org/abs/2606.17671>

По материалам данного исследования также подготовлена журнальная рукопись. Представленные в отчёте рисунки 1–6 взяты из указанного препринта.