

УДК 535.8+004.383.5+004.383.8.032.26

Оптико-цифровая система пространственной фильтрации для нейросетевых приложений

© 2026 г. А. А. Волков, Е. Ю. Злоказов, А. А. Керов, А. С. Овчинников, Д. В. Павленко, В. Г. Родин, Р. С. Стариков, Ф. А. Ушаков, П. А. Черёмхин, А. В. Шифрина

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

В работе представлена экспериментальная система пространственной фильтрации световых распределений, реализованная на базе высокоскоростных высокоразрешающих микрозеркальных пространственно-временных модуляторов света. Система предназначена для использования в качестве оптического предускорителя для гибридной реализации нейронных сетей, включающей оптическую и облегченную (содержащую меньшее количество обучаемых параметров) цифровую части. Представлены результаты испытания функционирования системы. Приводятся результаты оптических экспериментов по формированию сигналов системы двух типов: взаимокорреляционных функций бинарных контурных изображений с инвариантными корреляционными фильтрами и сверток бинарных контурных изображений с произвольно заданными функциями. В первом случае система используется для решения задач распознавания в качестве коррелятора. Получение сигналов второго типа может применяться при реализации входного слоя сверточной нейронной сети, позволяя за счет оптического преобразования значительно снизить разрешение обрабатываемого изображения, сохраняя часть информации, необходимую для дальнейшей обработки. Представленные экспериментальные результаты демонстрируют высокую степень согласования с проведенным ранее численным моделированием и подтверждают работоспособность предложенной системы. При использовании максимально доступного быстродействия использованных при построении системы пространственно-временных модуляторов света системой обеспечивается пропускная способность обработки информации на уровне десятков гигабит в секунду.

Ключевые слова: оптические нейронные сети, дифракционные нейронные сети, пространственная фильтрация, импульсный отклик, компьютерная голография.

Введение

Возможность применения оптических и фотонных средств при реализации нейросетевых вычислений – предмет исследований на протяжении более чем сорока лет [1–4]. Фундаментальными достоинствами оптики являются широкая полоса временной и пространственной модуляции света и параллелизм оптических систем, обеспечивающий возможность создания глобальных связей между нейронами. Новая волна интереса к исследованиям в области оптического нейрокомпьютинга обусловлена значительным прогрессом в создании фотонной элементной базы. Начиная со второй половины 2010-х гг. проведено значительное количество экспериментальных работ в данной области, основанных на широком спектре подходов [4–6]. Современная практика и ряд известных теоретических оценок показывают, что по сравнению с электронными средствами фотонные нейроподобные системы обработки информации потенциально могут обеспечить одновременно и более высокое быстродействие, и меньшее энергопотребление.

✉ А.В. Шифрина: AVShifrina@mephi.ru

Поступила в редакцию: 16.12.2025

После доработки: 18.02.2026

Принята к публикации: 24.02.2026

Одним из актуальных и активно развивающихся направлений в области оптического нейрокомпьютинга является создание дифракционных нейронных сетей [7, 8]. Однако возможность создания полностью оптической дифракционной нейронной сети ограничивается до сих пор не преодоленными затруднениями в практической реализации, в первую очередь сложностью реализации нелинейных преобразований в оптической системе. Дифракционные оптические системы по своей природе реализуют линейное преобразование над входным световым полем, осуществляя его свертку со своим импульсным откликом. Как следствие, на данный момент весьма перспективным подходом является создание гибридных оптико-цифровых нейронных сетей.

Гибридная нейронная сеть (рис. 1) представляет собой сочетание оптического предускорителя и нейронной сети, реализованной цифровыми электронными средствами. Задав импульсный отклик оптической части системы, можно использовать ее как входной сверточный слой. Сформированные им сигналы обрабатываются последующими слоями, реализованными электронными устройствами. В таком случае функция импульсного отклика оптической системы соответствует набору обучаемых параметров первого слоя и определяет возможный вид обработки входных данных.

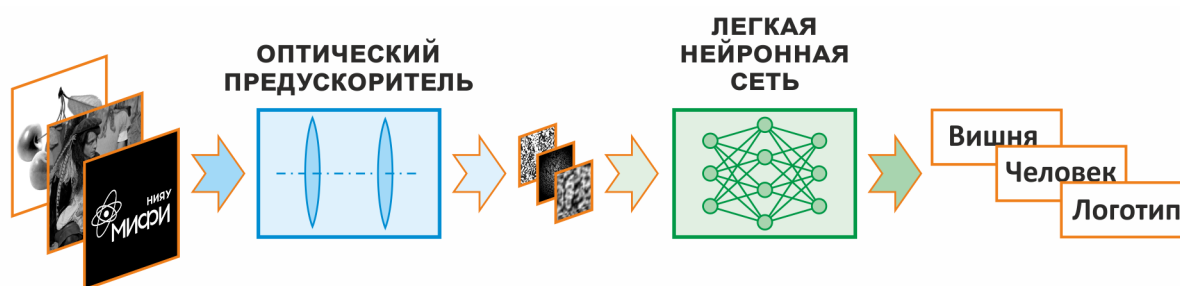


Рис. 1. Схема гибридной нейронной сети, состоящей из оптического предускорителя и «легкой» цифровой нейронной сети

Данный подход согласуется с фундаментальными принципами работы сверточных нейронных сетей [9], активно используемых в настоящее время. Основной резон такого подхода заключается в том, что оптическая часть аппаратно выполняет некоторое преобразование пространственного сигнала большой размерности, сокращая при этом объем данных, но оставляя их достаточно информативными для обработки последующими слоями. Как следствие, требования к скорости работы электронной части нейросистемы значительно снижаются. На данный момент опубликован ряд работ, исследующих различные варианты гибридных нейронных систем с оптическим ускорителями [10, 11], в том числе с получением спекл-картин, свертки с графическими примитивами, с получением корреляционных функций и т.д.

В данной работе представлена оптико-цифровая дифракционная система пространственной фильтрации, построенная по классической схеме с фильтром в области пространственных частот и предназначенная для экспериментов по реализации нейроподобных вычислений. В качестве основных элементов системы используются высокоскоростные высокоразрешающие микрозеркальные пространственно-временные модуляторы света, что обеспечивает ее высокую пропускную способность [12, 13].

1. Система пространственной фильтрации

Основными элементами реализованной системы с фильтрацией в плоскости пространственных частот (рис. 2) являются:

- источник излучения – лазер (Л, твердотельный непрерывный лазер Pr:YLF, длина волны 639 нм);
- коллиматор (К, состоит из двух линз, в совместной фокальной плоскости которых установлена микродиафрагма);
- два микрозеркальных пространственно-временных модулятора света (МЗ ПВМС): МЗ ПВМС1 с разрешением 1920×1080 отсчетов и линейным размером пиксела 10.6 мкм, МЗ ПВМС2 с разрешением 2560×1600 отсчетов и линейным размером пиксела 7.56 мкм;
- две фурье-линзы (ФЛ1 и ФЛ2) с фокусными расстояниями 500 мм;

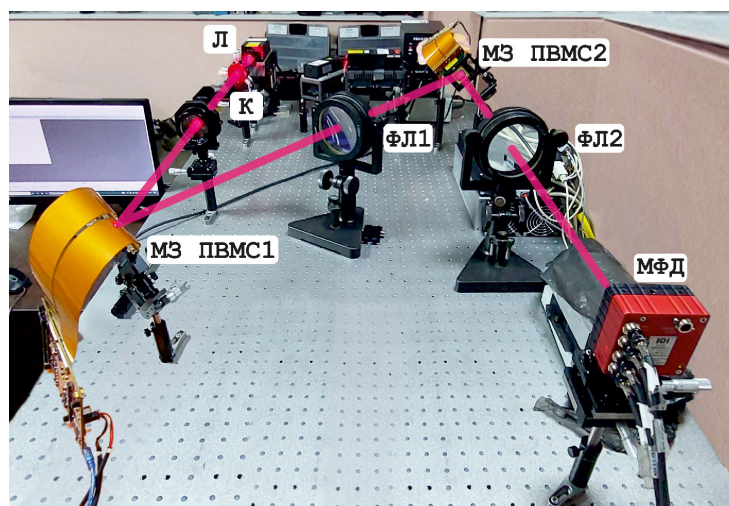


Рис. 2. Фотография системы пространственной фильтрации

– регистрирующий матричный фотодетектор МФД (разрешение 7920×6004 отсчетов, линейный размер пиксела 4.6 мкм).

Излучение от источника Л проходит через коллиматор К, в результате чего диаметр лазерного пучка увеличивается до размера, несколько большего размера апертуры системы (до 19 мм). Далее излучение попадает на МЗ ПВМС1, расположенный в передней фокальной плоскости ФЛ1. В задней фокальной плоскости ФЛ1, совпадающей с передней фокальной плоскостью ФЛ2, располагается МЗ ПВМС2. Излучение, отраженное от МЗ ПВМС2, проходит через ФЛ2 и попадает на матрицу фотодетектора МФД, расположенную в ее задней фокальной плоскости.

Входной сигнал системы подается на МЗ ПВМС1. Для реализации комплексного импульсного отклика системы в качестве фильтров пространственных частот используются компьютерно синтезированные голограммы, выводимые на МЗ ПВМС2. МЗ ПВМС обладают наивысшим быстродействием среди высокоразрешающих средств пространственной модуляции света; их частота смены кадров составляет более 10 кГц, что обеспечивает пропускную способность системы обработки на уровне десятков Гбит/с. МЗ ПВМС по динамическим характеристикам превосходят конкурирующие с ними жидкокристаллические ПВМС [12, 13]. Однако МЗ ПВМС осуществляют бинарную амплитудную модуляцию, поэтому для представления входных сигналов схемы в виде полутонных изображений и голограмм необходима их предварительная бинаризация. Сигнал, зарегистрированный МФД, передается на персональный компьютер. Число отсчетов входных изображений и пространственных фильтров определяется разрешениями МЗ ПВМС1 и МЗ ПВМС2, соответственно. Размерность же оптически зарегистрированного выходного сигнала, впоследствии передаваемого в цифровую нейронную сеть, может быть адаптирована под требования решаемой задачи. В частности, размерность может быть контролируемым образом снижена по сравнению с размерностью входного изображения. В установке применяется цифровая камера с заведомо избыточным разрешением для обеспечения широкого диапазона варьируемых параметров детектирования при проведении экспериментов.

2. Эксперименты по получению взаимнокорреляционных функций

Использование оптического коррелятора как системы предобработки при нейросетевом распознавании или, наоборот, использование нейронной сети как постобработчика сигнала коррелятора – подходы, известные с конца 1980-х гг. [14–17]. В частности, недавно была продемонстрирована возможность достижения высокого качества распознавания изображений предобученной сверточной нейронной сетью, использующей в качестве входных данных корреляционные сигналы сниженной размерности, полученные с применением инвариантных корреляционных фильтров [18].

С помощью рассматриваемой в настоящей работе системы были проведены эксперименты по получению взаимнокорреляционных функций бинарных контурных изображений и инвариантных корреляционных фильтров. Эксперименты аналогичны приведенным в [19]. В качестве тестовых использовались

контурные изображения размером 256×256 пикселей. В качестве эталонного объекта использован инвариантный фильтр с линейным фазовым коэффициентом [20]. Фильтр обеспечивает сохранение корреляционного максимума при плоском повороте объекта в диапазоне 180 град. Использованный фильтр – комплекснозначный математический объект, в оптической системе он реализуется как компьютерно синтезированная голограмма Фурье. При использовании таких голограмм, синтезируемых по методу, аналогичному записи фильтра Вандер Люгта [21], в выходной плоскости системы формируется распределение, содержащее в нулевом порядке дифракции сумму входного изображения и его же свертки с автокорреляцией функции импульсного отклика системы, а в «+1» и «-1» порядках дифракции – области корреляции и свертки изображения и импульсного отклика системы. Указанное продемонстрировано на рис. 3.

Примеры выходных сигналов системы, полученных в результате оптического эксперимента по регистрации сигналов, представлены на рис. 4. Выходные сигналы представлены полностью и содержат пространственно разделенные: нулевой порядок и области корреляции и свертки («+1» и «-1» дифракционные порядки). На практике, при распознавании обрабатывается только область корреляции.

Полученные результаты хорошо согласуются с ранее проведенным моделированием [18] и демонстрируют качество и работоспособность созданной системы.

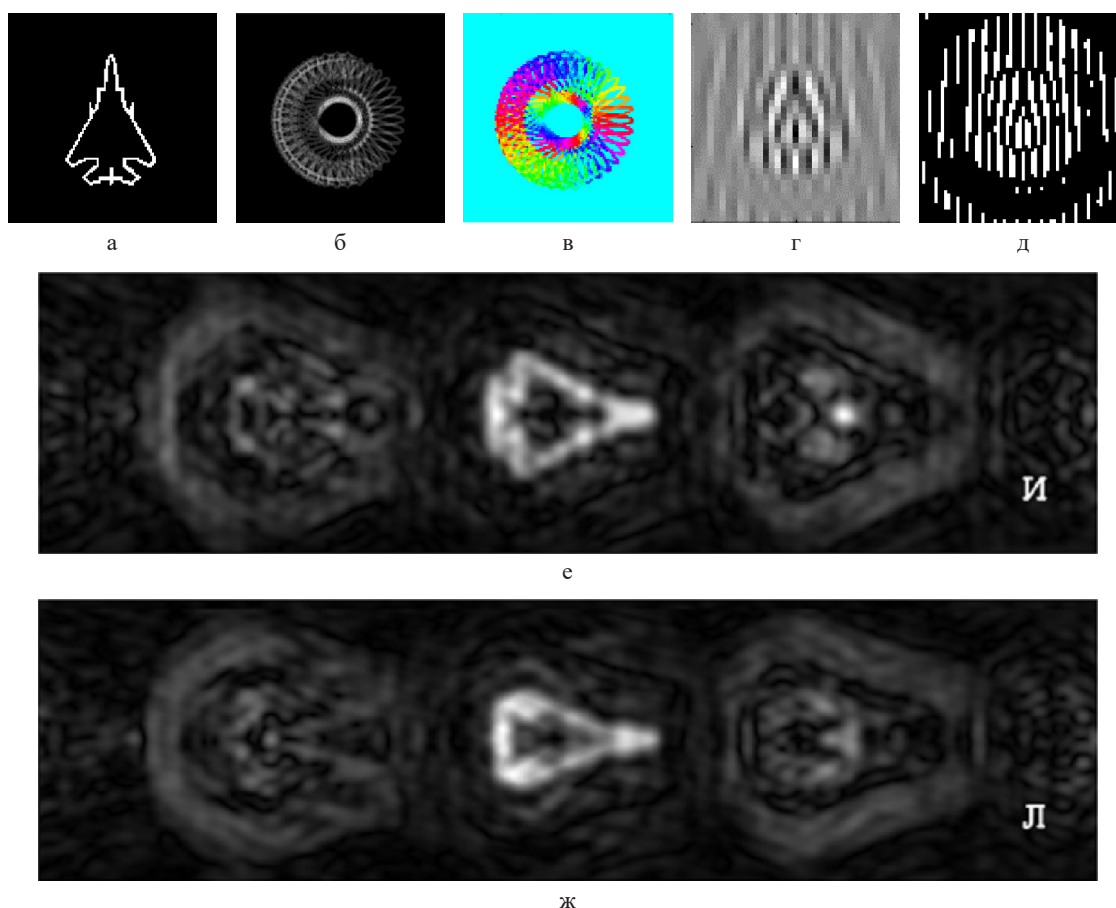


Рис. 3. Истинный объект (а). Распределения амплитуды (б) и фазы (в) фильтра. Пропускание компьютерно синтезированного голографического фильтра (центральная часть) до (г) и после бинаризации методом Отсу (д). Расчет выходных сигналов коррелятора (полное выходное поле): для изображений истинных объектов, имеется корреляционный пик (е); для ложных, пик отсутствует (ж)

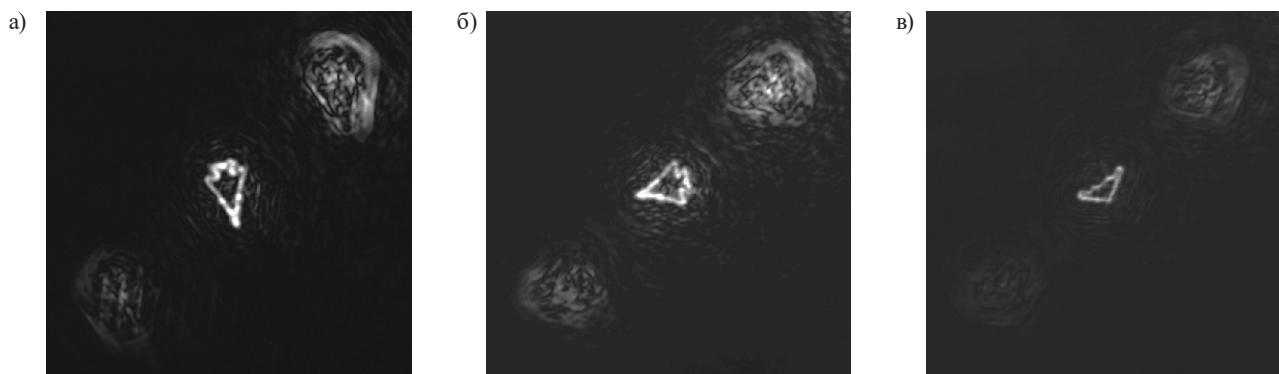


Рис. 4. Выходные корреляционные сигналы (полное выходное поле оптической системы, сигнал корреляции расположен в левом нижнем углу): истинное изображение под различными углами (а, б) , ложное изображение (в)

3. Эксперименты по получению сверток с произвольно заданными функциями

Использование в качестве ядра свертки функций, не связанных с обрабатываемым объектом (например, графических примитивов), нередко применяется при решении задач распознавания образов, в том числе при реализации нейроподобных методов.

Были проведены оптические эксперименты по регистрации сигналов свертки. В качестве входного изображения использовалось бинарное изображение (рис. 3,а). Примеры реализованных функций импульсного отклика в виде бинарных изображений представлены на рис. 5,а–в. Соответствующие им голографические фильтры синтезировались численно, в виде голограмм Фурье (рис. 5,з,д).

Примеры зарегистрированного отклика синтезированной голограммы Фурье, выведенной на МЗ ПВМС (рис. 6), демонстрируют качество воспроизведения заданной функции импульсного отклика.

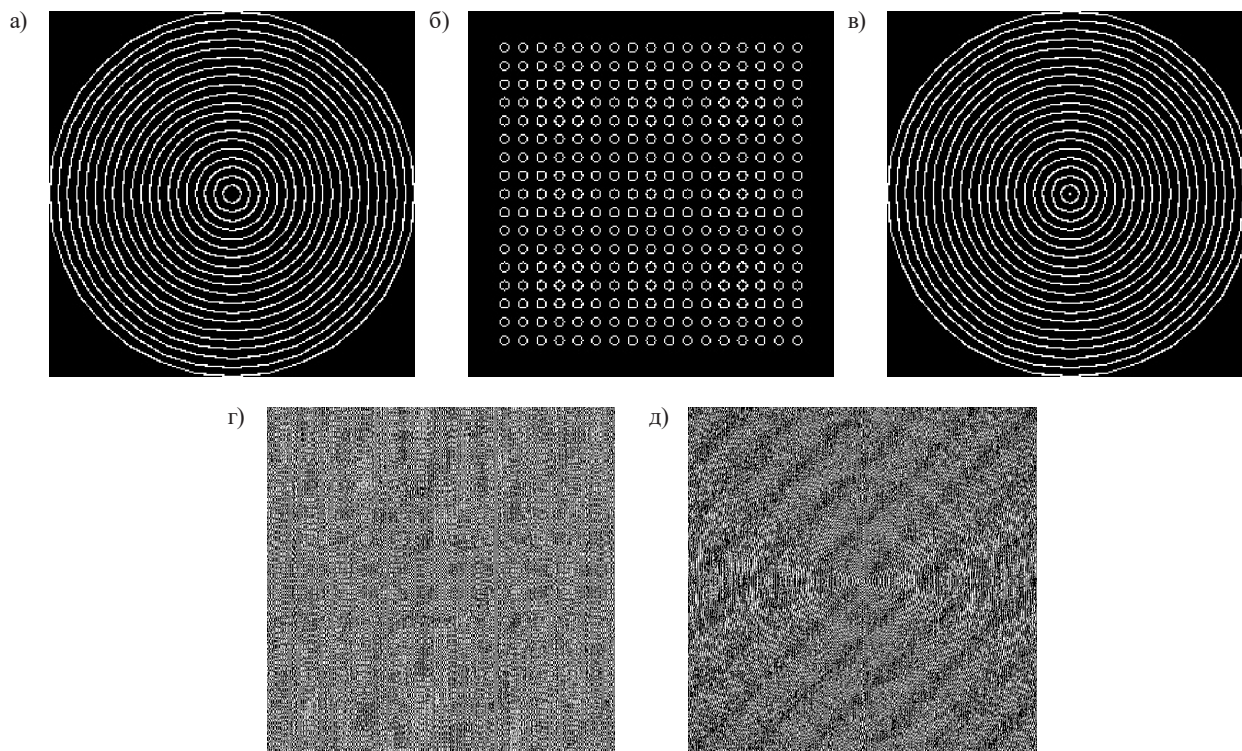


Рис. 5. Функции импульсного отклика типа «Концентрические кольца» (а), «Кольца в узлах решетки» (б) и «Концентрические кольца с дельта-функцией в центре» (в). Синтезированные голографические фильтры после бинаризации: импульсный отклик типа «Кольца в узлах решетки» (г), импульсный отклик типа «Концентрические кольца» (д)

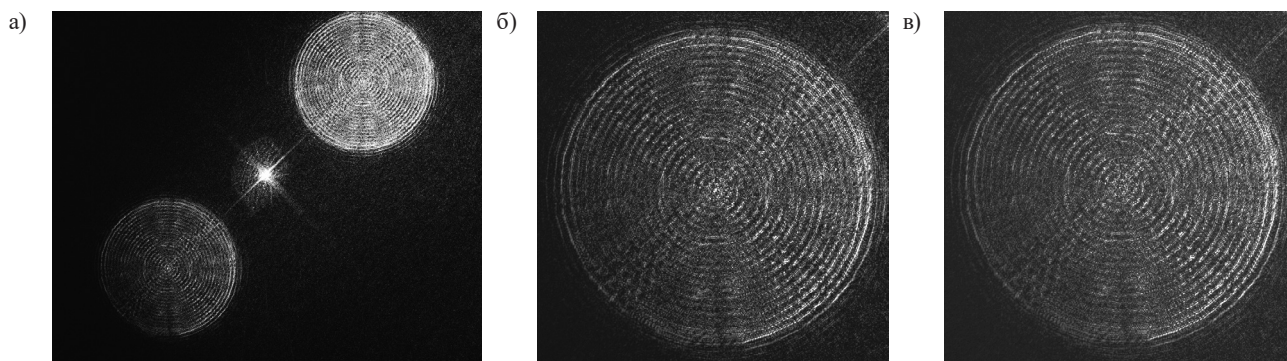


Рис. 6. Импульсный отклик системы, полное поле: а – два комплексно-сопряженных изображения, соответствующие заданной функции «Концентрические кольца с дельта-функцией в центре» (соответствующему рис. 5,в); «+1» дифракционный порядок для функций, соответствующих: б – рис. 5,в, в – рис. 5,а

Полное поле содержит в «+1» и «-1» порядках дифракции световые распределения, определяемые заданной функцией импульсного отклика и ее комплексно-сопряженной, соответственно.

Также проведены эксперименты по регистрации оптических сигналов свертки изображений и голографических фильтров с импульсными откликами заданной формы, соответствующих рис. 5. Результаты представлены на рис. 7. В «+1» и «-1» порядках дифракции формируются два сигнала свертки входного изображения и заданной функции и комплексно-сопряженный ей. Предполагается, что на практике будет регистрироваться и подвергаться дальнейшей обработке только один из них..

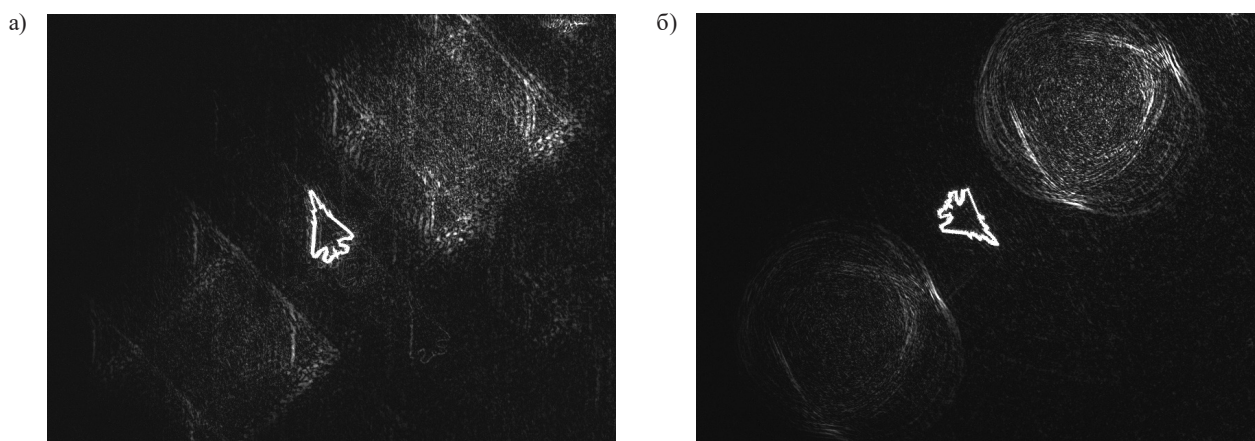


Рис. 7. Выходные сигналы системы (показано полное поле) для случаев: а – импульсный отклик «Кольца в узлах решетки»; б – импульсный отклик «Концентрические кольца»

Заключение

В статье представлена экспериментальная опτικο-цифровая система пространственной фильтрации, реализованная на базе высокоскоростных высокоразрешающих микрзеркальных пространственно-временных модуляторов света. При максимально доступном быстродействии модуляторов системой обеспечивается пропускная способность обработки информации на уровне десятков гигабит в секунду. Система предназначена для применения в качестве ускорителя вычислений в составе гибридной нейронной сети. Система была успешно испытана путем получения свертки входных изображений с функциями разных типов: с комплексной, содержащей информацию о входном изображении, и с вещественными, не содержащими информации о входном изображении. Система также может использоваться для решения других задач обработки информации, сводимых к выполнению пространственной фильтрации.

Финансирование

Работа выполнена в рамках исследований по гранту № 23-12-00336 Российского научного фонда (РНФ), а также при финансовой поддержке программы Приоритет 2030 (в части оплаты труда до начала проекта РНФ).

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

А.А. Волков – создание установки, проведение экспериментов.

Е.Ю. Злоказов – создание установки, компьютерный синтез инвариантных фильтров, компьютерный синтез голографических фильтров.

А.А. Керов – проведение экспериментов.

А.С. Овчинников – создание установки, проведение экспериментов.

Д.В. Павленко – проведение экспериментов, участие в обсуждении результатов.

В.Г. Родин – создание установки, проведение экспериментов, участие в обсуждении результатов.

Р.С. Стариков – планирование работы, проведение экспериментов, участие в обсуждении результатов, редактирование текста статьи.

Ф.А. Ушаков – создание установки, проведение экспериментов, участие в обсуждении результатов.

П.А. Черёмхин – создание установки, проведение экспериментов, участие в обсуждении результатов.

А.В. Шифрина – проведение экспериментов, участие в обсуждении результатов, редактирование текста статьи.

Список литературы

1. *Denz C.* Optical neural networks. Vieweg+Teubner Verlag, 2013. 472 p.
2. *Caulfield H.J., Kinser J., Rogers S.K.* Optical neural networks // Proceedings of the IEEE, 1989. V. 77. № 10. P. 1573–1583.
3. *Jutamulia S.* Selected papers on optical neural networks. SPIE Optical Engineering Press, 1994. 692 p.
4. *Wetzstein G., Ozcan A., Gigan S., Fan S., Englund D., Soljačić M., Denz C., Psaltis D.* Inference in artificial intelligence with deep optics and photonics // Nature, 2020. V. 588. № 7836. P. 39–47. DOI: 10.1038/s41586-020-2973-6
5. *Shastri B.J., Tait A.N., Ferreira de Lima T., Pernice W.H., Bhaskaran H., Wright C.D., Prucnal P.R.* Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing // Nature Photonics, 2021. V. 15. № 2. P. 102–114. DOI: 10.1038/s41566-020-00754-y
6. *Huang C., Sorger V.J., Miscuglio M., Al-Qadasi M., Mukherjee A., Lampe L., Nichols M., Tait A.N., Ferreira de Lima T., Marquez B.A., Wang J., Chrostowski L., Fok M.P., Brunner D., Fan S., Shekhar S., Prucnal P.R., Shastri B.J.* Prospects and applications of photonic neural networks // Advances in Physics: X, 2022. V. 7. № 1. DOI: 10.1080/23746149.2021.1981155.
7. *Chen H., Lou S., Wang Q., Huang P., Duan H., Hu Y.* Diffractive deep neural networks: Theories, optimization, and applications // Applied Physics Reviews, 2024. V. 11. № 2. DOI: 10.1063/5.0191977.
8. *Lin X., Rivenson Y., Yardimci N.T., Veli M., Luo Y., Jarrahi M., Ozcan A.* All-optical machine learning using diffractive deep neural networks // Science, 2018. V. 361. № 6406. P. 1004–1008. DOI: 10.1126/science.aat8084.
9. *LeCun Y., Boser B., Denker J.S., Henderson D., Howard R.E., Hubbard W., Jackel L.D.* Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition // Neural Computation, 1989. V. 1. № 4. P. 541–551.
10. *Yildirim M., Dinc N.U., Oguz I., Psaltis D., Moser C.* Nonlinear processing with linear optics // Nature Photonics, 2024. V. 18. № 10. P. 1076–1082. DOI: 10.1038/s41566-024-01494-z.
11. *Chang J., Sitzmann V., Dun X., Heidrich W., Wetzstein G.* Hybrid optical-electronic convolutional neural networks with optimized diffractive optics for image classification // Scientific reports, 2018. V. 8. №. 1. Art. number 12324. DOI: 10.1038/s41598-018-30619-y.
12. *Волков А.А., Миниханов Т.З., Злоказов Е.Ю., Шифрина А.В., Петрова Е.К., Стариков Р.С.* Характеристики временной динамики жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов как ограничение быстродействия перестраиваемых дифракционных нейросетей // Измерительная техника, 2025. Т. 74. № 1. С. 83–89.
13. *Овчинников А.С., Волков А.А., Шифрина А.В., Петрова Е.К., Небавский В.А., Стариков Р.С.* Применение микрзеркального модулятора света в дифракционных оптических нейронных сетях: пространственновременные характеристики и ограничения // Измерительная техника, 2025. Т. 74. № 6. С. 93–101.
14. *Figure J., Refregier P., Rajbenbach H.J., Huignard, J.P.* Neural optoelectronic correlator for pattern recognition // Optical Information Processing Systems and Architectures III. SPIE, 1991. Т. 1564. С. 550–561.

15. Casasent D.P. An optical correlator feature extractor neural net system // *Optical Engineering*, 1992. Т. 31. № 5. С. 971.
16. Birch P., Akter H., Young R., Chatwin C. Coherent correlator design analysis for the implementation of deep learning networks // *Journal of the Optical Society of America A*, 2024. Т. 41. № 2. С. 272–282.
17. Стариков Р.С. Оптические дифракционные корреляторы изображений: краткий очерк развития и новейшие достижения. Обзор // *Оптический журнал*, 2025. Т. 92. № 3. С. 5–31.
18. Гончаров Д.С., Злоказов Е.Ю., Петрова Е.К., Стариков Р.С. Обработка выходных сигналов корреляторов совместного преобразования с применением предварительно обученной сверточной нейронной сети // *Оптический журнал*, 2025. Т. 92. № 2. С. 87–95.
19. Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Shaulskiy D.V., Starikov R.S., Zlokazov E.Yu. Invariant correlation filter with linear phase coefficient holographic realization in 4-F correlator // *Optical Engineering*, 2011. Т. 50. № 6. С. 065803.
20. Kumar B.V., Hassebrook L.G., Hostetler L.D. Linear phase coefficient composite filter banks for distortion-invariant optical pattern recognition // *Optical Engineering*, 1990. Т. 29. № 9. С. 1033.
21. Lugt A.V. Signal detection by complex spatial filtering // *IEEE Transactions on information theory*, 1964. Т. 10. № 2. С. 139–145.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2026, vol. 15, no. 2, pp. 134–142

Optoelectronic spatial filtering system for neural network applications

A. A. Volkov, E. Yu. Zlokazov, A. A. Kerov, A. S. Ovchinnikov, D. V. Pavlenko, V. G. Rodin, R. S. Starikov, F. A. Ushakov, P. A. Cheremkhin, A. V. Shifrina [✉]

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409, Russia
[✉] AVShifrina@mephi.ru

Received December 16, 2025; revised February 18, 2026; accepted February 24, 2026

The paper presents an experimental spatial filtering system implemented with high-speed high-resolution micro-mirrored spatial light modulators. The system is intended to be used as an optical accelerator for the hybrid neural networks, which include optical and lightweight (with fewer trainable parameters) digital parts. The results of testing the system are presented. The optical results for the formation of two types of system signals are presented: cross-correlation functions of binary contour images and invariant correlation filters, and convolutions functions of binary contour images with arbitrary functions. In the first case the system can be used in recognition tasks as an optical correlator. Signals of the second type can be used to implement the input layer of a convolutional neural network, allowing optically reduce the size of the processed image, while preserving information needed for further processing. The presented experimental results demonstrate a high degree of agreement with the previously performed numerical modeling and confirm the operability of the proposed system. When using state-of-the-art spatial light modulators, the system provides processing bandwidth of tens of gigabits per second.

Keywords: optical neural networks, diffractive neural networks, spatial filtering, impulse response function, computer-generated holography.

Reference

1. Denz C. *Optical neural networks*. Vieweg+Teubner Verlag, 2013. 472 p.
2. Caulfield H.J., Kinser J., Rogers S.K. *Optical neural networks*. Proceedings of the IEEE, 1989. Vol. 77. No. 10. Pp. 1573–1583.
3. Jutamulia S. *Selected papers on optical neural networks*. SPIE Optical Engineering Press, 1994. 692 P.
4. Wetzstein G., Ozcan A., Gigan S., Fan S., Englund D., Soljačić M., Denz C., Psaltis D. Inference in artificial intelligence with deep optics and photonics. *Nature*, 2020. Vol. 588. № 7836. P. 39–47. DOI: 10.1038/s41586-020-2973-6.

5. *Shastri B.J., Tait A.N., Ferreira de Lima T., Pernice W.H., Bhaskaran H., Wright C.D., Prucnal P.R.* Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing. *Nature Photonics*, 2021. Vol. 15. No. 2. Pp. 102–114. DOI: 10.1038/s41566-020-00754-y.
6. *Huang C., Sorger V.J., Miscuglio M., Al-Qadasi M., Mukherjee A., Lampe L., Nichols M., Tait A.N., Ferreira de Lima T., Marquez B.A., Wang J., Chrostowski L., Fok M.P., Brunner D., Fan S., Shekhar S., Prucnal P.R., Shastri B.J.* Prospects and applications of photonic neural networks. *Advances in Physics: X*, 2022. Vol. 7. No. 1. DOI: 10.1080/23746149.2021.1981155.
7. *Chen H., Lou S., Wang Q., Huang P., Duan H., Hu Y.* Diffractive deep neural networks: Theories, optimization, and applications. *Applied Physics Reviews*, 2024. Vol. 11. No. 2. DOI: 10.1063/5.0191977.
8. *Lin X., Rivenson Y., Yardimci N.T., Veli M., Luo Y., Jarrahi M., Ozcan A.* All-optical machine learning using diffractive deep neural networks. *Science*, 2018. Vol. 361. No. 6406. P. 1004–1008. DOI:10.1126/science.aat8084
9. *LeCun Y., Boser B., Denker J.S., Henderson D., Howard R.E., Hubbard W., Jackel L.D.* Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition. *Neural Computation*, 1989. Vol. 1. No. 4. Pp. 541–551.
10. *Yildirim M., Dinc N.U., Oguz I., Psaltis D., Moser C.* Nonlinear processing with linear optics *Nature Photonics*, 2024. Vol. 18. No. 10. Pp. 1076–1082. DOI: 10.1038/s41566-024-01494-z.
11. *Chang J., Sitzmann V., Dun X., Heidrich W., Wetzstein G.* Hybrid optical-electronic convolutional neural networks with optimized diffractive optics for image classification. *Scientific reports*, 2018. Vol. 8. No. 1. Art. number 12324. DOI: 10.1038/s41598-018-30619-y.
12. *Volkov A.A., Minikhanov T.Z., Zlokazov E.Yu., Shifrina A.V., Petrova E.K., Starikov R.S.* Characteristics of temporal dynamics of liquid crystal spatial modulators as a limitation of the performance of tunable diffractive neural networks. *Measurement Techniques*, 2025. Vol. 68. P. 86–92. (in Russian)
13. *Ovchinnikov A.S., Volkov A.A., Shifrina A.V., Petrova E.K., Nebavskiy V.A., Starikov R.S.* Application of a digital micromirror device in diffractive optical neural networks: space-time characteristics and limitations // *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2025. Vol. 74. No. 6. P. 93–101. (in Russian).
14. *Figue J., Refregier P., Rajbenbach H.J., Huignard J.P.* Neural optoelectronic correlator for pattern recognition // *Optical Information Processing Systems and Architectures III*. SPIE, 1991. Vol. 1564. Pp. 550–561.
15. *Casasent D.P.* An optical correlator feature extractor neural net system // *Optical Engineering*, 1992. Vol. 31. No. 5. P. 971.
16. *Birch P., Akter H., Young R., Chatwin C.* Coherent correlator design analysis for the implementation of deep learning networks // *Journal of the Optical Society of America A*, 2024. Vol. 41. No 2. Pp. 272–282.
17. *Starikov R.S.* Opticheskie difraktsionnye korrelyatori izobrazhenii: kratkii ocherk razvitiya i noveishie dostizheniya [Optical diffractive image correlators: A brief history and newest achievements. Review]. *Opticheskii Zhurnal*. 2025. Vol. 92. No. 3. Pp. 5–31. (in Russian)
18. *Goncharov D.S., Zlokazov E.Yu., Petrova E.K., Starikov R.S.* Processing the output signals of joint transform correlators using a pre-trained convolutional neural network // *Journal of Optical Technology*, 2025. Vol. 92. No. 2. Pp. 120–125.
19. *Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Shaulskiy D.V., Starikov R.S., Zlokazov E.Yu.* Invariant correlation filter with linear phase coefficient holographic realization in 4-F correlator // *Optical Engineering*, 2011. Vol. 50. No. 6. P. 065803.
20. *Kumar B.V., Hassebrook L.G., Hostetler L.D.* Linear phase coefficient composite filter banks for distortion-invariant optical pattern recognition // *Optical Engineering*, 1990. Vol. 29. No. 9. P. 1033.
21. *Lugt A.V.* Signal detection by complex spatial filtering // *IEEE Transactions on information theory*, 1964. Vol. 10. No. 2. Pp. 139–145.