

# Исследование возможности оптической реализации сверточного слоя нейронной сети

А.В. Рыбакин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** В данной работе проведено исследование принципиальной возможности частичной или полной оптической реализации сверточного слоя классической сверточной нейронной сети с использованием быстрого преобразования Фурье. Было проведено численное моделирование оптической реализации свертки и протестировано ее применение в обученной нейронной сети путем замены обычной операции свертки на оптическую свертку в сверточном слое.

## 1. Введение

В последнее время популярность нейронных сетей все больше и больше возрастает. Наиболее популярный класс задач, решаемых с применением нейронных сетей - анализ и классификация различного рода сигналов (в том числе и изображений), которая чаще всего решается с применением так называемых сверточных нейронных сетей.

Основным преимуществом таких сетей для решения подобных задач является сверточный слой, который фактически решает задачу выделения признаков из классифицируемых объектов. Таким образом сверточная нейронная сеть принимает на вход не набор признаков, как обычные классификаторы, а непосредственно классифицируемые объекты. Сочетание двух этих свойств: отсутствие необходимости выделения признаков, и работа непосредственно с классифицируемыми объектами делает сверточные нейронные сети отличным инструментом для работы с изображениями и особенно для работы с видео-потоками.

Однако, преимущество таких сетей является одновременно их узким местом. Операция свертки над изображениями высокого разрешения является весьма трудоемкой операцией, так как количество производимых операций свертки на сверточном слое может достигать порядка сотен и тысяч, что делает этот слой весьма медленным, что естественным образом накладывает ограничения на разрешение изображения, особенно, если существует необходимость обработки данных в реальном времени и с высоким разрешением.

В связи с этим еще в 90-х годах прошлого века рассматривалась возможность оптической реализации отдельных элементов и полной нейронной сети [1-4]. В отличие от электронов фотоны не взаимодействуют друг с другом при пересечении путей, что позволяет выполнять параллельно, причем со скоростью света, множественные линейные операции [5], такие как повторные матричные умножения, присущие каждой нейронной сети. В частности, хорошо известна оптическая реализация операции свертки с помощью Фурье-коррелятора [6].

Последнее время внимание ученых к данной тематике возобновилось с целью оптической реализации более сложных элементов оптических сетей, включая рекуррентные

операции [7, 8], а также мультиплексирование [9, 10]. Заметим, что мультиплексирование позволяет дополнительно увеличить количество параллельно исполняемых операций, и может быть реализовано с помощью многопорядковых дифракционных оптических элементов [11-13]. В настоящей работе будет исследована возможность оптической реализации сверточного слоя сверточной нейронной сети, которая потенциально может улучшить производительность сверточных нейронных сетей, как минимум, при решении задач связанных с обработкой потоков видео-данных в реальном времени.

## 2. Моделирование оптической свертки

Операция свертки может быть реализована оптически с использованием Фурье-коррелятора [6, 14, 15]. Оптическая схема Фурье-коррелятора представлена на рисунке 1.

Фурье-коррелятор с математической точки зрения является оптической реализацией Фурье-свертки (1).

$$f * g = F^{-1}[F(f)F(g)] \quad (1)$$

где  $F$  - это финитное преобразование Фурье от некоторой функции,  $f$  - это функция подаваемая на вход,  $g$  - ядро свертки.

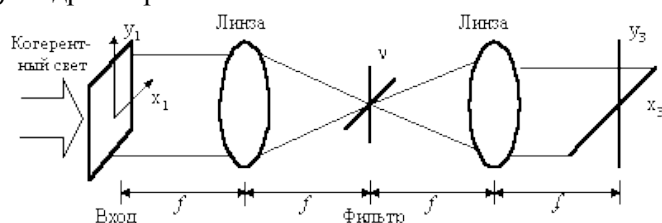


Рисунок 1. Оптическая схема Фурье-коррелятора.

Если соотнести формулу (1) со схемой, представленной на рисунке 1, получим, что  $f$  - входной сигнал, а  $g$  - это фильтр. В зависимости от вида фильтра, можно оптически выполнять различные операции, включая дифференцирование, интегрирование, контрастирование поданного сигнала [16-20], а также разложение его по некоторому базису [21-23].

В нашем случае в роли функции  $f$ , подаваемой на вход Фурье-коррелятора, выступает изображение получаемое в фокальной плоскости первой линзы.

Наглядное сравнение результатов обычной и оптической свертки исходного изображения (рисунок 2а) с ядром, взятым случайным образом со сверточного слоя сверточной нейронной сети alexnet, (рисунок 2б) представлены на рисунках 3а и 3б соответственно.



Рисунок 2. Исходное изображение (а) и ядро свертки (б).

На рисунке 3 представлены, результаты обычной операции свертки (а) и смоделированной оптической операции свертки (б) разложенные по цветовым каналам.

На приведенных рисунках видна одна отличительная особенность оптической операции свертки: размер исходного изображения сохраняется, что с одной стороны потенциально позволит нам извлекать из исходного изображения больше различной информации, однако, скорее всего потребует искусственного уменьшения размерности изображения, согласно классической архитектуре сверточной нейронной сети.

Моделирование производилось на языке Python 3.6 в среде разработки Jupyter Lab.

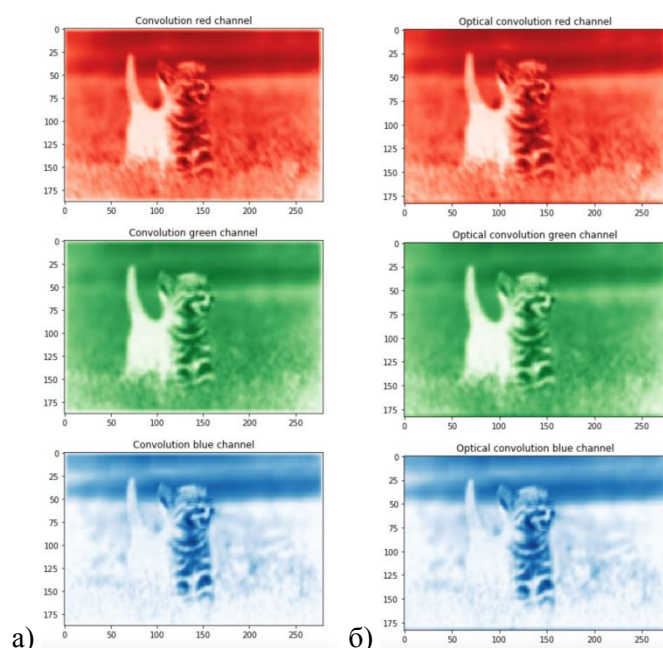


Рисунок 3. Сравнение результатов классической свертки (а) с оптической (б).

### 3. Тестовая нейронная сеть

В качестве нейронной сети для тестирования взята сверточная нейронная сеть для распознавания символов, обученная на базе данных MNIST [24]. На вход сеть принимает изображения рукописных букв, а на выходе выдает вектор вероятностей принадлежности входного изображения к классу какой-либо буквы. На рисунке 4 представлены примеры входных изображений.

Оценочная точность распознавания отдельных символов данной нейронной сетью составляет 0.9416.

С данной обученной сверточной нейронной сетью и будет проведен эксперимент. В первую очередь, планируется заменить обычную операцию свертки на смоделированную оптическую свертку и выяснить, как уже обученная сеть будет себя вести.

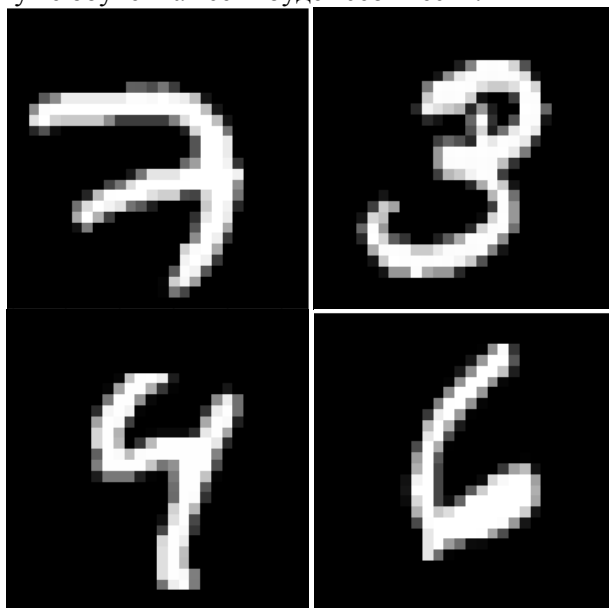


Рисунок 4. Примеры изображений из базы данных MNIST.

#### 4. Заключение

В работе было проведено моделирование оптической реализации операции свертки, обучена тестовая нейронная сеть и проведен анализ возможности использования оптической свертки вместо обычной операции свертки. В качестве следующего этапа исследования планируется провести более детальное моделирование и исследование оптического сверточного слоя с добавлением аберраций и различных искажений.

#### 5. Литература

- [1] Wagner, K. Multilayer optical learning networks / K. Wagner, D. Psaltis // *Applied Optics*. – 1987. – Vol. 26. – P. 5061-5076.
- [2] Lalanne, P. Optical inner-product implementation of neural networks models / P. Lalanne, P. Chavel, J. Taboury // *Applied Optics*. – 1989. – Vol. 28(2). – P. 377-387.
- [3] Fruehauf, N. Fourier Optical Realization of Cellular Neural Networks / N. Fruehauf, E. Lueder, G. Bader // *IEEE Transactions On Circuits and Systems-II Analog and Digital Signal Processing*. – 1993. – Vol. 40(3). – P. 156-162.
- [4] Li, H.Y. Optical network for real-time face recognition / H.Y. Li, Y. Qiao, D. Psaltis // *Applied Optics*. – 1993. – Vol. 32. – P. 5026-5035.
- [5] Denz, C. Optical Neural Networks // Springer Vieweg. – 1998. – Vol. 16. – P.12-20.
- [6] Weaver, C.S. A technique for optically convolving two functions / C.S. Weaver, J.W. Goodman // *Applied Optics*. – 1966. – Vol. 5. – P. 1248-1249.
- [7] Duport, F. All-optical reservoir computing / F. Duport, B. Schneider, A. Smerieri, M. Haelterman, S. Massar // *Opt. Express*. – 2012. – Vol. 20. – P. 22783-22795.
- [8] Brunner, D. Reconfigurable semiconductor laser networks based on diffractive coupling / D. Brunner, I. Fischer. // *Opt. Lett.* – 2015. – Vol. 40. – P. 3845-3857.
- [9] Richardson, D.J. Space-division multiplexing in optical fibres / D.J. Richardson, J.M. Fini, L.E. Nelson // *Nat. Photonics*. – 2013. – Vol. 7. – P. 354-362.
- [10] Tait, A.N. Broadcast and Weight: An Integrated Network For Scalable Photonic Spike Processing / A.N. Tait, S. Member, M.A. Nahmias, B.J. Shastri, P.R. Prucnal, J. Lightwave // *Technol.* – 2014. – Vol. 32(21). – P. 3427-3439.
- [11] Karpeev, S.V. Transverse mode multiplexing by diffractive optical elements / S.V. Karpeev, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, S.N. Khonina, M. Duparre, B. Luedge, J. Turunen // *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* – 2005. – Vol. 5854. – P. 1-12.
- [12] Khonina, S.N. Optical vortices in a fiber: mode division multiplexing and multimode self-imaging / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // *Recent progress in optical fiber research*. – 2012. – P. 450 p.
- [13] Kirilenko, M.S. Information Transmission Using Optical Vortices / M.S. Kirilenko, S.N. Khonina // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)* – 2012. – Vol. 22(2). – P. 81-89. DOI: 10.3103/S1060992X13020069.
- [14] Gregory, D.A. Real-time pattern recognition using a modified liquid crystal television in a coherent optical correlator // *Applied Optics*. – 1986. – Vol. 25. – P. 467-469.
- [15] Javidi, B. Optical implementation of neural networks for face recognition by the use of nonlinear joint transform correlators / B. Javidi, J. Li, Q. Tang // *Applied Optics*. – 1995. – Vol. 34. – P. 3950-3962.
- [16] Khonina, S.N. The phase rotor filter / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, M.V. Shinkaryev, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev // *Journal of Modern Optics*. – 1992. – Vol. 39(5). – P. 1147-1154.
- [17] Davis, J.A. Image processing with the radial Hilbert transform: theory and experiments / J.A. Davis, D.E. McNamara, D. Cottrel, J. Campos // *Optics Letters*. – 2000. – Vol. 25(5). – P. 99-101.
- [18] Cheng-Shan, G. Radial Hilbert transform with Laguerre–Gaussian spatial filters / G. Cheng-Shan, J.A. Davis, D.E. McNamara, D. Cottrel, J. Campos // *Optics Letters*. – 2006. – Vol. 31(10). – P. 1394-1396.

- [19] Ананьин, М.А. Моделирование оптической обработки изображений с использованием вихревого пространственного фильтра / М.А. Ананьин, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 4. – С.466-472.
- [20] Manzur, T. Optical correlator based target detection, recognition, classification, and tracking / T. Manzur, J. Zeller, S. Serati // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51. – P. 4976-4983.
- [21] Soifer, V.A. Decorrelated features of images extracted with the aid of optical Karhunen-Loeve expansion / V.A. Soifer, M.A. Golub, S.N. Khonina // Pattern Recognition and Image Analysis. – 1993. – Vol. 3(3). – P. 289-295.
- [22] Porfirev, A.P. Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions / A.P. Porfirev, S.N. Khonina // Proc. SPIE. – 2016. – Vol. 9807. DOI: 10.1117/12.2231378.
- [23] Khonina, S.N. A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre–Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, V.D. Pararin // Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – Vol. 105. – P.68-74. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.01.006.
- [24] The MNIST database of handwritten digits [Electronic resource] // Yann LeCun’s home page. – Access mode: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/> (04.12.2018).
- [25] Никоноров, А.В. Реконструкция изображений в дифракционно-оптических системах на основе сверточных нейронных сетей и обратной свертки / А.В. Никоноров, М.В. Петров, С.А. Бабилов, В.В. Кутикова, А.А. Морозов, А.А. Казанский // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 875-887. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-875-887.

## Research of possibility of optical convolution implementation in convolutional neural network’s convolutional layer

A.V. Rybakin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

**Abstract.** In this paper, a study was conducted of the fundamental possibility of a partial or complete optical implementation of the convolutional layer of a classical convolutional neural network using Fourier convolution. Also, a numerical simulation of the optical implementation of convolution was performed and tested with a trained neural network by replacing the usual convolution operation with an optical convolution in a convolutional layer.