

LETOVO RESEARCH ML  
CONFERENCE

| 07.02.2026

| ПОЛИНА НИКУЛИНА

# Исследование физических параметров оптических дифракционных нейронных сетей

# Содержание

1. Введение в глубокое обучение и нейронные сети
2. Физика света и дифракции
3. Дифракционные оптические нейронные сети
4. Архитектура и параметры модели
5. Эксперименты и результаты

# Оптические дифракционные нейронные сети

Что это и как работает?

# Ограничения электронных нейронных сетей

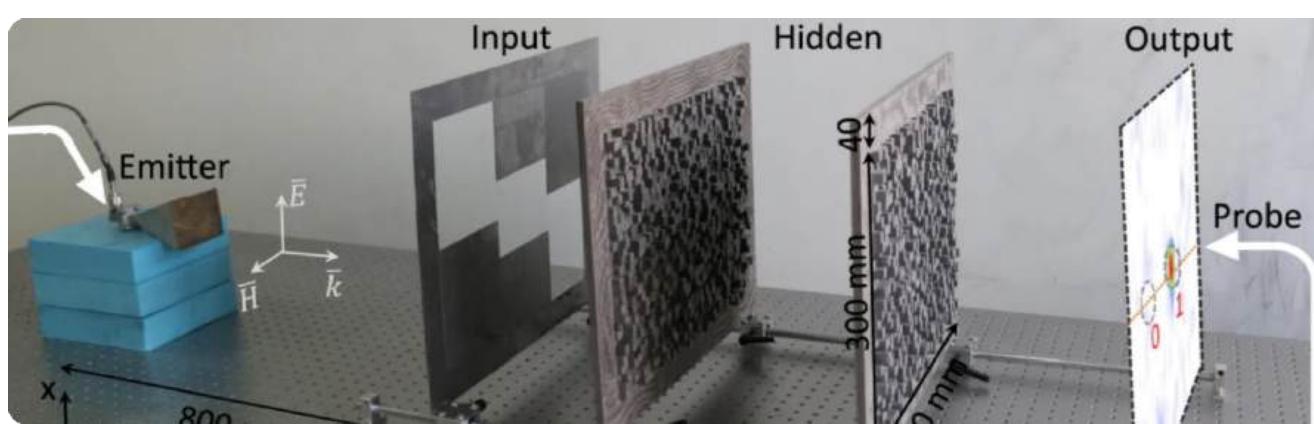
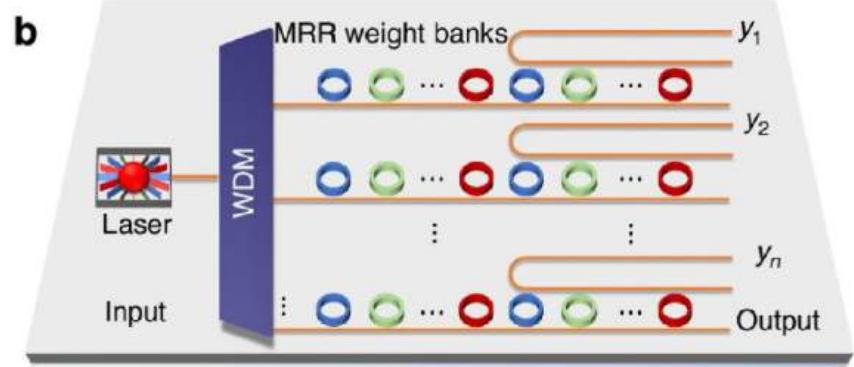
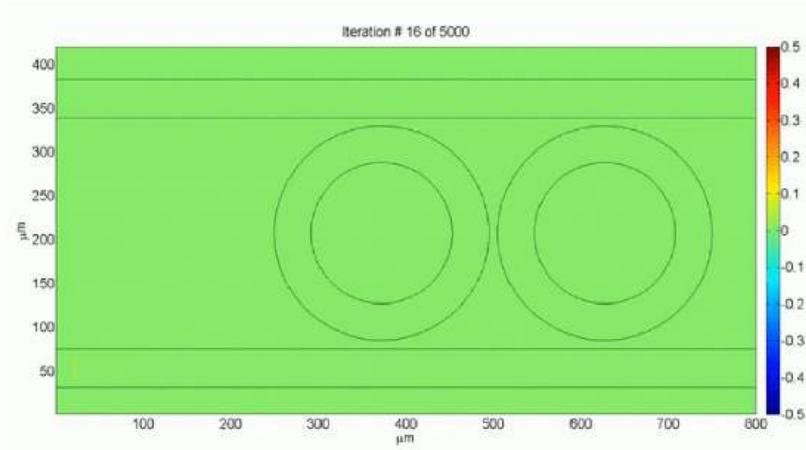
Закон Джоуля-Ленца

$$Q = Ult$$



*Microsoft project Natick*

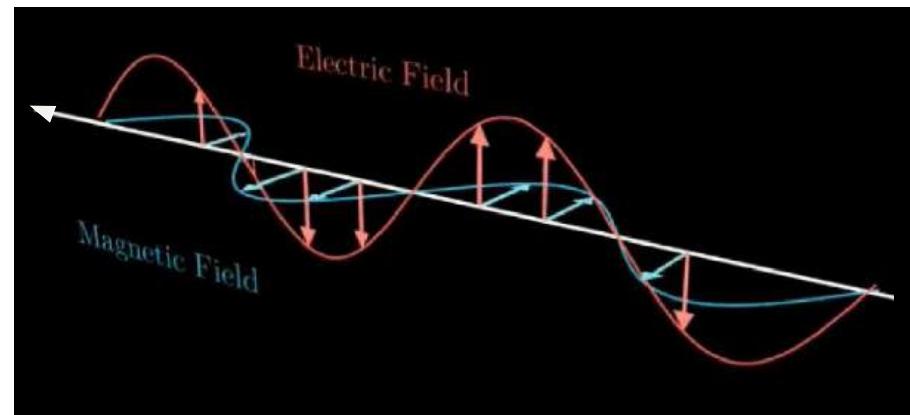
# Оптические нейронные сети



# Распространение света

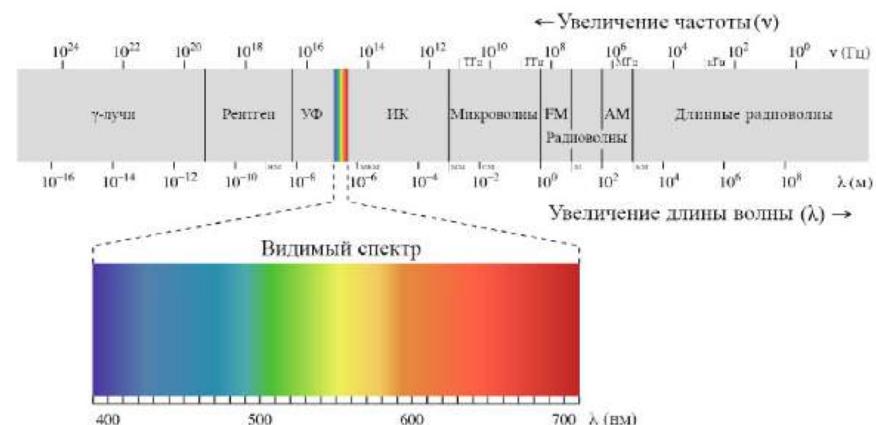
Волновое уравнение (из уравнений Максвелла):

$$\Delta u = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2},$$



В общем случае: волновая функция

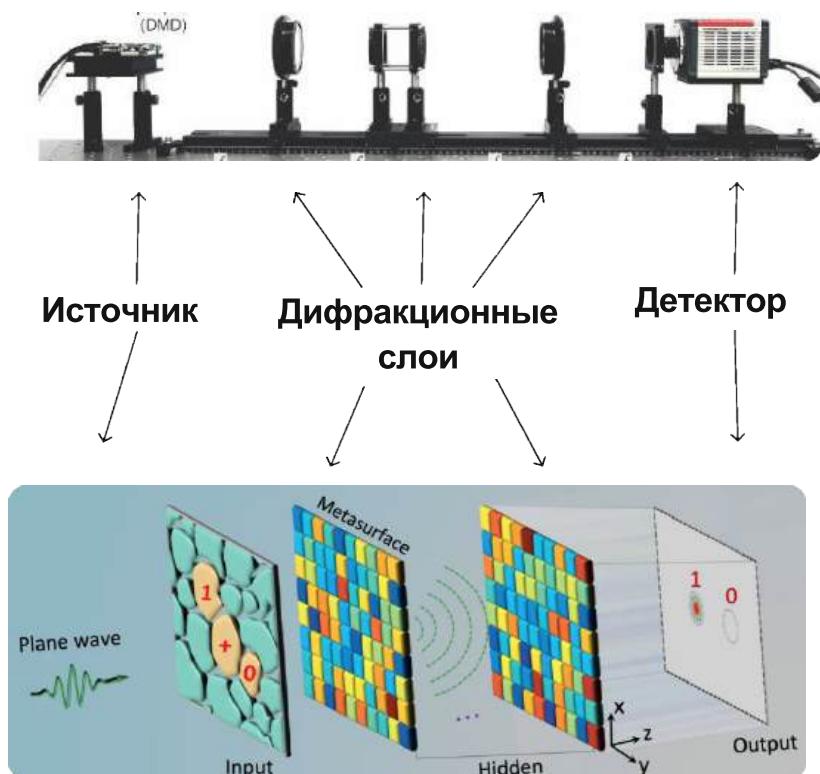
$$U(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) e^{i\phi(\mathbf{r})}$$



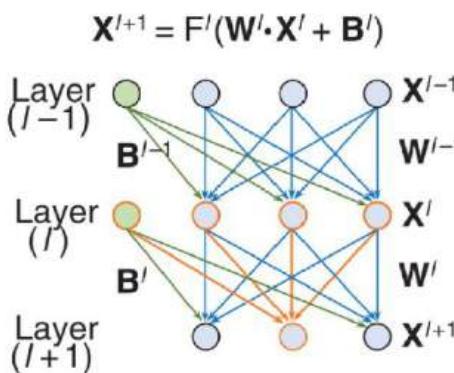
Плоская волна без временной зависимости

$$U(\mathbf{r}) = A_0 e^{i \vec{k} \cdot \vec{r}} \quad |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$$

# Дифракционные оптические нейронные сети

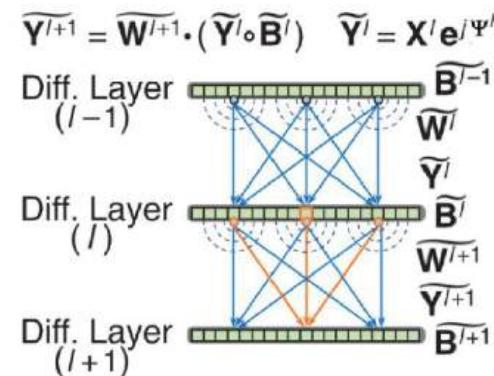


## Полносвязная сеть



$$X^{I+1} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Weight} \\ W^I \\ \text{Bias} \\ B^I \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Rectifier} \\ \{\cdot\} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} X^I \\ \cdot \\ + \\ B^I \end{array} \right\}$$

## Дифракционная сеть



$$\widetilde{Y}^{I+1} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Weight} \\ \widetilde{W}^{I+1} \\ \text{Bias} \\ \widetilde{B}^I \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Complex Value Matrix} \\ \{\cdot\} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} \text{Rectifier} \\ \{\cdot\} \circ \\ + \\ \widetilde{B}^I \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} \widetilde{Y}^I \\ \cdot \end{array} \right\}$$

# Физические параметры в ОДНН

Какие есть и на что влияют?

# Физические параметры в ОДНН

Свет:

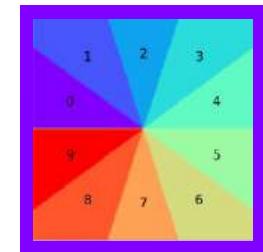
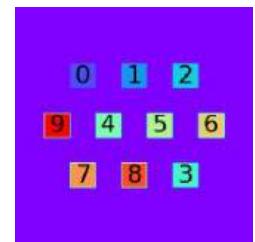
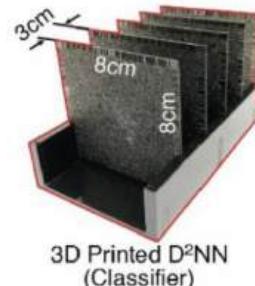
1.  $\phi$  - фаза
2.  $A$  - амплитуда
3.  $I$  - интенсивность

Модель:

1. Количество, размеры и форма пикселей
2. Расстояния между дифракционными слоями
3. Размеры и форма детектора

$$U(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) e^{i\phi(\mathbf{r})}$$

$$I(\mathbf{r}) = |U(\mathbf{r})|^2$$



Цель проекта - исследовать влияние формы детектора и расстояния между дифракционными слоями ОДНН на процесс обучения модели

# Используемые технологии

Физическое моделирование, датасет, глубокое обучение модели и др.

# Физическое моделирование: SVETIANNa



*SVETIANNa: open-source  
библиотека для  
проектирования  
оптических  
дифракционных сетей*

## Распространение волнового фронта:

В свободном пространстве:

$$U_2 = \mathcal{F}^{-1} [\mathcal{F}(U_1) e^{ik_z z}]$$

Через дифракционный слой:

$$U_2(\mathbf{r}) = U_1(\mathbf{r}) \odot e^{i\phi(\mathbf{r})}$$

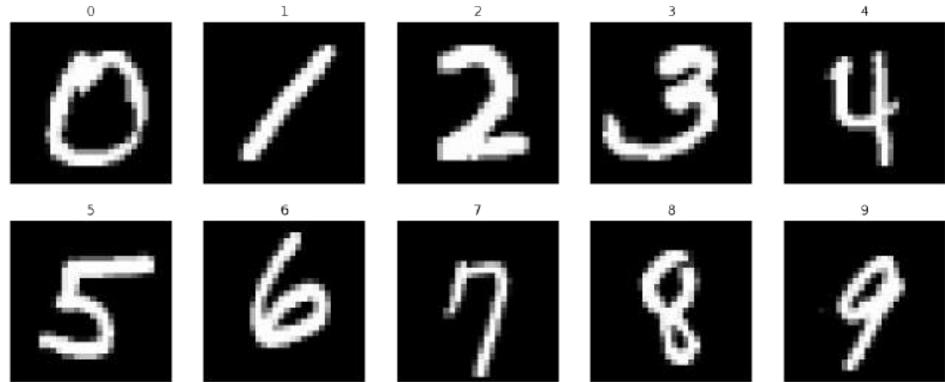
## Преобразования Фурье:

$$\mathcal{F}\{U(x)\}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} U(x) e^{-ikx} dx$$

$$\mathcal{F}^{-1}\{\tilde{U}(k)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}(k) e^{ikx} dk$$

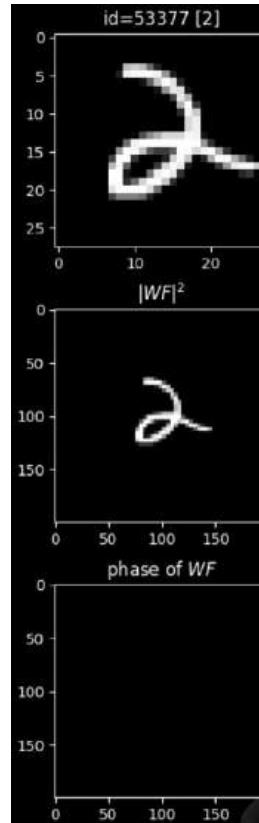


# Датасет: MNIST



## MNIST dataset:

- training set - 60000 it
- test set - 10000 it



## Обработка датасета:

- изображения отцентрированы в абсолютно белых пикселях
- интенсивность  $I = 1$ , в абсолютно черных  $I = 0$
- фаза везде одинаковая  $\phi = 2/\pi$

# Архитектура нейронной сети: PyTorch



*PyTorch: open-source фреймворк для  
создания нейронных сетей*

- Trainable parameters: phase masks of diffractive layers
- Fixed parameters: wavelength, distances, detector geometry
- Output: class probabilities
- Loss: cross-entropy
- Optimizer: Adam ( $\text{lr} \approx 10^{-3}$ )

# Общая модель ОДНН

Как устроена, что включает в себя?

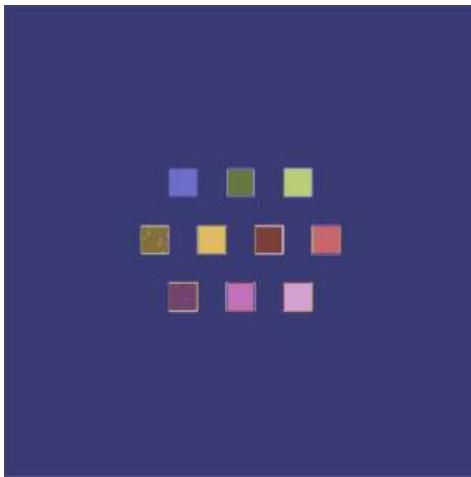
# Архитектура модели



## ▼(0) LinearOpticalSetup



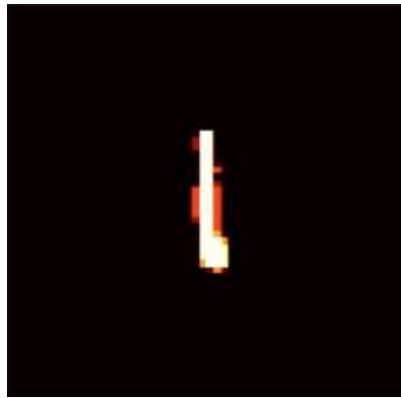
# Параметры модели



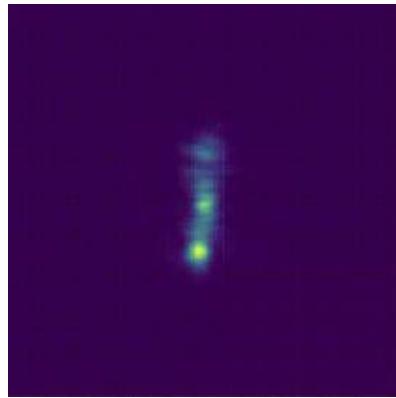
- длина волны: 600 нм
- размер пикселя (нейрона): 318 нм
- расстояние между дифракционными слоями: 24 мкм
- маска детектора: `torch.Tensor`
- количество эпох обучения: 10
- количество дифракционных слоёв: 5

**Маска детектора**

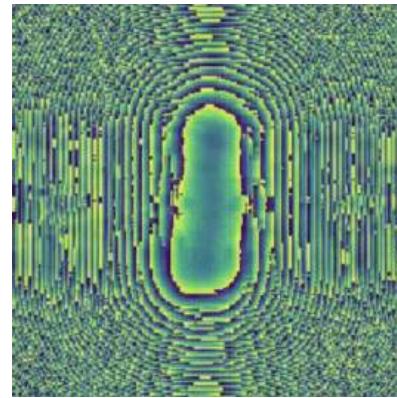
# Демонстрация работы оптической сети



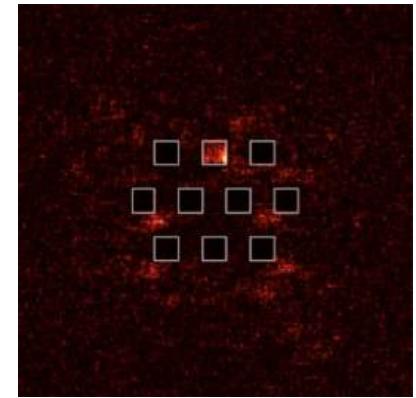
Входные данные  
**(интенсивность)**



Распространение  
волнового  
фрона:  
**интенсивность**



Распространение  
волнового  
фрона:  
**фаза**



Световой сигнал  
**на детекторе**  
**(интенсивность)**

# Матрицы несоответствий

$n = 3$  (acc = 85.2 %)

0	942	0	3	3	0	5	16	1	10	0
1	0	1112	3	1	1	0	5	1	12	0
2	26	26	855	32	13	1	18	28	30	3
3	9	6	16	882	4	8	10	52	13	10
4	4	14	9	1	881	3	12	2	5	51
5	18	2	8	126	19	625	33	19	28	14
6	33	4	6	1	10	14	887	0	3	0
7	7	30	15	10	15	4	4	897	3	43
8	27	32	12	74	23	40	22	30	696	18
9	29	11	7	16	104	1	1	93	6	741
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

$n = 5$  (acc = 86.4 %)

0	943	0	2	2	0	5	21	1	6	0
1	0	1110	5	0	1	0	6	1	12	0
2	22	10	881	29	14	1	20	25	27	3
3	8	4	17	870	5	14	11	55	16	10
4	1	10	9	0	892	1	14	1	9	45
5	17	1	3	90	9	686	31	16	28	11
6	28	3	5	0	9	16	893	0	4	0
7	7	23	19	10	15	6	2	906	3	37
8	27	25	12	57	27	37	18	24	729	18
9	27	9	6	18	78	5	2	57	7	800
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

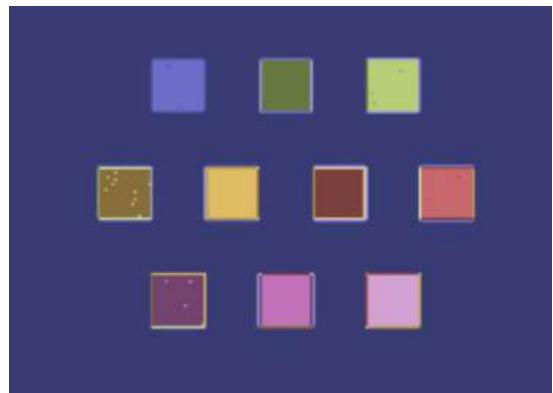
# Перестановки чувствительных зон детектора

Распределения, кривые обучения

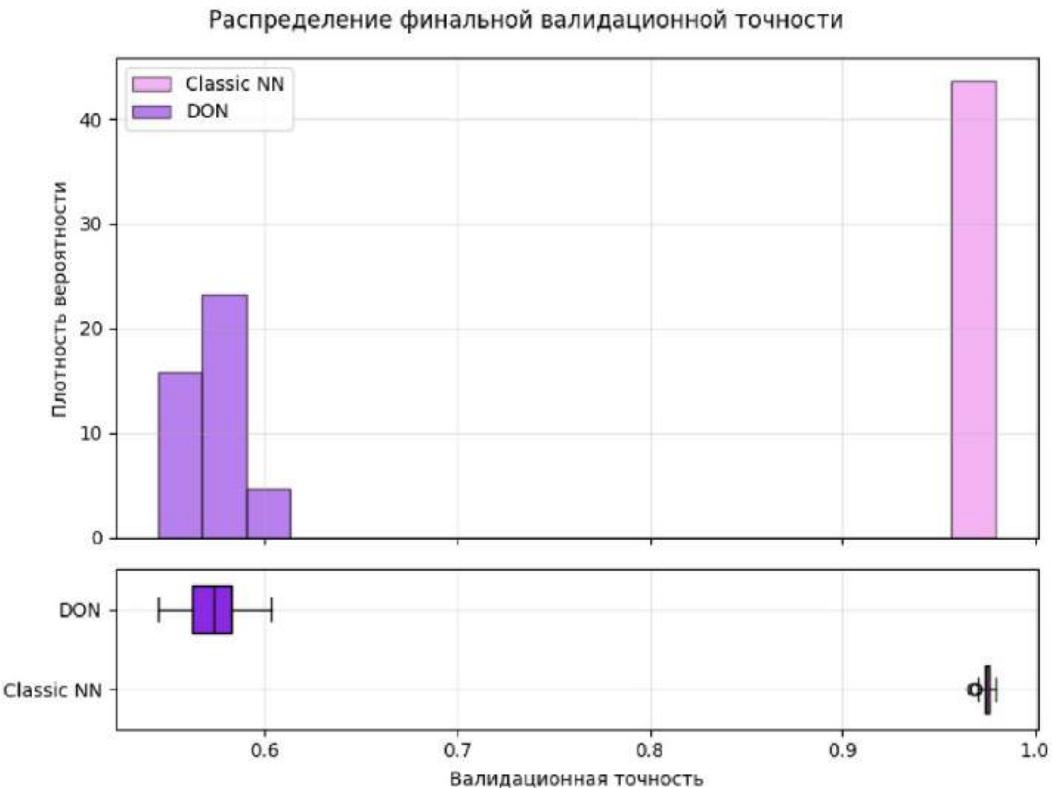
# Архитектура модели



- длина волны: 600 нм
- размер пикселя (нейрона): 318 нм
- расстояние между дифракционными слоями: 24 мкм
- маска детектора: torch.Tensor
- количество эпох обучения: 3
- количество дифракционных слоёв: 1



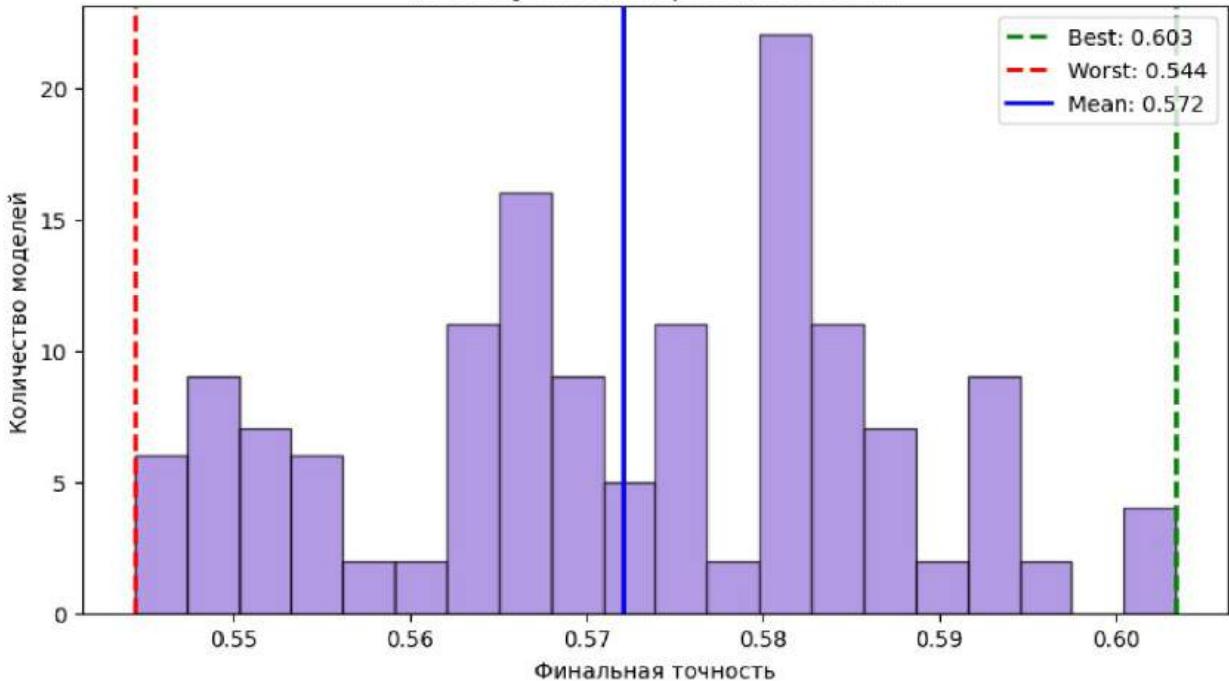
# Перестановки чувствительных зон маски детектора



Лучшее  
расположение:  
[5, 7, 4, 9, 8, 2, 6,  
3, 0, 1]

# Перестановки чувствительных зон маски детектора

Распределение финальной точности моделей  
(150 случайных перестановок зон)

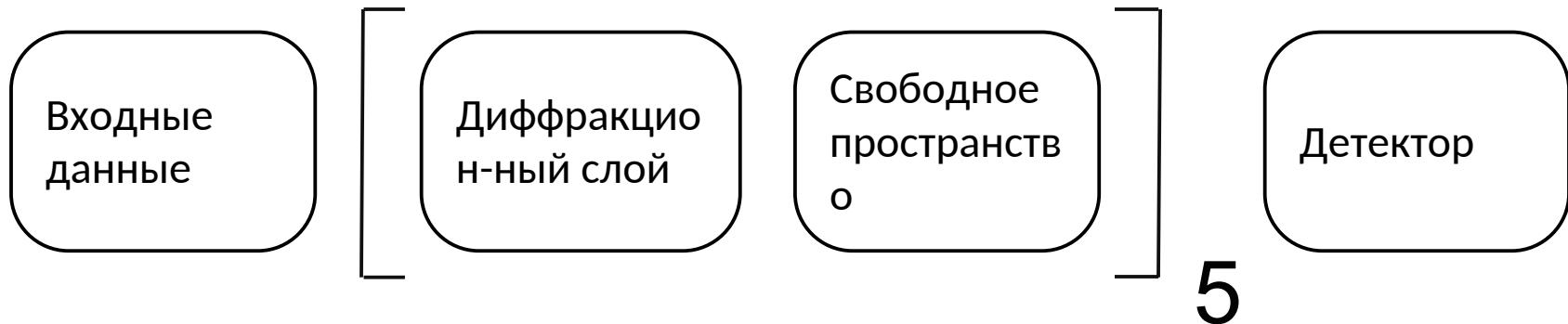


- распределение НЕ нормальное
- лучшие и худшие результаты статистически значимо НЕ отличаются от среднего
- лучший: 0.603
- худший: 0.544
- среднее: 0.572
- ср. кв. откл: 0.0148

# Размер свободного пространства

Распределения, кривые обучения

# Архитектура модели

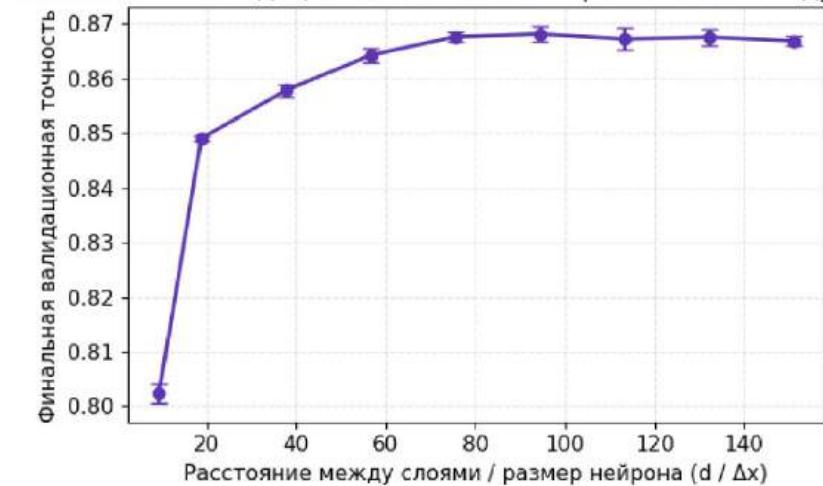


- длина волны: 600 нм
- размер пикселя (нейрона): 318 нм
- маска детектора: torch.Tensor
- количество эпох обучения: 3
- количество дифракционных слоёв: 1

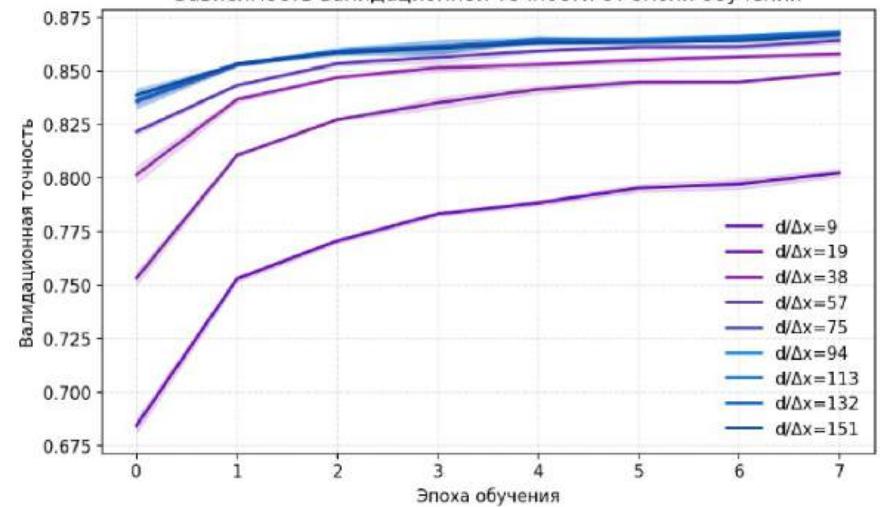


# Размер свободного пространства

Зависимость валидационной точности от расстояния между слоями



Зависимость валидационной точности от эпохи обучения



$d / x = \text{расстояние между слоями} / \text{размер нейрона}$

# Выводы

# Выводы

- Перестановка чувствительных зон детектора не оказывает статистически значимого влияния на точность модели
- Точность моделей при различных перестановках имеет ненормальное распределение и находится в диапазоне 54,0-60,5% для рассмотренных параметров
  - Увеличение расстояния между дифракционными слоями приводит к росту точности модели до достижения плато
  - При уменьшении расстояния между дифракционными слоями возрастает частота обновления весов модели

# Контакты

# Контактная информация



**Полина Никулина**

Letovo Student



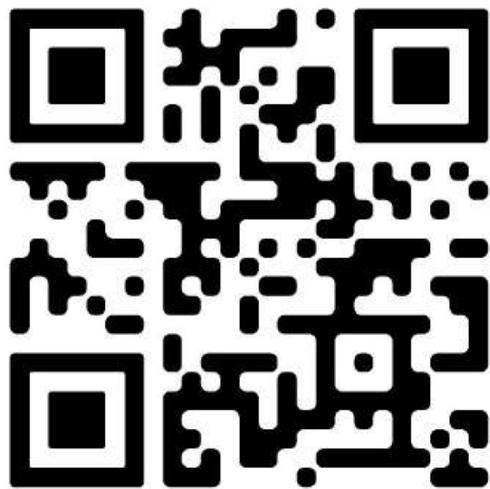
Telegram: @lundii

Do not hesitate to reach out

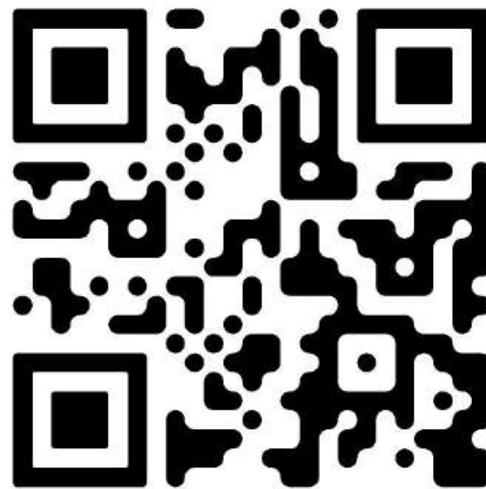
Email: nikkulina.polly@gmail.com

Telegram: @lundii

# Код на GitHub



Весь код



**SVETIANNa**

# Библиография

Источники, полезные ссылки

# Источники

Майкрософт проект натик: <https://natick.research.microsoft.com/>

Визуализация оптического резонатора: <https://www.youtube.com/watch?v=fkmwxRAQqyY>

Примеры интегральной оптики: [https://fiberguide.net/swdm/?utm\\_medium=organic&utm\\_source=yasmartcamera](https://fiberguide.net/swdm/?utm_medium=organic&utm_source=yasmartcamera)

1. Chang, Julie, et al. "Hybrid optical-electronic convolutional neural networks with optimized diffractive optics for image classification."

Учебник Богданова физеко 11 класс: [https://kaf-fiz-1586.narod.ru/11bf/uchebnik\\_11/24.htm](https://kaf-fiz-1586.narod.ru/11bf/uchebnik_11/24.htm)

Электромагнитные колебания: [https://youtube.com/shorts/kjpsRT\\_BLMk?si=idiaorcATNUcIEZP](https://youtube.com/shorts/kjpsRT_BLMk?si=idiaorcATNUcIEZP)

1. Автор: Philip Ronan — <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=72548216>
2. Fu, T., Zhang, J., Sun, R., Huang, Y., Xu, W., Yang, S., ... Chen, H. (2024). Optical neural networks: progress and challenges.
3. [https://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_neural\\_network](https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_neural_network)
4. Lin, X., Rivenson, Y., Yardimci, N. T., Veli, M., Luo, Y., Jarrahi, M., & Ozcan, A. (2018). All-optical machine learning using diffractive deep neural networks. *Science*, eaat8084. doi:10.1126/science.aat8084
5. Mengü, D., Luo, Y., Rivenson, Y., & Ozcan, A. (2019). Analysis of Diffractive Optical Neural Networks and Their Integration with Electronic Neural Networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1–1. doi:10.1109/JSTQE.2019.2921376
6. Кингсеп А.С., Локшин Г.Р., Ольхов О.А. Основы физики. Курс общей физики. Том 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика. – М.: Физматлит, 2001.

# Интересные ссылки по теме для заинтересовавшихся

Преобразования Фурье:

<https://www.youtube.com/watch?v=spUNpyF58BY&t=202s>

Временное пространство в оптических нейросетях:

<https://arxiv.org/pdf/2208.10802>

Гибридные оптико-электронные нейронные сети: [Hybrid Optical-Electronic Convolutional Neural Networks](#). Stanford Computational Imaging Lab.

Оптическая реализация свёрточных нейронных сетей: [Optical 4F-Correlator for Acceleration of Convolutional Neural Networks](#). UCLA.

# Приложение

# Глубокое обучение

