

Распознавание двух-модовых вихревых пучков с использованием нейронных сетей

Л.Г. Ахметов

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

Самара, Россия

ahmetov14@yandex.ru

Аннотация — В работе исследуется эффективность применения нейронных сетей для распознавания суперпозиции двух вихревых пучков по картине интенсивности. Для формирования набора данных, приближенных к экспериментальным картинкам, кроме стандартных типов аугментации (сдвиг и поворот) использовано также астигматическое искажение.

Ключевые слова — вихревые оптические пучки, суперпозиция мод, топологический заряд, нейронная сеть.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вихревые пучки – это особый класс световых пучков, которые несут орбитальные угловые моменты. Этот класс объединяет наличие спирального фазового фронта.

Актуальность вихревых пучков для исследователей в области оптики не оставляет сомнений [1-3]. Одним из наиболее частых применений вихревых пучков является передача информации с помощью оптических устройств [4, 5].

Особенность вихревых пучков в том, что пучки с различными целыми значениями топологического заряда, связанного с орбитальным угловым моментом, (ОУМ) являются ортогональными друг другу [6,7]. Т.е. при передаче нескольких пучков одновременно в одном информационном канале они не будут мешать друг другу при декодировании данных из оптического пучка.

Существует несколько подходов к разрешению задачи декодирования информации, а именно орбитального углового момента, из оптического пучка: оптические интерференционные и дифракционные [7, 8], а также предполагающие цифровую обработку [9-11]. К последним относятся методы, основанные на машинном обучении, т.к. вышеприведенную задачу можно свести к задаче классификации изображений [12, 13] распределения интенсивности суперпозиции различных оптических вихрей.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Рассмотрим схему оптического устройства передачи информации. На стороне передатчика передаваемая информация кодируется наличием или отсутствием (битами – 1 или 0) определенных вихревых мод (из заданного набора) в суперпозиции. Пучок проходит в свободном пространстве некоторое расстояние и поступает в приемное устройство. В последнем оптический пучок декодируется обратно в информацию.

Определим комплексную функцию f , которая является вихревым пучком. Возьмем гауссово распределение интенсивности и вихревую составляющую в фазе:

$$f(r, \varphi) = \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right) \cdot r^{|m|} \cdot \exp(i \cdot m \cdot \varphi), \quad (1)$$

В формуле (1) используются следующие переменные: r и φ – координаты пикселя в полярной системе координат, m – топологический заряд, в данной работе мы принимаем $m \in \mathbb{Z}$, σ – радиус перетяжки ($\sigma = 1$).

Мультиплексированные вихревые пучки [14] – пучки, комплексное поле которых состоит из суммы нескольких различных одиночных вихревых пучков:

$$f(r, \varphi) = \sum_{i=1}^n C_i \cdot f_i(r, \varphi), \text{ где } f_i(r, \varphi) \in \mathbb{C}. \quad (2)$$

Как правило, интенсивность суперпозиции вихревых пучков представляют более сложные фигуры, нежели «кольца» одиночных вихревых пучков.

Одним из самых распространенных устройств приема световых пучков является ПЗС-камера, в котором изображение пучка фокусируется на матрице. При этом, как правило, пучок проходит через линзу с целью фокусировки.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данной работе поставлена задача классификации разности топологических зарядов двух-модовых мультиплексированных вихревых пучков по изображению интенсивности комплексного поля после преобразования Фурье.

Были сгенерированы изображения интенсивности мультиплексированных пучков у которых два m_1 и m_2 разных знаков. Для увеличения разнообразия набора данных и большего приближения к реальности для каждой пары m_1 и m_2 были сформированы три изображения (рис. 1). В первом из них сложение по формуле (2) было выполнено с весами $C_1 = 0,4$ и $C_2 = 0,6$, во втором – $C_1 = 0,5$ и $C_2 = 0,5$, в третьем – $C_1 = 0,6$ и $C_2 = 0,4$.

Были выбраны целочисленные $m_1 \in [0,5], m_2 \in [-5, -1]$. В качестве метки изображения мы взяли значение $|m_1 - m_2|$. Разрешение картинки приняли равным 81x81 пикселей.

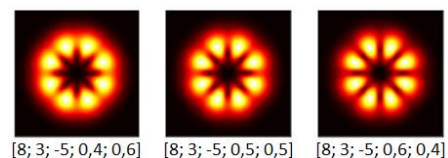


Рис 1. Интенсивности мультиплексированного вихревого пучка с двумя модами после преобразования Фурье с различными C_1 и C_2 и фиксированными $m_1 = 3$ и $m_2 = -5$. В подписи к каждому изображению указано пять чисел: $[|m_1 - m_2|; m_1; m_2; C_1; C_2]$

Полученные 90 изображений, которые принадлежали 10 разным классам, были аугментированы поворотом и сдвигом. Примеры изображений приведены на рис. 2. Такое искажением

может произойти при смещении приемника и передатчика относительно друг друга.

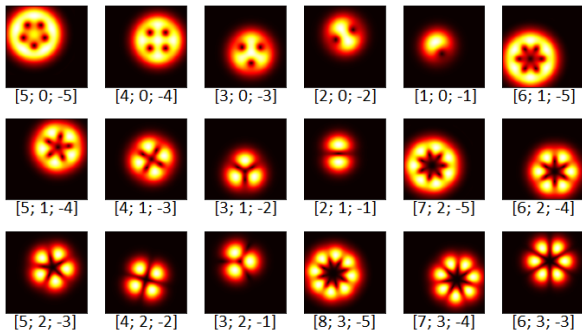


Рис 2. Интенсивности мультиплексированного вихревого пучка с двумя модами после FFT, аугментации сдвигом и поворотом. В подписи к каждому изображению указано три числа: $[[m_1 - m_2]; m_1; m_2]$. На изображениях $c_1 = 0,4$, а $c_2 = 0,6$

Получился набор данных размером 27000 картинок, с 10 классами, в каждом котором от 900 до 4500 картинок.

На вышеописанных данных была обучена простая нейронная сеть на TensorFlow с двумя полносвязными слоями с 128 и 10 выходами соответственно. На рис. 3 приведена схема.

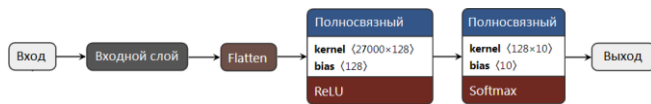


Рис 3. Архитектура нейронной сети

После 25 эпох обучения на тренировочной выборке была достигнута точность 0,756, на тестовой выборке точность – 0,733. Графики обучения видно на рис. 4.

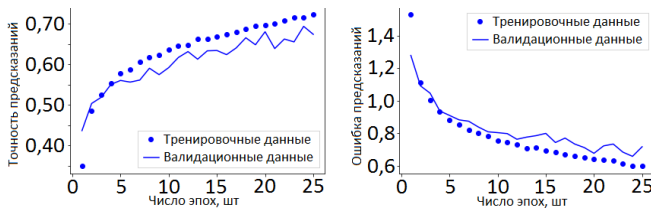


Рис 4. Графики точности (слева) и ошибки (справа) в процессе обучения модели на каждой эпохе

Была исследована зависимость точности предсказания нейронной сетью в зависимости от ширины канала (при неизменных остальных условиях):

Таблица I. ЗНАЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРЕДСКАЗАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ШИРИНЫ КАНАЛА

Диапазоны значений мод пучка	$m_1 \in [0; 4], m_2 \in [-4; -1].$	$m_1 \in [0; 5], m_2 \in [-5; -1].$	$m_1 \in [0; 6], m_2 \in [-6; -1].$
Число предсказываемых классов	8	10	12
Точность на тестовых данных	0,824	0,733	0,644

По таблице I можно наблюдать заметное ухудшение качества распознавания при увеличении числа возможных значений топологических зарядов, т.е. фактически, длины бинарного слова.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана возможность распознавания двухмодовых пучков по их изображениям с использованием нейронной сети. При этом точность классификации была равна 0,73. Исследована зависимость точности предсказания от ширины канала. Такой подход к распознаванию мод может быть использован при передаче мультиплексированных данных на расстоянии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Shen, Y. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen, X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong, X. Yuan // *Light Sci. Appl.* – 2019. – Vol. 8. – Art. no. 90. DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2.
- [2] Porfirev, A.P. Phase singularities and optical vortices in photonics, / A.P. Porfirev, A.A. Kuchmizhak, S.O. Gurbatov, S. Juodkazis, S.N. Khonina, Yu.N. Kul'chin // *Phys. Usp.* – 2022. – Vol. 65(8). – P. 789-811. DOI: 10.3367/UFNe.2021.07.039028.
- [3] Chen, J. Engineering photonic angular momentum with structured light / J. Chen, C. Wan, Q. Zhan // *Adv. Photon.* – 2021. Vol. 3. – P. 064001.
- [4] Willner, A. E. Optical communications using orbital angular momentum beams / A. E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, Z. Zhao, J. Wang, M. P. J. Lavery, M. Tur, S. Ramachandran, A. F. Molisch, N. Ashrafi, S. Ashrafi // *Advances in optics and photonics.* – 2015. – Vol. 7(1). – P. 66-106.
- [5] Khonina, S.N. Spatial-light-modulator-based multichannel data transmission by vortex beams of various orders / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, M.A. Butt // *Sensors.* – 2021. – Vol. 21(9). – P 2988. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21092988>
- [6] Padgett, M.J. Orbital angular momentum 25 years on / M.J. Padgett // *Opt. Express.* – 2017. – Vol. 25. – P. 11265–11274.
- [7] Fatkhiev, D.M. Recent advances in generation and detection of orbital angular momentum optical beams—a review / D.M. Fatkhiev, M.A. Butt, E.P. Grakhova, R. V. Kutluyarov, I. V. Stepanov, N. L. Kazanskiy, S. N. Khonina, V. S. Lyubopytov, A. K. Sultanov // *Sensors.* – 2021. – Vol. 21. – P.4988.
- [8] Yihua, B. Vortex beam: generation and detection of orbital angular momentum / B. Yihu, L. Haoran, F. Xin, Y. Yuanjie // *Chinese Optics Letters.* – 2022. – Vol. 20(1). – P. 012601.
- [9] Huang, Z. Identification of hybrid orbital angular momentum modes with deepfeedforward neural network / Z. Huang, P. Wang, J. Liu, et al. // *Results in Physics.* – 2019. – Vol. 15. – P. 102790. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102790.
- [10] Liu, J. Deep learning based atmospheric turbulence compensation for orbital angular momentum beam distortion and communication. / J. Liu, P. Wang, X. Zhang, et al. // *Opt Express.* – 2019. – Vol. 27. – P. 16671. DOI: 10.1364/oe.27.
- [11] Dedo, M. I. OAM mode recognition based on joint scheme of combining the Gerchberg–Saxton (GS) algorithm and convolutional neural network (CNN) / M. I. Dedo, Z. Wang, K. Guo, Z. Guo // *Optics Communications.* – 2020. – Vol. 456. – P.124696. DOI: 10.1016/j.optcom.2019.124696
- [12] Невзоров, А.А. Метод коррекции искажений волнового фронта в системе атмосферной оптической связи с малым объемом передаваемой по служебному каналу информации / А.А. Невзоров, Д.А. Станкевич // *Компьютерная оптика.* – 2020. – Т. 44, № 5. – С. 848-851. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-733.
- [13] Simonyan, K. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. / K. Simonyan, A. Zisserman // *ArXiv Prepr ArXiv14091556.* – 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1409.1556.
- [14] Kazanskiy, N.L. Diffractive optical elements for multiplexing structured laser beams / N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, S.V. Karpeev, A.P. Porfirev // *Quantum Electronics.* – 2020. – Vol. 50(7).– P. 629-635. DOI: 10.1070/QEL17276