

Распознавание вихревых пучков с использованием свёрточных нейронных сетей

А.П. Бодунов

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

Самара, Россия

dimedron2024@gmail.com

Аннотация—В данной работе рассмотрены свойства вихревых оптических пучков, позволяющие повысить эффективность их распознавания на основе применения нейронных сетей. Моделирование формирования вихревых оптических пучков и их астигматического преобразования проводилось с помощью преобразования Фурье.

Ключевые слова— преобразование Фурье, вихревые оптические пучки, свёрточные нейронные сети.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько десятков лет лазерные оптические пучки с орбитальным угловым моментом стали широко распространены в атмосферных системах связи, позволяющих достичь высокую плотность кодирования. Проблемой становится лишь то, что из-за существования такого аспекта как атмосферная турбулентность такой способ кодирования подходит только для малых расстояний между передатчиком и реципиентом. Из-за возникающих возмущений происходит зашумление передаваемой информации, из-за чего реципиент не может с необходимой точностью воспринять поступивший сигнал. Поэтому для обеспечения возможности передачи информации посредством оптического излучения необходимо создать систему, устойчивую к возникающим зашумлениям, способную принять и определить поступивший сигнал. [1]

Хорошей базой для составления таких систем являются свёрточные нейронные сети, получившие широкое распространение в сфере компьютерного зрения. Удобство такого подхода обуславливается тем, что он получается быстрее итеративных способов и, в дополнение, для получения ответа на поставленную задачу нет необходимости в мощном опорном источнике благодаря тому, что присутствует возможность использовать для этих нужд изображения, формируемое на приёмнике сигнальным лучом. [2]

Основная цель данной работы разработать программный комплекс для генерации изображений вихревых оптических пучков с целью их последующего применения для обучения свёрточной нейронной сети для распознавания порядков вихревых оптических пучков, поступающих на вход сформированной свёрточной нейронной сети, производящей визуальный анализ изображения.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В этой работе рассматриваются вихревые оптические пучки [3-5], формируемые на основе одной из формул вида:

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

$$f(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right) (x + iy)^m, \quad (2)$$

где m – число, обозначающее порядок вихревого оптического пучка, σ – радиус.

Для получения изображения вихревого лазерного пучка можно использовать преобразование Фурье с последующим получением значения амплитуды в каждой точке.

Пример полученных изображений представлен на рис. 1.

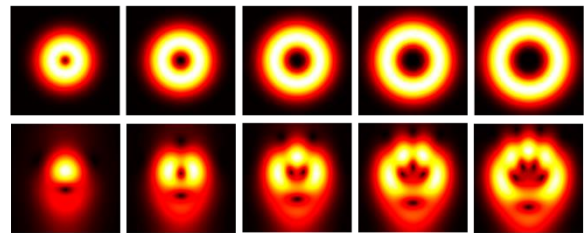


Рис. 1. Построение изображений вихревых оптических пучков с различными порядками (верхний ряд – целые порядки, нижний – полуцелые)

Как можно заметить из приведённого примера, оптические пучки с целыми порядками являются кольцами, отличающегося только радиусами, что усложняет создание свёрточной нейронной сети для их определения, потому что выходной результат её работы не должен зависеть от масштабирования объекта на изображении. Поэтому для обеспечения корректного функционирования нейронной сети было принято решение использовать астигматическое преобразование [6-8]. Такое преобразование можно реализовать за счет наклона линзы или при использовании цилиндрической линзы [9-11], описываемой домножением на $\exp(ixy)$, после чего формула в полярных координатах принимает следующий вид:

$$f(r, \varphi) = \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right) r^m \exp(im\varphi) \exp(ixy). \quad (3)$$

Примеры изображений, получаемых с входным полем, формируемым формулой вида (3) представлены на рис. 2.

На рис. 1 и рис. 2 представлены пучки одинаковых порядков, из чего можно сделать вывод, что после астигматического преобразования есть возможность создать набор обучающих данных со всеми

необходимыми способами искажения изображений: зашумления, размытия и масштабирования.

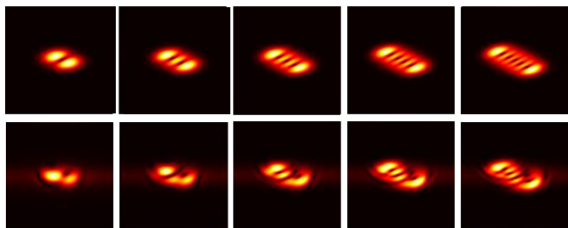


Рис. 2. Построение изображений астигматических вихревых оптических пучков с различными порядками (верхний ряд – целые порядки, нижний ряд – полуцелые)

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

При подготовке обучающего набора требуется соблюсти некоторые аспекты, такие как предоставление нейронной сети масштабированного набора данных, дабы обеспечить независимость нейронной сети от размеров исследуемого объекта на входном изображении, предоставление сети для обучения данных, на которых изучаемый объект будет смещён относительно начальной точки. Для того чтобы нейронная сеть справлялась с зашумлёнными изображениями, следует добавить их искусственно.

Для моделирования обучающего набора данных для свёрточной нейронной сети использовалась формула (3) с последующим применением различных форматов зашумления, такие как гауссовский шум, шум перца и зернистая интерференция (рис. 3).

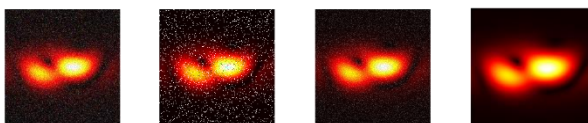


Рис. 3. Результаты работы программы генерации обучающего набора определения порядка астигматических вихревых оптических пучков

Нейронная сеть обучается на определение одиннадцати классов, каждый из которых отражает порядок вихревого оптического пучка. Рассматриваются целые и полуцелые порядки пучков от -5 порядка до 5 с шагом 0,5. Так как пучки противоположных по знаку порядков на вид отличаются только наклоном (рис. 4), то принято решение объединить их в единый распознаваемый класс.

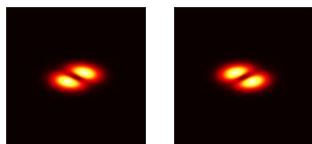


Рис. 4. Изображения астигматических вихревых оптических пучков противоположных по знаку порядков (левое изображение – пучок -3 порядка, правое изображение – пучок 3 порядка)

На вход сети подаются цветные изображения 370 на 370 пикселей. Обучение проходит в течение пяти эпох с обучающим набором в 990 изображений для каждого класса. Архитектура нейронной сети составлена с использованием открытой библиотеки Tensorflow на языке Python и выглядит следующим образом: 2

свёрточных слоя, слой подвыборки 2×2 , 2 свёрточных слоя, слой подвыборки 2×2 , выравнивающий слой, и два полносвязных слоя. С такими параметрами, входными данными и текущей архитектурой свёрточной нейронной сети ход обучения представляется графиком, отражённым на рис. 5.

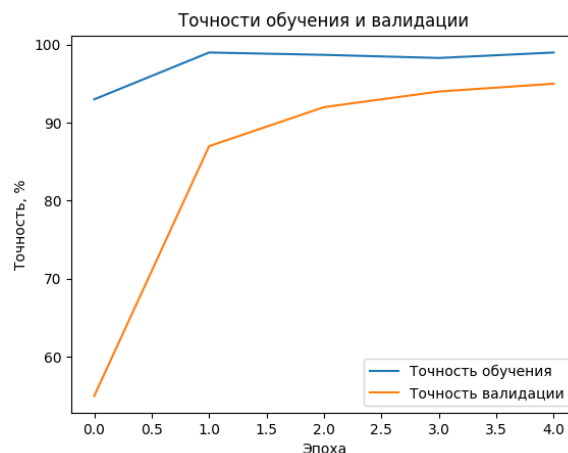


Рис. 5. Динамика точности определения порядка встигматического вихревого пучка в ходе обучения

Как можно видеть из приведённого графика, после обучения свёрточной нейронной сети мы получаем достаточно высокую точность распознавания признаков изображения, которые влияют на итоговое распознавание порядка вихревого оптического пучка на изображении, поступающем на вход. Так как на обучение поступали различные изображения, где распознаваемый объект смещался относительно своего изначального расположения, полученного после генерации, и был зашумлён, то можно утверждать, что получившаяся нейронная сеть устойчива к смещениям и возможным зашумлениям, которые имеют место при передаче информации в атмосфере.

В ходе проведения тестов на сгенерированных случайно изображениях в количестве 22000 штук было выявлено, что практическая точность определения порядка вихревого оптического пучка составляет 79,45%.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассматриваются свойства вихревых оптических пучков, осуществляется моделирование их формирования, демонстрируется механизм формирования обучающего набора данных для обучения свёрточной нейронной сети. Представлены характеристики, формирующиеся у свёрточной нейронной сети в ходе обучения и динамика их изменений, происходящих с каждой эпохой.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Невзоров, А.А. Метод коррекции искажений волнового фронта в системе атмосферной оптической связи с малым объемом передаваемой информации 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.
- [2] Сикорский, О.С. Обзор свёрточных нейронных сетей для задачи классификации изображений / О.С. Сикорский // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2017. – № 20. – С. 37-42.

- [3] Gbur, G. Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation / G. Gbur, R.K. Tyson // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2008. – Vol. 25(1). – P. 225-230.
- [4] Padgett, M.J. Orbital angular momentum 25 years on / M.J. Padgett. – *Opt. Express.* – 2017. – Vol. 25(10). – P. 11265-11274.
- [5] Порфирьев, А.П. Фазовые сингулярности и оптические вихри в фотонике / А.П. Порфирьев, А.А. Кучмижак, С.О. Гурбатов, С. Йодказис, С.Н. Хонина, Ю.Н. Кульчин // *Успехи физических наук.* – 2021 (принята к публикации). DOI: 10.3367/UFNr.2021.07.039028.
- [6] Khonina, S.N. Astigmatic Bessel laser beams / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, K. Jefimovs, P. Paakkonen, J. Turunen // *J. Mod. Opt.* – 2004. – Vol. 51. – P. 677-686.
- [7] Bekshaev, A.Y. Transformation of higher-order optical vortices upon focusing by a astigmatic lens / A.Y. Bekshaev, M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov // *Opt. Commun.* – 2004. – Vol. 241(4-6). – P. 237-247.
- [8] Котляр, В.В. Определение топологического заряда оптического вихря с помощью астигматического преобразования / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв, А.П. Порфирьев // *Компьютерная оптика.* – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 781-792. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-781-792.
- [9] Almazov, A.A. How the tilt of a phase diffraction optical element affects the properties of shaped laser beams matched with a basis of angular harmonics / A.A. Almazov, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar // *Journal of Optical Technology.* – 2006. – Vol. 73(9). – P. 633-639.
- [10] Vaity, P. Measuring the topological charge of an optical vortex by using a tilted convex lens / P. Vaity, J. Banerji, R.P. Singh // *Phys. Lett. A.* – 2013. – Vol. 377(15). – P. 1154-1156.
- [11] Peng, Y. Measuring topological charges of optical vortices with multisingularity using a cylindrical lens / Y. Peng, X. Gan, P. Ju, Y. Wang, J. Zhao // *Chin. Phys. Lett.* – 2015. – Vol. 32(2). – P. 024201.