

Распознавание поляризационной структуры синтезированных векторных пучков в турбулентной атмосфере по изображениям интенсивности с помощью нейронных сетей

Е.А. Богач, Е.В. Адамов, В.В. Дудоров, В.В. Колосов

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, Томск, Россия, пл. Академика Зуева, 1, bogach@iao.ru*

В последние годы активно исследуются различные способы увеличения информационной емкости каналов передачи информации с помощью лазерных пучков. В атмосферно-оптических каналах связи важной задачей является определение характеристик пучков, которые могут нести дополнительную информацию, при их искажении в турбулентной атмосфере. Системы когерентного сложения лазерных пучков являются перспективными для задач передачи информации, закодированной в поляризационной структуре лазерного пучка, поскольку они позволяют изменять ее с высокой частотой. Кроме разработки методов кодирования информации параметрами структурированного пучка необходимо также разрабатывать методы их приема/декодирования. Определение поляризационной структуры искаженного турбулентной атмосферой пучка является нетривиальной задачей. Целью данного исследования является оценка возможности определения поляризационной структуры синтезированных лазерных пучков по искаженным атмосферной турбулентностью картинам распределений интенсивности с помощью нейронных сетей. Исследование выполнено на основе численного моделирования. Впервые показано, что применение нейронных сетей позволяет различать линейно поляризованный синтезированный пучок от пучка с неоднородным распределением поляризации, сформированным субпучками с азимутально или радиально распределенными поляризациями в турбулентной атмосфере.

Ключевые слова: поляризация, поляризационная структура, когерентное сложение, турбулентная атмосфера, нейронная сеть.

Введение

Увеличение информационной ёмкости атмосферно оптических каналов передачи информации с помощью классических подходов фазовой и амплитудной модуляции подходит к своему пределу. Активно исследуются различные подходы для преодоления этого предела [1, 2], одним из которых является использование различных направлений поляризации в качестве дополнительной степени свободы [3], в том числе в системах когерентного сложения лазерных пучков [4, 5]. Однако, определение распределений поляризаций в приемной плоскости в турбулентной атмосфере требует специальных оптических элементов и применения особых подходов [6].

В последние годы нейронные сети зарекомендовали себя в качестве инструмента, позволяющего снизить влияние турбулентности в атмосферно-оптических каналах связи, использующих орбитальный угловой момент (ОУМ) лазерных пучков [7–9]. Суть данного подхода заключается в определении величины ОУМ, заданной в начальной плоскости, путём анализа разрушенной турбулентностью картины распределения интенсивности в приёмной плоскости. Таким образом, данный подход позволяет практически исключить влияние турбулентной атмосферы, а также декодировать информацию без использования дополнительных оптических элементов и сложных методик.

В данной работе мы исследовали принципиальную возможность применения нейронных сетей для отличия случая однонаправленных поляризаций субпучков от случаев азимутально и радиально распределенных поляризаций субпучков по мгновенным изображениям интенсивности в приёмной плоскости, которые в случае однородной среды являются тождественными и имеют кольцеобразный вид.

Описание численного эксперимента

Изображения интенсивности рассчитывались на основе численного моделирования распространения лазерных пучков в турбулентной атмосфере. Описание численного эксперимента подробно описано в [4, 5, 11], а схема представлена на рис. 1.

Тождественные (в однородной среде) распределения интенсивности в приёмной плоскости формируются при задании различных сдвигов фаз в начальной плоскости для разных распределений поляризации субпучков. Так, для задания кольцевого распределения интенсивности в случае однонаправленных поляризаций субпучков задается $\pi/3$ относительный сдвиг фаз между субпучками, что соответствует пучку с ОУМ рав-

ным +1 [10]. В случае радиально и азимутально распределенных поляризаций субпучков относительный сдвиг фаз между субпучками отсутствует [4,5,11].

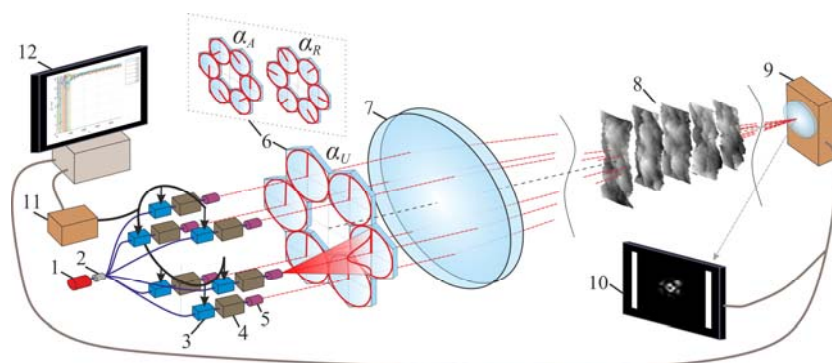


Рис. 1. Схема численного эксперимента: 1 — узкополосный лазер; 2 — 1Ч6 волоконный разветвитель; 3 — фазовый модулятор; 4 — усилитель мощности; 5, 6 — волоконные коллиматоры; 7 — длиннофокусная линза; 8 — турбулентные фазовые экраны; 9 — измеритель пространственных характеристик пучка; 10 — распределение интенсивности в приемной плоскости; 11 — оптимизирующий SPGD-процессор, 12 — компьютер.

На рис. 2 приведены примеры задаваемых в начальной плоскости фазовых смещений и направлений поляризации субпучков и результирующие распределения интенсивности, регистрируемые в приемной плоскости в однородной и турбулентной среде. Несмотря на турбулентные искажения мгновенных изображений интенсивности (рис. 2, б), усредненные изображения распределений интенсивности являются тождественными (рис. 2, г), как и в случае однородной среды (рис. 2, в).

Для проведения исследования было рассчитано по 1000 изображений распределений интенсивности в приемной плоскости (рис. 2, в) для каждого из значений $Cn^2 = i \cdot 10 - 15$, где $i \in \{1/10; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 20; 30; 40; 50\}$ для каждого распределения поляризаций. Таким образом, всего было сформировано по 15000 изображений для каждой заданной поляризационной структуры. Из полученных изображений было создано два набора данных:

- набор с радиально распределенными и одинаково направленными поляризациями субпучков (набор радиальных и однонаправленных поляризаций);
- набор с азимутально распределенными и одинаково направленными поляризациями субпучков (набор азимутальных и однонаправленных поляризаций).

Каждый из этих наборов данных был разделен на тренировочную (60% изображений набора данных), валидационную и тестовую выборки (по 20% изображений набора данных). Тренировочные и валидационные выборки использовались в процессе обучения нейронных сетей, а тестовые выборки — для анализа результатов работы обученных нейронных сетей.

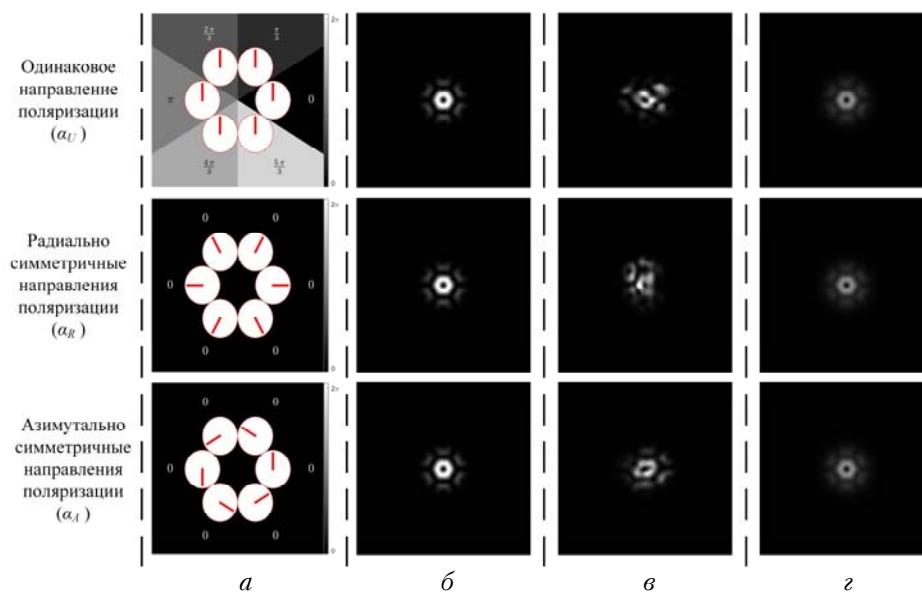


Рис. 2. Изображения распределений интенсивности в приемной плоскости: а — направления поляризаций (показаны красными линиями) и сдвиги фаз между субпучками (показаны градацией серого цвета), задаваемые в начальной плоскости; б, в — мгновенные изображения распределений интенсивности, формирующиеся в приемной плоскости для данного случая в однородной и турбулентной среде с $Cn^2 = 5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$ соответственно; г — усреднение по 9000 мгновенных изображений в турбулентной среде

Результаты применения нейронных сетей

В качестве архитектуры нейронной сети была выбрана версия свёрточной нейронной сети InceptionV3 [12]. Кривые обучения приведены на рис. 3.

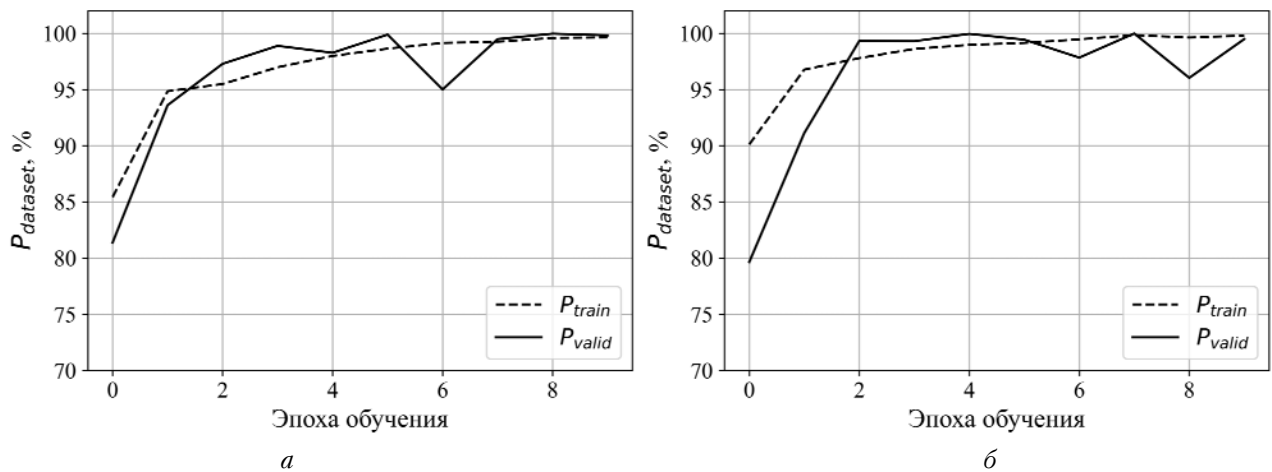


Рис. 3. Кривые обучения нейронных сетей: *a* — для распознавания радиально распределённых и одинаковых направлений поляризации; *б* — для распознавания азимутально распределённых и одинаковых направлений поляризации

Таким образом были обучены две нейронных сети: нейронная сеть, различающая случай одинаковых направлений поляризации субпучков от радиально распределённых направлений, и нейронная сеть, различающая случай одинаковых направлений поляризации от азимутально распределённых направлений. Сходимость кривых для тренировочных и валидационных выборок на последних эпохах позволяет сделать вывод об отсутствии переобучения моделей.

Обученные нейронные сети далее были применены для распознавания поляризационной структуры по изображениям интенсивности тестовых выборок. На рис. 4 приведены матрицы ошибок (confusion matrix) для двух обученных нейронных сетей. Ошибка распознавания заданной в начальной плоскости поляризационной структуры на тестовой выборке составила менее 1,1% (рис. 4). Таким образом впервые показано, что нейронные сети позволяют отличить линейно поляризованный синтезированный пучок от пучка с неоднородным распределением поляризации.

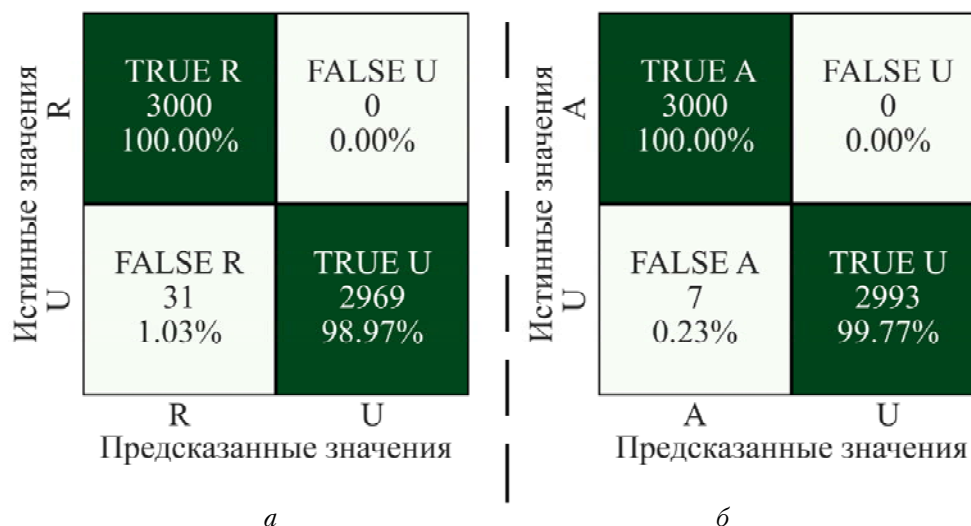


Рис. 4. Матрицы ошибок (confusion matrix) на тестовых выборках: *a* — нейронная сеть для распознавания радиально распределённых (R) и одинаковых направлений поляризации (U); *б* — нейронная сеть для распознавания азимутально распределённых (A) и одинаковых направлений поляризации (U)

Нам не удалось успешно обучить нейронную сеть для различия случаев азимутально и радиально распределённых поляризаций по изображениям интенсивности в приёмной плоскости: ошибка распознавания на валидационной выборке сохранялась на уровне 50%. Мы считаем, что данный эффект связан с тем, что фазовые смещения в начальной плоскости для этих случаев являются тождественными.

Заключение

В результате исследования установлено, что применение нейронных сетей позволяет распознавать заданные распределения поляризации синтезированных лазерных пучков в турбулентной атмосфере по мгновенным изображениям интенсивности в приёмной плоскости. Ранее нами показано, что применение нейронных сетей позволяет различать знак ОУМ вихревых пучков [9]. Проведённая серия исследований указывает на то, что применение нейронных сетей позволяет отличать пучки с разными фазами в начальной плоскости по разрушенным турбулентностью изображениям интенсивности в приёмной плоскости. Данный эффект также объясняет неприменимость нейронной сети для различия случаев радиально и азимутально распределённых поляризаций субпучков, не имеющих отличий в сдвигах фаз между субпучками в начальной плоскости.

Список литературы

1. Wang J. Advances in communications using optical vortices // *Photonics Res.* 2016. V. 4, Iss. 5. P. B14–B28. DOI: <https://doi.org/10.1364/prj.4.000b14>.
2. Willner A.E., Huang H., Yan Y., Ren Y., Ahmed N., Xie G., Bao C., Li L., Cao Y., Zhao Z., Wang J., Lavery M.P.J., Tur M., Ramachandran S., Molisch A.F., Ashrafi N., Ashrafi S. Optical communications using orbital angular momentum beams. *Adv. Opt. Photonics.* 2015. V. 7, Iss. 1. P. 66–106. DOI: <https://doi.org/10.1364/aop.7.000066>.
3. Huang H., Xie G., Yan Y., Ahmed N., Ren Y., Yue Y., Rogawski D., Willner M.J., Erkmen B.I., Birnbaum K.M., Dolinar S.J., Lavery M.P.J., Padgett M.J., Tur M., Willner A.E. 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength // *Opt. Lett.* 2014. V. 39, Iss. 2. P. 197–200. DOI: <https://doi.org/10.1364/ol.39.000197>.
4. Adamov E.V., Aksenov V.P., Dudorov V.V., Kolosov V.V., Levitskii M.E. Controlling the spatial structure of vector beams synthesized by a fiber laser array // *Opt. Laser Technol.* 2022. V. 154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108351>.
5. Adamov E.V., Bogach E.A., Dudorov V.V., Kolosov V.V., Levitskii M.E. Controlling the polarization structure of vector beams synthesized by a fiber laser array // *Opt. Commun.* 2024. V. 559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.130399>.
6. Machavariani G., Lumer Y., Moshe I., Meir A., Jackel S., Davidson N. Birefringence-induced bifocusing for selection of radially or azimuthally polarized laser modes // *Appl. Optics.* 2007. V. 46, Iss. 16. P. 3304–3310. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.46.003304>.
7. Wang B., Zhang X., Shah S.A.A., Merabet B., Kovalev A.A., Stafeev S.S., Kozlova E.S., Kotlyar V.V., Guo Z. Top three intelligent algorithms for OAM mode recognitions in optical communications // *Eng. Res. Express.* 2024. V. 6, N 3. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad61bc>.
8. Wang Z., Dedo M.I., Guo K., Zhou K., Shen F., Sun Y., Liu S., Guo Z. Efficient Recognition of the Propagated Orbital Angular Momentum Modes in Turbulences with the Convolutional Neural Network // *IEEE Photonics J.* 2019. V. 11, Iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2916207>.
9. Богач Е.А., Адамов Е.В., Дудоров В.В., Колосов В.В. Распознавание противоположных по знаку орбитальных угловых моментов вихревых пучков в турбулентной атмосфере с помощью нейронных сетей // *Оптика атмосф. и океана*, 2025. Т. 38, № 4. С. 247–254. DOI: 10.15372/AOO20250401.
10. Aksenov V.P., Dudorov V.V., Kolosov V.V. Characterization of vortex beams synthesized on the basis of a fiber laser array // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9680. P. 96802D-1–96802D-7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2206152>.
11. Adamov E.V., Bogach E.A., Dudorov V.V., Kolosov V.V., Levitskii M.E. Adaptive control of the polarization structure of synthesized beams in a turbulent atmosphere // *Proc. SPIE.* 2023. V. 12780. P. 127801H-1–127801H-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2691156>.
12. Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S., Shlens J., Wojna Zb. Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016. P. 2818–2826. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2016.308>.

E.A. Bogach, E.V. Adamov, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov. Recognition of the polarization structure of synthesized vector beams in a turbulent atmosphere from intensity images by neural networks.

In recent years, various approaches to using laser beams to increase the capacity of information transmission channels have been actively studied. In atmospheric optical communication channels, it is important to determine the characteristics of beams that can carry additional information when beams are distorted in the turbulent atmosphere. Coherent laser beam combining systems are promising for transmitting information encoded in the polarization structure of a laser beam, as they allow it to be changed at high frequencies. In addition to developing methods for encoding information with structured beam parameters, it is also necessary to develop methods for their receiving and decoding. Determining the polarization structure of a beam distorted by a turbulent atmosphere is a non-trivial task. The aim of this study is to investigate the possibility of using neural networks to determine the polarization structure of synthesized laser beams through intensity distribution images distorted by atmospheric turbulence. The study is based on numerical simulation. For the first time, it has been shown that the use of neural networks makes it possible to distinguish a linearly polarized synthesized beam from a beam with an inhomogeneous polarization distribution formed by sub-beams with azimuthally or radially distributed polarizations in a turbulent atmosphere.