

КОРОТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Метод коррекции искажений волнового фронта в системе атмосферной оптической связи с малым объемом передаваемой по служебному каналу информации

А.А. Невзоров¹, Д.А. Станкевич¹

¹Волгоградский государственный университет
400062, Россия, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 100

Аннотация

В работе описывается метод коррекции искажений волнового фронта лазерного излучения в турбулентной атмосфере, позволяющий сократить объем передаваемых по служебному каналу данных. Коррекция осуществляется транспарантом, фазовая маска которого вычисляется с помощью простой трехслойной нейронной сети по распределению интенсивности, полученному на фотоприемнике. Архитектура сети построена таким образом, чтобы уменьшить размерность данных, передаваемых по служебному каналу, до 30 параметров, по которым затем строится корректирующая маска.

Ключевые слова: атмосферная оптическая связь, нейронная сеть, турбулентность.

Цитирование: 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.

Citation: Nevzorov AA, Stankevich DA. A method of wavefront distortions correction for an atmospheric optical link with a small volume of information transmitted through a service channel. Computer Optics 2020; 44(5): 848-851. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-733.

Введение

В настоящее время оптические пучки с орбитальным угловым моментом получили широкое распространение в атмосферных системах связи [1], поскольку с их помощью достигается высокая плотность кодирования [2, 3]. К сожалению, из-за наличия атмосферной турбулентности [4, 5] такой способ кодирования применим лишь для небольших расстояний между приемником и передатчиком. Тем не менее, большое число статей посвящено разработке различных адаптивных систем коррекции искажений в условиях сильной турбулентности. Например, в работе [6] авторы с помощью достаточно сложной оптической схемы с обратной связью достигли ошибки передачи бита не более 10^{-3} при отношении сигнал / шум 15,5 дБ.

Основная задача адаптивной корректирующей системы заключается в вычислении маски фазового транспаранта по результатам измерения распределения интенсивности излучения от опорного источника [7]. Маску обычно вычисляют различными итеративными методами, а также в последнее время получили развитие методы коррекции, основанные на машинном обучении [8, 9]. Так, например, в работах [10, 11] фазовая маска строится глубокой нейронной сетью. Такой подход удобен тем, что он быстрее итеративных способов и для решения задачи не обязателен мощный опорный источник, так как может использоваться изображение, формируемое на приемнике сиг-

нальным лучом. Однако в этом случае требуется передавать это изображение от приемника к передатчику по служебному каналу.

Чтобы уменьшить объем передаваемых по служебному каналу данных, можно использовать архитектуру сети, схожей с автоэнкодером. Особенностью этой архитектуры является наличие узкого «бутылочного горлышка» – скрытого слоя с небольшим количеством узлов. В таком случае задача сети заключается в том, чтобы описать изображение малым числом параметров, а затем по ним построить корректирующую маску. В итоге после обучения сеть можно разделить на две части: первая находится на стороне приемника, и информация с ее выхода отправляется на передающую сторону, где вторая часть сети, используя эти данные, управляет компенсирующим транспарантом.

Метод

Рассмотрим предлагаемый метод на модели атмосферного оптического канала связи (см. рис. 1). Гауссов пучок $G(x, y, w_0)$ с радиусом $w_0 = 20$ мм проходит через пространственный фазовый модулятор размером $M \times M$ ячеек ($M = 64$). Параметры пучка выбраны таким образом, чтобы он занимал как можно большую площадь модулятора. Координаты x, y заданы на равномерной прямоугольной сетке с пространственным шагом дискретизации $\Delta = 1$ мм. Фазовая маска $\theta(x, y)$ модулятора является суперпозицией двух мод с противоположными значениями углового орбитального мо-

мента $l: \theta(x, y) = \arg[\exp(-il\psi) + \exp(il\psi)]$, где ψ – азимутальный угол. Такая фазовая маска формирует изображение, состоящее из чередующихся темных и светлых пятен, число которых пропорционально l .

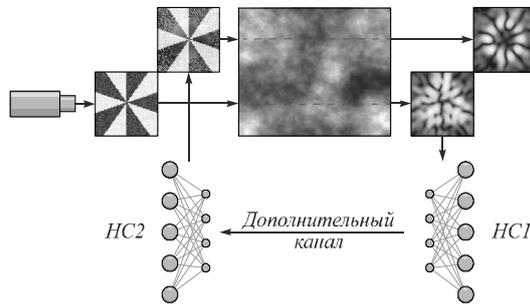


Рис. 1. Схема работы метода коррекции искажений в турбулентной атмосфере. Нейронная сеть НС1 преобразует информацию об искажениях распределения интенсивности на фотоприемнике в малый набор параметров. Эти параметры передаются по служебному каналу к источнику излучения, где НС2 по ним строит корректирующий транспарант

Атмосферная турбулентность имитируется стохастическим фазовым экраном в соответствии со спектральной моделью Хилла–Эндрюса [12]:

$$\Phi_n(k_x, k_y) = 0,033 C_n^2 \left(1 + 1,802 \sqrt{\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_l^2}} - 0,254 \left(\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_l^2} \right)^{7/12} \right) \times \exp\left(-\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_l^2} \right) \left(k_x^2 + k_y^2 + \frac{1}{L_0^2} \right)^{11/6}, \quad (1)$$

где $k_x, k_y = -\pi/\Delta, \dots, \pi/\Delta$, $k_l = 3,3/l_0$; $l_0 = 1$ мм и $L_0 = 50$ м – внутренний и внешний масштаб турбулентности соответственно, $C_n^2 = 10^{-12} \text{ м}^{-2/3}$ – индекс атмосферной рефракции. Фазовый спектр $\Phi(k_x, k_y)$ связан со спектральной плотностью флуктуаций индекса рефракции $\Phi_n(k_x, k_y)$ выражением [7, 9]:

$$\Phi(k_x, k_y) = 2\pi k_0^2 z_0 \Phi_n(k_x, k_y),$$

где $z_0 = 300$ м – расстояние между излучателем и приемником, $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число, $\lambda = 1550$ нм – длина волны лазерного излучения. Различные реализации фазовых экранов строятся с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (БПФ) \hat{F}^{-1} :

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{M\Delta} \Re \left[\hat{F}^{-1} \left\{ C \sqrt{\Phi(k_x, k_y)} \right\} \right], \quad (2)$$

здесь C – набор (размером $M \times M$) независимых случайных комплексных величин, распределенных нормально с нулевым средним и единичной дисперсией, знак \Re указывает на то, что используется только действительная часть от получившегося распределения в квадратных скобках.

Распределение интенсивности излучения на приемнике рассчитывается в параксиальном приближении:

$$I(x, y) = \left| \hat{F}^{-1} \left\{ U(k_x, k_y) \times \hat{F} \left\{ G(x, y, w_0) e^{i\phi(x, y)} e^{i\theta(x, y)} \right\} \right\} \right|^2. \quad (3)$$

Здесь введено обозначение:

$$U(k_x, k_y) = \exp\left(-iz_0 \frac{k_x^2 + k_y^2}{2k_0^2} \right).$$

При вычислении прямого преобразования Фурье исходное двумерное распределение (во вложенных фигурных скобках) размером $M \times M$ точек дополняется нулями до $N \times N = 1024 \times 1024$. В результате приемная матрица фотодетектор (размером $K \times K = 128 \times 128$ точек) фиксирует центральную часть изображения (3) с добавлением нормального шума с нулевым средним и дисперсией $\sigma = 10^{-2}$.

При моделировании используется трехслойная полносвязная нейронная сеть. Входными данными для сети является распределение интенсивности $I(x, y)$, искаженное турбулентной атмосферой. Первый слой содержит 1000 нейронов с функцией активации leaky ReLU. Второй слой с той же функцией активации является «бутылочным горлышком», и его размер P определяет количество параметров, используемых при построении компенсирующего транспаранта третьим слоем сети. Значения с выходов последнего слоя ($M \times M = 4096$ нейронов с функцией активации гиперболический тангенс), умноженные на π , представляются в виде квадратной матрицы, которая является корректирующей фазовой маской $\tilde{\phi}(x, y)$.

Тогда после коррекции распределение интенсивности на приемнике принимает вид:

$$\tilde{I}(x, y) = \left| \hat{F}^{-1} \left\{ U(k_x, k_y) \hat{F} \left\{ e^{i\tilde{\phi}(x, y)} G(x, y, w_0) e^{i\phi(x, y)} e^{i\theta(x, y)} \right\} \right\} \right|^2. \quad (4)$$

Отсюда видно, что в случае $\tilde{\phi}(x, y) = -\phi(x, y)$ получим неискаженное изображение на приемнике:

$$I_0(x, y) = I(x, y) |_{\phi(x, y)=0}.$$

В процессе обучения минимизируется среднеквадратичное отклонение (СКО) между неискаженным изображением и тем, которое получается в результате коррекции:

$$E = \frac{1}{K^2} \sum_{x', y'} |I_0(x, y) - \tilde{I}(x, y)|^2.$$

Существенным для некоторых приложений является необходимость сохранения топологического заряда пучка [13, 14]. Однако несложно показать, что так как распределение интенсивности однозначно зависит от l , то минимизация E приводит к восстанов-

лению исходного заряда [15]. Поскольку СКО E имеет аналитическую зависимость от выходных значений сети, обучение осуществляется методом обратного распространения ошибки. Для эффективного расчета градиентов ошибки от настраиваемых параметров сети граф вычислений строится с помощью библиотеки Tensorflow 1.14. Минимизация E осуществляется за 300 итераций адаптивного алгоритма Adam. На каж-

дой итерации ошибка вычисляется на обучающем множестве, которое содержит 2000 пар изображений $I_0(x, y)$ и $I(x, y)$ с различными значениями орбитального момента $l = 1, \dots, 10$.

На рис. 2 и 3 изображены распределения интенсивности без искажений (а, б) и после коррекции (в) для двух значений топологического заряда $l = 5$ (рис. 2) и $l = 3$ (рис. 3) при $P = 30$.

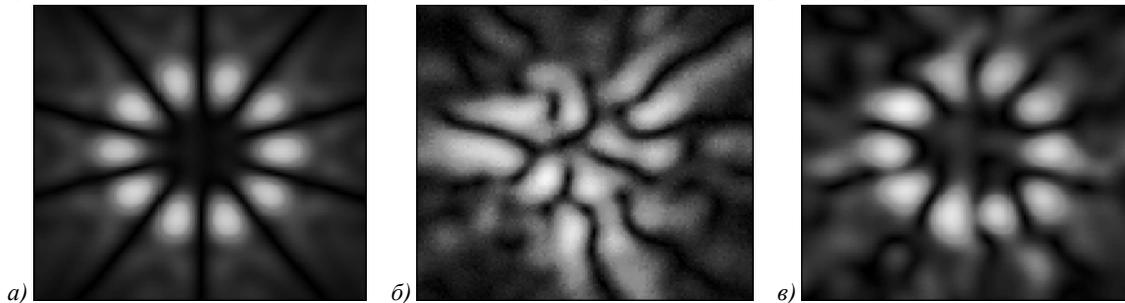


Рис. 2. Распределения интенсивности на фотоприемнике без искажений (а), до (б) и после коррекции (в) для топологического заряда $l = 5$ при $P = 30$

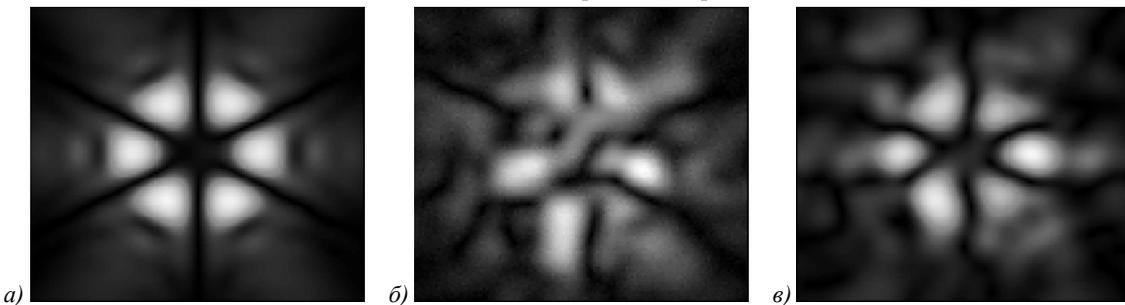


Рис. 3. Распределения интенсивности без искажений (а), до (б) и после коррекции (в) для топологического заряда $l = 3$ при $P = 30$

В этом случае после коррекции СКО в среднем уменьшается приблизительно в 1,8 раза вне зависимости от значения топологического заряда l . На рис. 4 приведена зависимость $\langle E \rangle$ усредненного СКО E по 50 различным реализациям от числа параметров P . Из графика видно, что оптимальное число параметров $P = 30$ и дальнейшее их увеличение не приводит к улучшению коррекции. Рис. 2, 3 и 4 построены для реализаций турбулентности не используемых при обучении нейронных сетей.

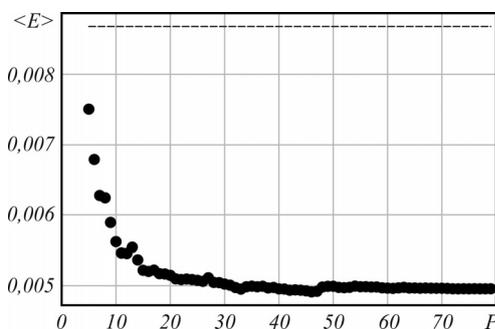


Рис. 4. Зависимость усредненного СКО $\langle E \rangle$ от числа параметров P (показана точками). Пунктирной линией показано усреднённое СКО без компенсации

Необходимую пропускную способность служебного канала передачи данных можно оценить исходя из времени корреляции:

$$\tau = \frac{1}{v_0} (0,55 C_n^2 k_0^2 z_0)^{\frac{3}{5}}$$

между реализациями турбулентности [16]. При поперечной скорости ветра $v_0 = 7$ м/с получаем $\tau \approx 1$ мс, тогда если на каждый параметр необходимо 32 бита, то необходимая общая емкость служебного канала равна $32P/\tau = 0,96$ Мбит/с. В работе [10] авторам удалось добиться уменьшения СКО после коррекции в 3 раза, но при этом требуется передавать целиком изображения размером 128×128 точек, тогда, если на точку требуется 8 бит, то необходимая емкость канала при тех же условиях составляет 131 Мбит/с.

Заключение

После предварительного обучения сети на модельных распределениях ее веса можно подкорректировать с использованием данных, полученных экспериментально. Для этого можно воспользоваться процедурой, описанной в работе [17]. В этом случае также используется метод обратного распространения ошибки, но градиент ошибки вычисляется не аналитически, а с помощью имитатора среды. Использование нейронной сети позволяет не только эффективно решать обратную задачу по вычислению компенсирующего транспаранта, но и описать этот транспа-

рант малым количеством параметров. На наш взгляд, представляется возможным улучшить эту схему применением более глубоких нейронных сетей, с помощью которых достигнута высокая точность распознавания изображений.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00080).

Литература

1. **Wang, J.** Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang, J. Yang, I.M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, A.E. Willner // *Nature Photonics*. – 2012. – Vol. 6. – P. 355-359. – DOI: 10.1038/NPHOTON.2012.138.
2. **Gibson, G.** Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum / G. Gibson, J. Courtial, M.J. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas'ko, S.M. Barnett, S. Franke-Arnold // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12. – P. 5448-5456. – DOI: 10.1364/OPEX.12.005448.
3. **Celechovsky, R.** Optical implementation of the vortex information channel / R. Celechovsky, Z. Bouchal // *New Journal of Physics*. – 2007. – Vol. 9, Issue 9. – 328. – DOI: 10.1088/1367-2630/9/9/328.
4. **Mehul, M.** Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding / M. Mehul, M. O'Sullivan, B. Rodenburg, M. Mirhosseini, J. Leach, M.P.J. Lavery, M.J. Padgett, R.W. Boyd // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, Issue 12. – P. 13195-13200. – DOI: 10.1364/OE.20.013195.
5. **Soifer, V.A.** Vortex beams in turbulent media: review / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shchepakina // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
6. **Ren, Y.** Adaptive-optics-based simultaneous pre- and post-turbulence compensation of multiple orbital-angular-momentum beams in a bidirectional free-space optical link / Y. Ren, G. Xie, H. Huang, N. Ahmed, Y. Yan, L. Li, C. Bao, M. Lavery, M. Tur, M. Neifeld, R.W. Boyd, J.H. Shapiro, A.E. Willner // *Optica*. – 2014. – Vol. 1, Issue 6. – P. 376-382. – DOI: 10.1364/OPTICA.1.000376.
7. **Лукин, В.П.** Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики / В.П. Лукин // *Успехи физических наук*. – 2014. – Т. 184, № 6. – С. 599-640. – DOI: 10.3367/UFNr.0184.201406b.0599.
8. **Huanga, Z.** Identification of hybrid orbital angular momentum modes with deep feedforward neural network / Z. Huanga, P. Wang, J. Liub, W. Xionga, Y. Hea // *Results in Physics*. – 2019. – Vol. 15. – 102790. – DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102790.
9. **Wang, Z.** Efficient recognition of the propagated orbital angular momentum modes in turbulences with the convolutional neural network / Z. Wang, M.I. Dedo, K. Guo, K. Zhou, F. Shen, Y. Sun, S. Liu, Z. Guo // *IEEE Photonics Journal*. – 2019. – Vol. 11, Issue 3. – 2916207. – DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2916207.
10. **Lohani, S.** Turbulence correction with artificial neural networks / S. Lohani, R.T. Glasser // *Optics Letters*. – 2018. – Vol. 43. – P. 2611-2614. – DOI: 10.1364/OL.43.00261.
11. **Liu, J.** Deep learning based atmospheric turbulence compensation for orbital angular momentum beam distortion and communication / J. Liu, P. Wang, X. Zhang, Y. He, X. Zhou, H. Ye, Y. Li, S. Xu, S. Chen, D. Fan // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, Issue 12. – P. 16671-16688. – DOI: 10.1364/OE.27.016671.
12. **Andrews, L.C.** Analytic expressions for the wave structure function based on a bump spectral model for refractive index fluctuations / L.C. Andrews, S. Vester, C.E. Richardson // *Journal of Modern Optics*. – 1993. – Vol. 40, Issue 5. – P. 931-938. – DOI: 10.1080/09500349314550931.
13. **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.
14. **Khonina, S.N.** Comparative study of impact of random environment on individual and combined Laguerre-Gauss modes / S.N. Khonina, A.A. Artyukova, M.S. Kirilenko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1038. – 012070. – DOI: 10.1088/1742-6596/1038/1/012070.
15. **Hou, T.** Deep-learning-assisted, two-stage phase control method for high-power mode-programmable orbital angular momentum beam generation / T. Hou, Y. An, Q. Chang, P. Ma, J. Li, L. Huang, D. Zhi, J. Wu, R. Su, Y. Ma, P. Zhou // *Photonics Research*. – 2020. – Vol. 8, Issue 5. – P. 715-722. – DOI: 10.1364/PRJ.388551.
16. **Lachinova, S.L.** Giant irradiance spikes in laser beam propagation in volume turbulence: analysis and impact / S.L. Lachinova, M.A. Vorontsov // *Journal of Optics*. – 2016. – Vol. 18, Issue 2. – 025608. – DOI: 10.1088/2040-8978/18/2/025608.
17. **Невзоров, А.А.** Нейросетевой имитатор нестационарной среды в адаптивной системе передачи данных / А.А. Невзоров, А.А. Орлов, Д.А. Станкевич // *Письма в журнал технической физики*. – 2019. – Т. 45, № 14. – С. 7-9.

Сведения об авторах

Невзоров Алексей Алексеевич, 1990 года рождения, в 2012 году окончил Волгоградский государственный университет с присуждением степени магистра радиофизики, работает младшим научным сотрудником на кафедре радиофизики Волгоградского государственного университета. Область научных интересов: машинное обучение, цифровая обработка сигналов и изображений, программирование. E-mail: terapevt@mail.ru.

Станкевич Дмитрий Александрович, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Волгоградский государственный университет с присуждением степени магистра радиофизики, работает доцентом по кафедре радиофизики Волгоградского государственного университета. Область научных интересов: предельные измерения, цифровая обработка сигналов и изображений. E-mail: stankevich@volsu.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 14 апреля 2020 г. Окончательный вариант – 5 июня 2020 г.

A method of wavefront distortions correction for an atmospheric optical link with a small volume of information transmitted through a service channel

A.A. Nevzorov¹, D.A. Stankevich¹

¹Volgograd State University

400062, Volgograd, Russia, prospekt Universitetskiy, 100

Abstract

The paper describes a method of wavefront distortion correction in a turbulent atmosphere, which allows reducing the volume of information transmitted through a service channel. The correction is carried out with a transparency whose phase mask is calculated by a simple three-layer neural network by intensity distribution obtained at the photoreceiver. The architecture of the network is constructed so that the amount of data transferred over the service channel is reduced to 30 parameters, using which a corrective mask is then constructed.

Keywords: atmospheric optical communications, neural network, turbulence.

Citation: Nevzorov AA, Stankevich DA. A method of wavefront distortions correction for an atmospheric optical link with a small volume of information transmitted through a service channel. *Computer Optics* 2020; 44(5): 848-851. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-733.

Acknowledgements: This work was financially supported by the Russian Science Foundation, project no. 18-79-00080.

References

- [1] Wang J, Yang J, Fazal IM, Ahmed N, Yan Y, Huang H, Ren Y, Yue Y, Dolinar S, Tur M, Willner AE. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. *Nature Photon* 2012; 6: 355-359. DOI: 10.1038/NPHOTON.2012.138.
 - [2] Gibson G, Courtial J, Padgett MJ, Vasnetsov M, Pas'ko V, Barnett SM, Franke-Arnold S. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum. *Opt Express* 2004; 12: 5448-5456. DOI: 10.1364/OPEX.12.005448.
 - [3] Celechovsky R, Bouchal Z. Optical implementation of the vortex information channel. *New J Phys* 2007; 9(9): 328. DOI: 10.1088/1367-2630/9/9/328.
 - [4] Mehul M, O'Sullivan M, Rodenburg B, Mirhosseini M, Leach J, Lavery MPJ, Padgett MJ, Boyd RW. Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding. *Opt Express* 2012; 20(12): 13195-13200. DOI: 10.1364/OE.20.013195.
 - [5] Soifer VA, Korotkova O, Khonina SN, Shchepakina EA. Vortex beams in turbulent media: review. *Computer Optics* 2016; 40(5): 605-624. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
 - [6] Ren Y, Xie G, Huang H, Ahmed N, Yan Y, Li L, Bao C, Lavery M, Tur M, Neifeld M, Boyd RW, Shapiro JH, Willner AE. Adaptive-optics-based simultaneous pre- and post-turbulence compensation of multiple orbital-angular-momentum beams in a bidirectional free-space optical link. *Optica* 2014; 1(6): 376-382. DOI: 10.1364/OPTICA.1.000376.
 - [7] Lukin VP. Adaptive optics in the formation of optical beams and images. *Physics–Uspekhi* 2014; 57: 556-592. DOI: 10.3367/UFNe.0184.201406b.0599.
 - [8] Huang Z, Wang P, Liub J, Xiong W, Hea Y. Identification of hybrid orbital angular momentum modes with deep feedforward neural network. *Results Phys* 2019; 15: 102790. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102790.
 - [9] Wang Z, Dedo MI, 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 Photon J* 2019; 11(3): 2916207. DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2916207.
 - [10] Lohani S, Glasser RT. Turbulence correction with artificial neural networks. *Opt Lett* 2018; 43: 2611-2614. DOI: 10.1364/OL.43.002611.
 - [11] Liu J, Wang P, Zhang X, He Y, Zhou X, Ye H, Li Y, Xu S, Chen S, Fan D. Deep learning based atmospheric turbulence compensation for orbital angular momentum beam distortion and communication. *Opt Express* 2019; 27(12): 16671-16688. DOI: 10.1364/OE.27.016671.
 - [12] Andrews LC, Vester S, Richardson CE. Analytic expressions for the wave structure function based on a bump spectral model for refractive index fluctuations. *J Mod Opt* 1993; 40(5): 931-938. DOI: 10.1080/09500349314550931.
 - [13] Khonina SN, Karpeev SV, Parani VD. A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre–Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles. *Opt Lasers Eng* 2018; 105: 68-74. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.01.006.
 - [14] Khonina SN, Artyukova AA, Kirilenko MS. Comparative study of impact of random environment on individual and combined Laguerre-Gauss modes. *J Phys: Conf Ser* 2018; 1038: 012070. DOI: 10.1088/1742-6596/1038/1/012070.
 - [15] Hou T, An Y, Chang Q, Ma P, Li J, Huang L, Zhi D, Wu J, Su R, Ma Y, Zhou P. Deep-learning-assisted, two-stage phase control method for high-power mode-programmable orbital angular momentum beam generation. *Photon Res* 2020; 8(5): 715-722. DOI: 10.1364/PRJ.388551.
 - [16] Lachinova SL, Vorontsov MA. Giant irradiance spikes in laser beam propagation in volume turbulence: analysis and impact. *J Opt* 2016; 18(2): 025608. DOI: 10.1088/2040-8978/18/2/025608.
 - [17] Nevzorov AA, Orlov AA, Stankevich DA. A neural network simulator of a nonstationary medium in an adaptive data transmission system. *Tech Phys Lett* 2019; 45(7): 694-696. DOI: 10.1134/S1063785019070241.
-

Authors' information

Alexey Alexeevich Nevzorov, (b. 1990), graduated from Volgograd State University in 2012 with the awarding of Master's degree in Radiophysics, works as a junior researcher at Radiophysics department of Volgograd State University. Research interests: machine learning, digital signal and image processing, programming.

E-mail: terrapevt@mail.ru .

Dmitry Alexandrovich Stankevich, (b. 1987), graduated from Volgograd State University in 2010 with the awarding of master's degree in Radiophysics, works as associate professor at Radiophysics department of Volgograd State University. Research interests: limit measurements, digital signal and image processing.

E-mail: stankevich@volsu.ru .

Received April 14, 2020. The final version – June 5, 2020.
