

# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВИХРЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Лукин И.П., Рычков Д.С.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Российская Федерация

e-mail: lukin\_ip@iao.ru, dsr@iao.ru

В работе представлены результаты теоретического исследования формирования интерференционной картины двумя взаимно когерентными вихревыми оптическими пучками, распространяющимися в турбулентной атмосфере. Исследование проводилось методом численного моделирования распространения оптических пучков в атмосфере при условии слабой атмосферной турбулентности. Был проведён анализ распределения интенсивности в интерференционных картинах, получаемых на различном удалении от источников излучения. Предлагается использовать нейросеть для восстановления по интерференционной картине, сформировавшейся в плоскости приёмника, сигнала, закодированного значением топологического заряда несущих лазерных пучков.

В современном мире в техносфере активно внедряются новые технологии и технические устройства. Причём, в развитии техники большую роль играет процесс миниатюризации как уже существующих типов устройств, так и принципиально новых типов устройств. В связи с этим процессом миниатюризации возрастает роль оптических устройств, что обусловлено малой длиной волны электромагнитного излучения оптического диапазона. Оптические устройства работают с электромагнитным излучением, длина волны которого находится в пределах от 1 мм до 780 нм в инфракрасном, от 780 нм до 380 нм в видимом и от 380 нм до 100 нм в ультрафиолетовом диапазонах [1, 2]. Одним из физических явлений, имеющим в этой разделе науки большую теоретическую и практическую важность, является интерференция оптических волн. Интерференционные явления присущи всем колебательным процессам, существующим в природе, но именно в оптическом диапазоне эти явления проявляются максимально разнообразно [3–6] и имеют большое количество практических приложений [1, 2].

Детальное исследование формирования интерференционной картины на длинных трассах в турбулентной атмосфере проводилось в работах [7, 8]. Наиболее близкий вариант схемы интерферометра рассматривался в статье [7], где анализировалась интерференционная картина, сформированная в турбулентной атмосфере двумя взаимно когерентными пространственно разнесёнными точечными источниками оптического излучения. Для целей данной работы обобщим результаты статей [7, 8] на источники структурированного оптического излучения. В данной работе проводятся исследования формирования интерференционной картины двумя взаимно когерентными вихревыми Лагерр-Гауссовыми пучками [9, 10] на протяжённых трассах в турбулентной атмосфере колмогоровского типа.

Пусть источники когерентного излучения, расположенные соответственно в точках  $\{x=0, y_1\}$  и  $\{x=0, y_2\}$  ( $\mathbf{r} = \{y, z\}$ ), излучают одинаковые пучки с длиной волны  $\lambda$ , начальным радиусом  $a_0$  параллельно друг другу и оси  $Ox$  в направлении положительных значений  $x$ , а приёмник оптического излучения находится в точке с координатами  $\{x=L, y\}$ . Для определённости положим, что  $y_1 = \mathbf{d}$ , а  $y_2 = -\mathbf{d}$  (в этом случае ось  $Ox$  системы координат пройдёт через середину интерференционной картины). Здесь  $2d = 2|\mathbf{d}|$  – расстояние между источниками оптического излучения. Предположение о полной идентичности источников несколько упрощает рассмотрение задачи, но не вносит в неё принципиальных ограничений.

Выберем распределение Лагерр-Гауссовых мод для источников с нулевым радиальным индексом и изменяющимся азимутальным индексом  $m$  из-за удобства использования его свойств в аналитических выкладках – сохранения формы записи для любой точки трассы в однородной среде и простоты интегрирования (по сравнению с другими распределениями),

$$U_0(x, \mathbf{r}) = Ab^{\mu+1}(x) (\mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_0)^\mu \exp\left\{-\frac{\rho^2}{2} b(x)\right\}, \quad (1)$$

где  $\mu = |m|$ ;  $b(x) = \frac{b(0)}{1 + ib(0)x/k}$  – дифракционный параметр пучка;  $b(0) = a_0^{-2} + \frac{ik}{F}$ ;  $F$  – фокусное расстояние. Вектор  $\mathbf{e}_0 = \mathbf{e}_y + i \operatorname{sign}(m)\mathbf{e}_z$  используется для задания  $\varphi(\mathbf{r}) = \operatorname{Arg}(y + iz)$ , геликоидального фазового фронта волны:  $\mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_0 = \rho \exp[i\varphi(\mathbf{r})]$ .

Реализации случайного поля и среднюю интенсивность мультиплексированного пучка, составленного из двух одинаковых пучков (1), на трассе в турбулентной атмосфере, будем находить методом численного моделирования на основе решения параболического уравнения [9, 10]. Размер  $N$  и шаг  $d\rho$  расчётной сетки [9, 10] подбираются, в зависимости от значений параметров составного пучка –  $m$ ,  $\lambda$ ,  $a_0$ ,  $F$ ,  $d$ , – и дистанции до приёмной плоскости  $x=L$ , таким образом, чтобы конечные размеры  $a(x)$  области нормированного распределения поля  $U(x, \mathbf{r}) / \max|U(x, \mathbf{r})|$  по уровню  $e^{-1}$  не превосходили  $N d\rho / 2$ .

Мгновенное значение интенсивности  $I(x, \mathbf{r})$  в точке расположения приёмника  $\{x=L, y\}$

$$I(x, \mathbf{r}) = U_1(x, \mathbf{r})U_1^*(x, \mathbf{r}) + U_2(x, \mathbf{r})U_2^*(x, \mathbf{r}) + 2 \operatorname{Re}[U_1(x, \mathbf{r})U_2^*(x, \mathbf{r})], \quad (2)$$

где  $U_j(x, \mathbf{r})$  – поле оптической волны одного источника,  $j = 1, 2$ , при распространении в турбулентной атмосфере даёт интерференционную картину, соответствующую заданному топологическому заряду  $m$ , и может служить опорным изображением для алгоритма распознавания образов, включённого в систему оптического канала связи, например, для

нейронной сети [11]. Обучение сети для определения топологического заряда, заданного в плоскости источника, можно выполнить, сформировав наборы случайных интерференционных картин для разных дистанций  $x = L$  и значений топологического заряда  $m$ .

На рис. 1 представлены результаты моделирования распространения в однородной среде двух одинаковых взаимно когерентных Лагерр-Гауссовых пучков с топологическими зарядами  $m = 0, 1, 2, 3, 6, 10, -1, -5, -10$ . Другие значения параметров задачи имеют следующие значения:  $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$ ,  $a_0 = 1 \text{ мм}$ ,  $d = 2,5 \text{ мм}$ ,  $L = 1 \text{ м}$ . При численном моделировании размер массива  $N = 512$ , а разрешение  $d\rho = 1 \text{ мкм}$ .

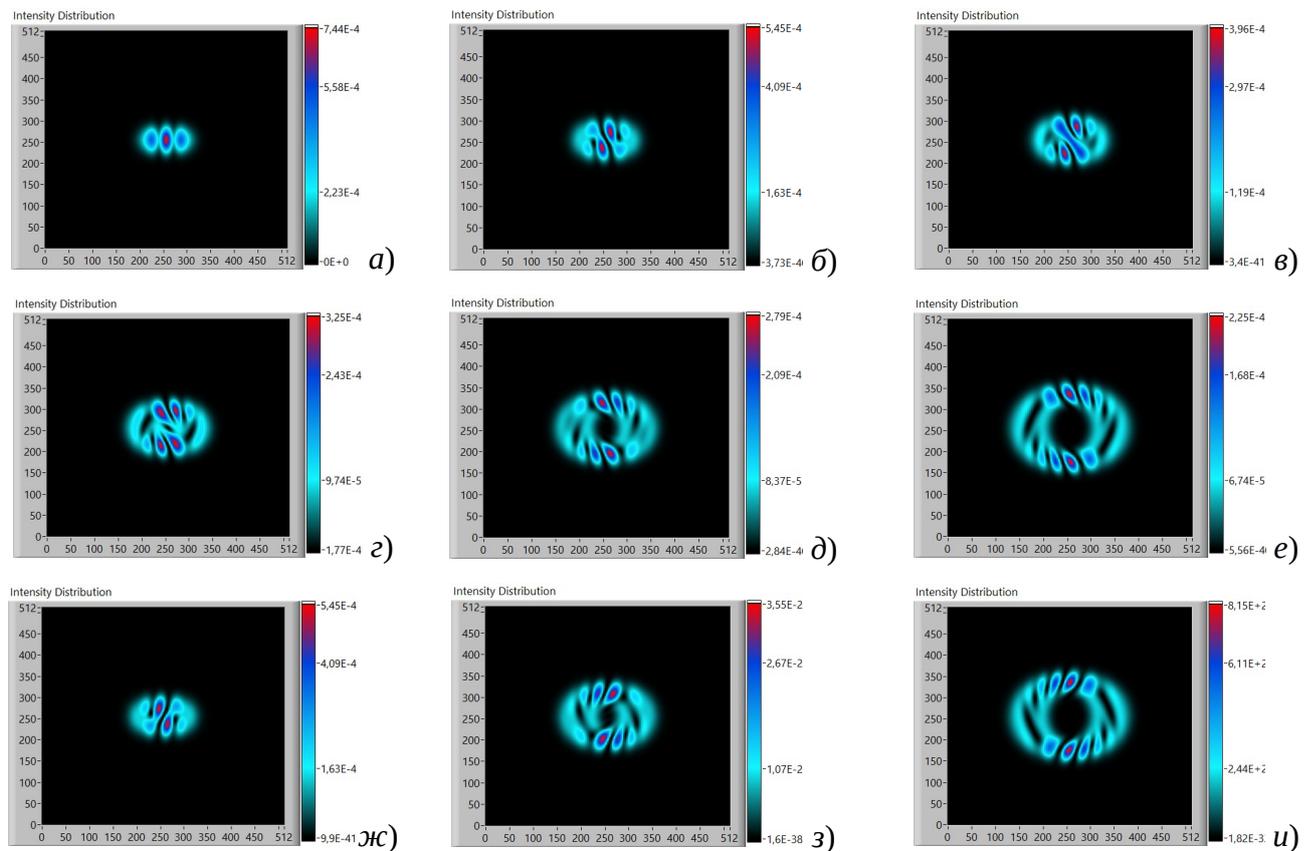


Рисунок 1 — Распределение интенсивности в интерференционной картине, создаваемой двумя коллимированными Лагерр-Гауссовыми пучками, в однородной среде:  $m = 0$  (а),  $m = 1$  (б),  $m = 2$  (в),  $m = 3$  (г),  $m = 6$  (д),  $m = 10$  (е),  $m = -1$  (ж),  $m = -5$  (з) и  $m = -10$  (и)

На рис. 2 показаны примеры случайных распределений (2) в условиях слабой атмосферной турбулентности  $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$  на трассе  $L = 1 \text{ м}$  при тех же параметрах сетки и пучка, что на рис. 1. Из таких распределений составляются последовательности изображений для обучения нейронной сети, которая будет определять соответствие

интерференционной картины, полученной в приёмном устройстве той, для которой известен топологический заряд.

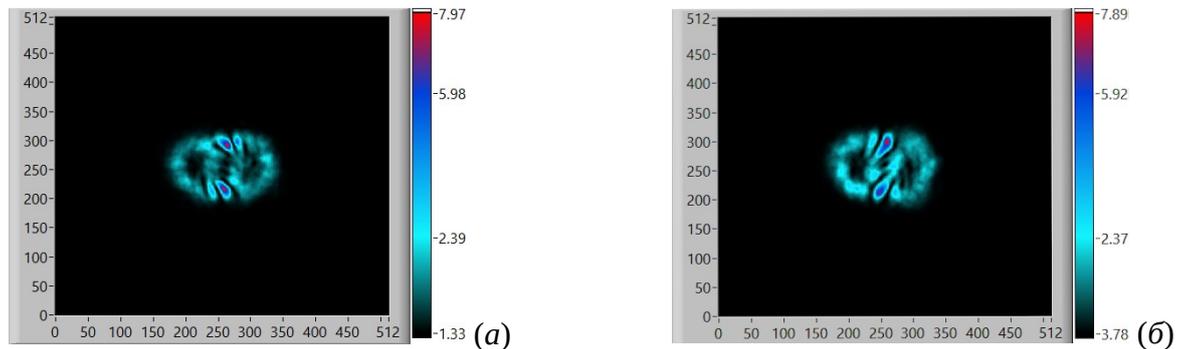


Рисунок 2 — Случайное распределение интенсивности в интерференционной картине, создаваемой двумя коллимированными Лагерр-Гауссовыми пучками в атмосфере:

$$m = 6 \text{ (a)} \text{ и } m = -5 \text{ (б)}$$

В работе показано, что распределения интенсивности, формируемые при распространении двух взаимно когерентных вихревых оптических пучков в свободном пространстве, можно использовать в качестве алфавита коммуникационных символов в системах оптической связи. Существует также возможность использования для этих целей интерференции двух взаимно когерентных вихревых оптических пучков с различными значениями топологических зарядов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. The infrared & electro-optical systems handbook. Vol. 3. Electro-optical components / ed. by W.D. Rogatto. Bellingham, Washington: SPIE Press, 1993. 670 p.
2. The infrared & electro-optical systems handbook. Vol. 4. Electro-optical system design, analysis, and testing / ed. by M.C. Dudzik. Bellingham, Washington: SPIE Press, 1993. 360 p.
3. Handbook of optics. Vol. 1. Fundamentals, techniques, and design / ed. by M. Bass, editor in chief. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1995. 1664 p.
4. Handbook of optics. Vol. 2. Devices, measurements, and properties / ed. by M. Bass, editor in chief. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1995. 1496 p.
5. Handbook of optics. Vol. 3. Classical optics, vision optics, X-ray optics / ed. by M. Bass, editor in chief. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 821 p.
6. Handbook of optics. Vol. 4. Fiber optics and nonlinear optics / ed. by M. Bass, editor in chief. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2001. 943 p.
7. Лукин И.П., Миронов В.Л. Флуктуации интерференционной картины при распространении в атмосфере // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22. № 3. С. 615–618.
8. Kaloshin G.A., Lukin I.P. Interferometric laser scanner for direction determination // Sensors. 2014. V. 16. N 2. 130.
9. Konyayev P.A., Lukin V.P. Thermal distortions of focused laser beams in the atmosphere // Appl. Opt. 1985. V. 24, N 4. P. 415–421.

10. Кандидов В.П. Метод Монте-Карло в нелинейной статистической оптике // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166. № 12. С. 1309–1338.

11. Wang D., Zhang M. Artificial intelligence in optical communications: From machine learning to deep learning // Front. Commun. Netw. 2021. V. 2-2021. <https://doi.org/10.3389/frcmn.2021.656786>.