

# СЛУЧАЙНЫЕ БЛУЖДЕНИЯ СУПЕРПОЗИЦИИ ВИХРЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРОШЕДШИХ АТМОСФЕРНУЮ ТРАССУ

Кусков В.В.

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

e-mail: vvk@iao.ru

Представлены результаты экспериментального исследования случайных блужданий суперпозиции вихревых оптических полей прошедших 500-метровую атмосферную трассу. Формирование пучков осуществлялось с использованием фазового модулятора света. Показано, что увеличение величины максимального порядка в суперпозиции полей вело к увеличению поперечных размеров пучка в конце трассы распространения. Увеличение величины оптической турбулентности вело к увеличению случайных блужданий пучков. Зависимости блуждания от вида суперпозиции зарегистрировано не было.

Вихревое лазерное излучение может использоваться для мультиплексирования и демультиплексирования различных информационных каналов в линиях оптической связи. Это позволяет значительно увеличить скорость передачи данных [1]. Однако их применение в открытых оптических линиях связи ограничивает наличие атмосферной турбулентности на трассе распространения излучения [2]. Ранее были представлены экспериментальные результаты по исследованию особенностей распространения вихревого лазерного излучения на атмосферной трассе длиной 500 метров [3]. В настоящей работе показаны результаты исследования случайного блуждания пучков, которые представляют собой суперпозицию полей вихревого излучения.

Ранее для проведения экспериментов по распространению вихревого лазерного излучения в атмосфере была собрана экспериментальная установка. Её описание дано в [3]. Формирование вихревых оптических полей осуществлялось с использованием жидкокристаллического фазового пространственного модулятора света Pluto-2.1-Vis-016 производства «Нолоеуе». Контроль величины оптической турбулентности на трассе распространения осуществлялся с использованием акустической метеостанции АМК-03 (Сибаналитприбор, г. Томск). Она располагалась на расстоянии 150 метров от передатчика излучения. Полученные с её помощью метеорологические данные использовались для оценки величины структурной постоянной показателя преломления  $C_n^2$ .

Комплексное поле лазерного пучка описывается выражением,

$$U_l(x, y) = A(x, y) \exp(i\varphi(x, y)) \quad (1)$$

где  $A(x, y)$  амплитуда и  $\varphi(x, y)$  фаза поля. Для вихревого пучка  $\varphi(x, y) = \pm l \arctg 2(y/x)$ . Функция  $\arctg 2(y/x)$  определяет главное значение фазы в интервале  $[0, 2\pi)$ ,  $l$  - величина топологического заряда вихревого пучка. Во время экспериментов использовались пучки, которые представляют собой суперпозиции полей с топологическим зарядом 1 и 1 ( $U_{1,1} = U_1 + U_1$ ), а также 1 и 5 ( $U_{1,5} = U_1 + U_5$ ).

Длина атмосферной трассы составляла 500 метров. В конце трассы распространения располагался белый матовый экран. Двумерное распределение интенсивности на экране регистрировалось при помощи высокоскоростной видеокамеры с частотой до 20 Гц и временем экспозиции 200 мкс. Длительность одного сеанса регистрации составляла 45 секунд. Таким образом, за каждый сеанс регистрировалось до 900 независимых распределений интенсивности пучка на экране.

Величина блужданий пучка зависит не только от величины оптической турбулентности на трассе распространения, но и от его поперечного размера [4]. В таблице 1 представлены зарегистрированные начальные и усредненные за 45 секунд конечные размеры пучков. Их нормированные на максимум двумерные распределения интенсивности представлены на рисунке 1. Радиус пучка определялся как радиус круга, в который попадает  $R_{63}=63$  (или  $R_{90}=90$ ) % энергии от полной мощности пучка:

$$P(a) = \frac{\int_0^a \int_0^{2\pi} I(\theta, r) r dr d\theta}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} I(\theta, r) r dr d\theta} = 0,63 \quad (2)$$

Таблица 1. Начальные и конечные размеры пучков

Суперпозиция пучков с топологическими зарядами:	Начальный радиус (см)	
	$R_{63}$	$R_{90}$
1, 1	1,4	1,9
1, 5	1,4	1,9
	Конечный радиус (см) при $C_n^2 \approx 2 \times 10^{-14}$	
1, 1	1,9	2,5
1, 5	2,8	3,6

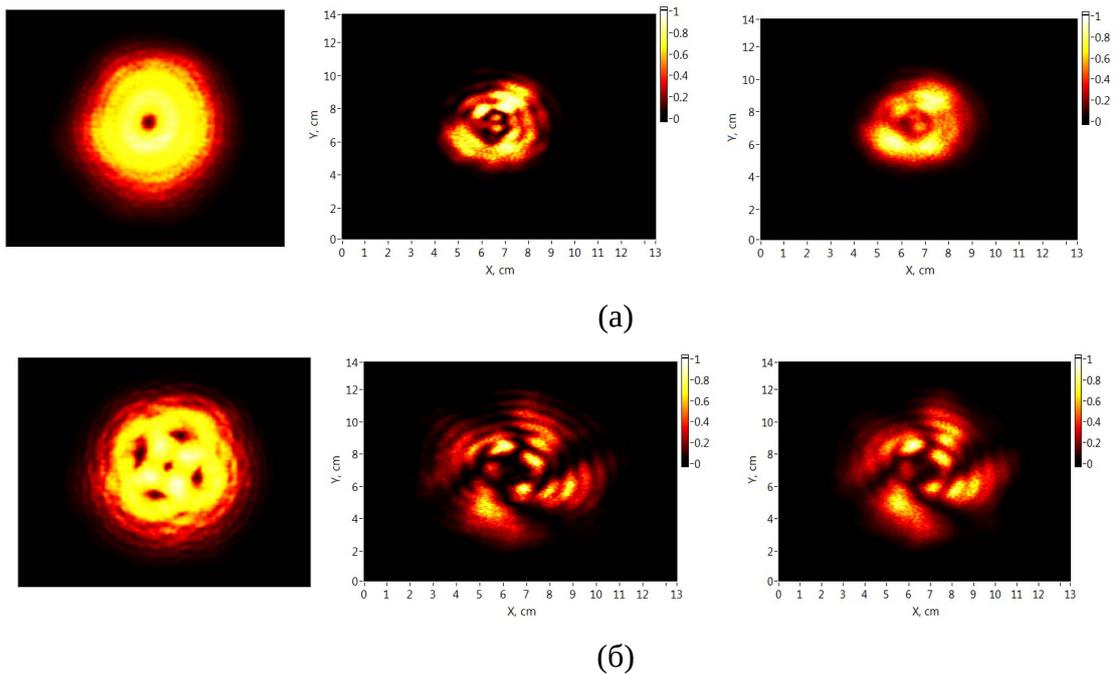


Рисунок 1 - начальные (слева), мгновенные (по центру) и усреднённые (справа) за 45 секунд двумерные распределения интенсивности суперпозиции вихревых пучков в конце трассы распространения с  $l=1$  и 1(а), а также  $l=1$  и 5 (б).

Исходя из таблицы 1 видно, что начальные размеры не зависели от величины топологических зарядов полей в суперпозиции. Однако после распространения на расстояние 500 метров эта зависимость начинала проявляться: увеличение величины топологического заряда вело к увеличению общих поперечных размеров суперпозиции. Кроме того, в случае суперпозиции полей с 1 и 5 топологическими зарядами, изначально округлое с несколькими пятнами внутри распределение интенсивности к концу трассы распространения распалось на несколько фрагментов.

На рисунке 2 показаны случайные блуждания, которые оценивались на основе дисперсии смещений энергетического центра тяжести короткоэкспозиционного видеоизображения распределения интенсивности ( $I(r)$ ). Положение центра тяжести оценивалось по формуле:

$$r_c = \frac{\int \int_{-\infty}^{\infty} I(r) r dr}{\int \int_{-\infty}^{\infty} I(r) dr} , \quad (3)$$

а дисперсия смещений

$$\sigma_c^2 = \langle (r_c - \langle r_c \rangle)^2 \rangle. \quad (4)$$

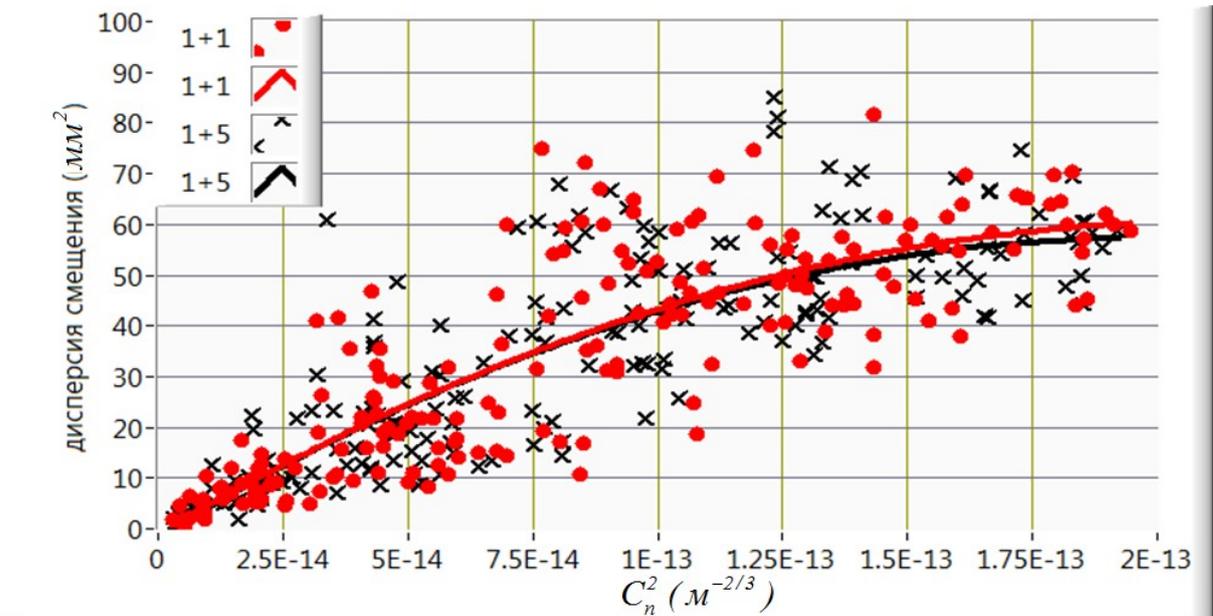


Рисунок 2 - дисперсия смещения в зависимости от  $C_n^2$ . Данные за 17, 29 мая и 19 июня 2024 года. Точки- экспериментальные данные, сплайн-линия построена на основе 192 точек.

Из рисунка 2 видно, что увеличение значения  $C_n^2$  вело к увеличению блуждания пучков, однако на уровне примерно  $C_n^2 \approx 1,75 \times 10^{-13}$  достигло насыщения. При этом, величина блужданий пучков с различной суперпозицией была одинакова.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН).

### Литература

1. Lei T., Zhang M., Li Y., Jia P., Liu G. N., Xu X., Li Z., Min C. J., Lin J., Yu C. Y., Niu H., Yuan X. C. Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings // *Light: Sci Appl.* 2015. V. 4. e257. DOI: 10.1038/lsa.2015.30.
2. Anguita J. A., Neifeld M. A., Vasic B. V. Turbulence-induced channel crosstalk in an orbital angular momentum-multiplexed free-space optical link // *Applied Optics.* 2008. V. 47. P. 2414–2429. DOI: 10.1364/AO.47.002414.
3. Махманазаров Р.М., Кусков В.В., Банах В.А., Герасимова Л.О., Фалиц А.В., Воробьев Ю.А. Экспериментальное исследование случайных блужданий вихревых лазерных пучков, распространяющихся в турбулентной атмосфере // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Материалы XXX Международного симпозиума, г. Санкт-Петербург, 1–5 июля 2024 г.* — Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2024. С.А58-А61. DOI: 10.56880/ОАО30А10.
4. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. *Оптика турбулентной атмосферы.* // Л.: Гидрометеиздат, 1988. 270 с.