

03

## Интерферометрия оптических вихрей при наличии пространственного фазового шума

© Д.Д. Решетников, Т.К. Король, Е.В. Малютина, В.М. Петров

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: d.d.reshetnikov@gmail.com

Поступила в редакцию 13.06.2024 г.

В окончательной редакции 20.07.2024 г.

Принята к публикации 29.07.2024 г.

Предложен метод регистрации интерферограмм оптических пучков с орбитальным угловым моментом (ОУМ), возникающих за счет интерференции нулевого и одного из первых порядков дифракции пучка при введении в оптическую схему дополнительную дифракционную решетку. Экспериментально и теоретически исследована помехоустойчивость такого метода детектирования при помощи аддитивного сложения пучков с ОУМ с пространственным (двумерным) фазовым шумом. Для описания фазового шума использовалось гауссово распределение, при измерениях варьировалась величина его среднеквадратичного отклонения  $\sigma$ . Для данных конкретных условий нашего эксперимента была определена предельная величина  $\sigma$ , позволяющая регистрировать значение ОУМ по критерию  $S/N = 3$ .

**Ключевые слова:** оптические вихри, пучки с фазовым шумом, регистрация оптических вихрей, свет с орбитальным угловым моментом, пространственный модулятор света.

DOI: 10.61011/OS.2024.07.58900.6774-24

### Введение

Пучки с аксиально-симметричной поляризационной структурой, или так называемой оптические вихри, привлекают внимание разработчиков в связи с активным развитием оптических в том числе и квантовых каналов связи через открытое пространство — т.е. через атмосферу [1–3]. Несмотря на то, что такие каналы предполагают связь только в пределах прямой видимости, они представляют интерес для довольно широкого круга практических применений, например, для спутниковой связи, для связи между подвижными объектами и т.д. [4,5]. Это связано с одним из главных преимуществ пучков с аксиально-симметричной структурой, а именно инвариантностью к непредсказуемому вращению их плоскости поляризации относительно оси направления распространения [6,7].

К настоящему времени выполнено значительное количество как теоретических, так и экспериментальных работ в данной области, в том числе и по созданию протокола для линии квантовой связи с использованием аксиально-симметричных пучков, аналогичного протоколу BB84, используемого для пучков с линейной поляризацией [8,9].

В данной работе мы будем рассматривать влияние пространственных фазовых шумов на возможность детектирования оптических вихрей двумерным фотоприемником. Весьма схожие задачи возникают, например, при распространении оптических вихрей через различные среды, обладающие турбулентностью [10–15].

Другой задачей является практическая реализация детектирования пучков с ОУМ. Существует несколько

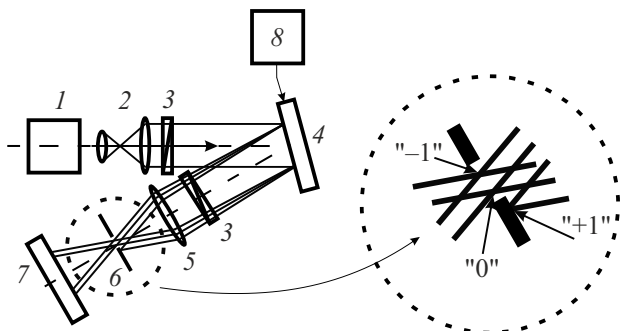
способов детектирования пучков с ОУМ. Для этого используются:  $q$ -пластинки, скрещенные цилиндрические линзы, двумерные фазовые модуляторы света (SLM) или голографические дифракционные элементы [16], в том числе, основанные на различного рода управляемых (т.е. динамических) голографических решетках [17–19]. Также сейчас активно развивается техника сортеров по ОУМ, позволяющая различать такие пучки в широком диапазоне значений [20,21]. Активно ведутся работы по использованию графена и графеноподобных покрытий в качестве фотоприемников для указанных задач [22,23].

Разные подходы различаются скоростью детектирования пучков, габаритами и стоимостью оптической системы, что вынуждает подбирать под каждую конкретную задачу свой способ детектирования.

В настоящей статье мы предлагаем методику интерферометрического детектирования оптических вихрей и демонстрируем ее эффективность на примере измерения отношения сигнал/шум при наличии пространственного, т.е. двумерного фазового шума.

### Эксперимент

Одним из признаков оптического вихря является изображение так называемой „вилки“, возникающей в результате интерференции опорной волны и вихря. Для этого может быть использована интерференция между нулевым и одним из первых порядков дифракции, получаемых за счет дополнительного внесения дифракционной решетки в исходное фазовое распределение пучка Лагерра-Гаусса [24].



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки. 1 — лазер,  $\lambda = 650 \text{ nm}$ , мощность  $2 \text{ mW}$ ; 2 — расширитель пучка; 3 — поляризатор и анализатор; 4 — двумерный модулятор света; 5 — линза,  $F = 300 \text{ mm}$ ; 6 — пространственный фильтр; 7 — ПЗС-камера; 8 — компьютер. На вставке показано положение пространственного фильтра, пропускающего нулевой и один из первых порядков дифракции.

Схема установки показана на рис. 1. Основным элементом является пространственный, т.е. двумерный модулятор света (4) (SLM — Spatial Light Modulator) на основе жидкокристаллической матрицы (LCoS — Liquid Crystal on Silicon). Матрица имела  $1920 \times 1080$  пикселей размером  $8.0 \times 8.0 \mu\text{m}^2$ , размер апертуры матрицы  $15.36 \times 8.64 \text{ mm}^2$  и коэффициент отражения  $65\text{--}95\%$ . Модулятор был подключен к компьютеру (8) в качестве второго, дополнительного монитора через HDMI-порт. Оптическая фаза в каждом пикселе кодировалась с помощью 256 уровней (8 бит).

На апертуре модулятора формировалась аддитивная смесь трех фазовых распределений:

$$IN(x, y) = LG_{11}(x, y) + N(x, y) + G(x),$$

где  $x$  и  $y$  — координаты матрицы модулятора (рис. 2). Метод создания подобной маски описан в [25].

Распределение  $LG_{p,l}(x, y)$  состоит из  $p + 1$  концентрических колец с нулевым значением поля в центре

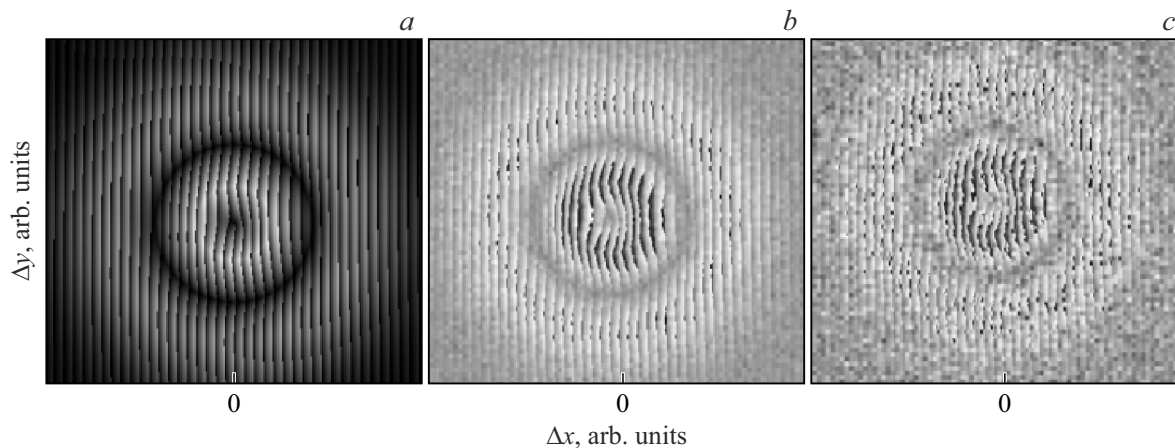
пучка при  $l \neq 0$ , которое называется точкой сингулярности. Между соседними кольцами значения поля также равны нулю.

Распределение  $N(x, y)$  задавало двумерное изображение двумерного фазового шума (рис. 3). Оно строилось следующим образом: сначала экран разбивался на квадраты  $5 \times 5$  пикселей. Затем каждый квадрат кодировался уровнем серого, который задавался числом от 0 до 255 в шкале RGB. Значения уровня серого каждого квадрата генерировались случайным образом по гауссову распределению со средним значением 128 и среднеквадратичным отклонением  $\sigma$ . Меняя величину  $\sigma$ , можно было менять соотношение сигнал/шум, что и обеспечивало имитацию различной величины пространственного фазового шума.

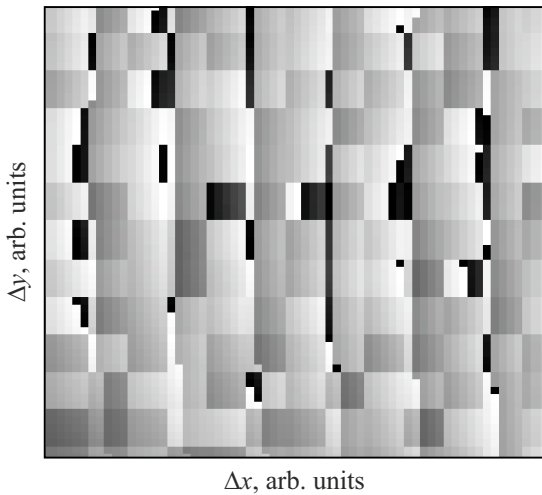
Распределение  $G(x)$  представляло из себя одномерную фазовую дифракционную решетку с периодом  $T(x)$ , составляющим 10 пикселей ( $80 \mu\text{m}$ ). Наличие такой дифракционной решетки создавало пару симметричных дифракционных порядков в фокальной плоскости линзы (5). Регистрация выходного изображения  $OUT(v, \xi)$  производилась ПЗС-камерой (7). Пространственный фильтр (6) пропускал нулевой и один из первых порядков дифракции. ПЗС-камера (7) регистрировала результат интерференции. Координаты плоскости регистрации (плоскости ПЗС-камеры) обозначены соответственно  $\xi$  и  $v$  (рис. 4, а). Структура так называемой „вилки“ в интерференционной картине указывает на порядок оптического вихря. Наличие в ней двух зубцов показывает, что регистрируемая волна является оптическим вихрем первого порядка ( $l = 1$ ), трех зубцов — второго ( $l = 2$ ) и так далее.

На рис. 4, б показано сечение интерференционной картины вдоль линии А–А в относительно небольшом диапазоне изменения выходных координат  $\Delta\xi$ , т.е. в ближайшей окрестности „вилки“.

Для количественного описания эффективности детектирования аддитивной смеси оптического вихря и двумерного фазового шума нами использовался следующий



**Рис. 2.** Примеры входных фазовых распределений  $IN(x, y)$ , формируемых на экране модулятора.  $a$  —  $\sigma = 0$ ,  $b$  —  $\sigma = 10$ ,  $c$  —  $\sigma = 20$ .



**Рис. 3.** Фрагмент входного изображения фазового шума  $IN(x, y)$  для  $\sigma = 20$ .

метод оценки отношения сигнал/шум  $S/N$  (рис. 5, *a*). Сначала были определены внешние и внутренние границы двух первых колец. Для иллюстрации на рис. 5, *a* внешняя граница второго кольца обозначена как  $\Delta\xi$ , в пределах которой производилась оценка  $S/N$ . Во всех последующих экспериментах эти границы не менялись. Для определения величины сигнала  $S$  определялось среднее значение по амплитудам всех интерференционных полос, входящих в состав колец:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i,$$

где  $S_i$  — амплитуда  $i$ -й интерференционной полосы, входящей в состав колец,  $n$  — общее число интерференционных полос в составе колец на сканограмме.

Для определения величины шума  $N$  определялось среднее значение по амплитудам интерференционных полос, входящих в состав областей, находящихся между кольцами:

$$N = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m N_i,$$

где  $N_i$  — амплитуда  $i$ -й интерференционной полосы, входящей в состав областей между кольцами,  $m$  — общее число интерференционных полос между кольцами на сканограмме.

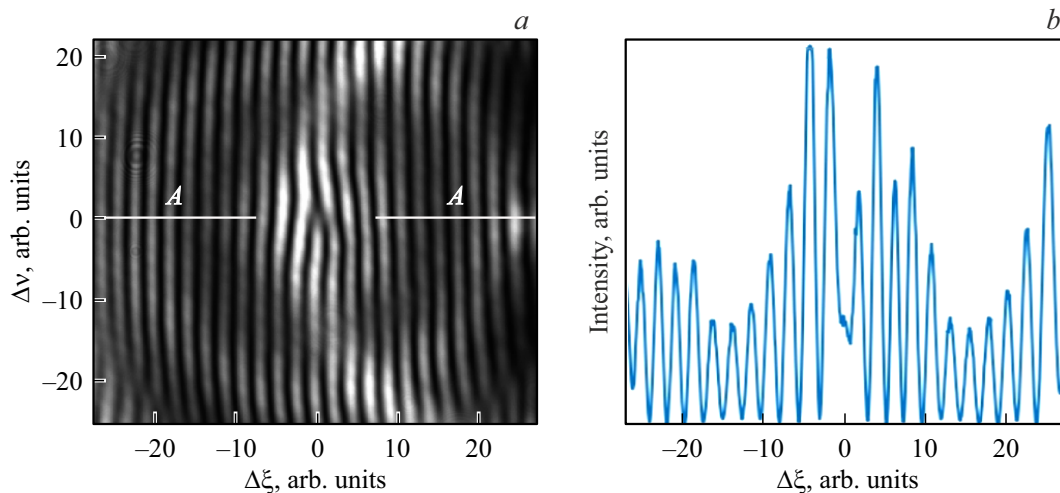
Отметим, что в идеальном случае, поскольку поле между кольцами равно нулю, интерференция в областях между кольцами наблюдаться не должна. Однако наличие интерференционных полос между кольцами как раз и указывает на присутствие шума различного происхождения.

По описанному выше алгоритму были измерены величины  $S/N$  для  $\sigma = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20$ . На рис. 5, *a–e* приведены изображения интерференционных картин и их сканограммы для  $\sigma = 0, 1, 3, 10, 20$ .

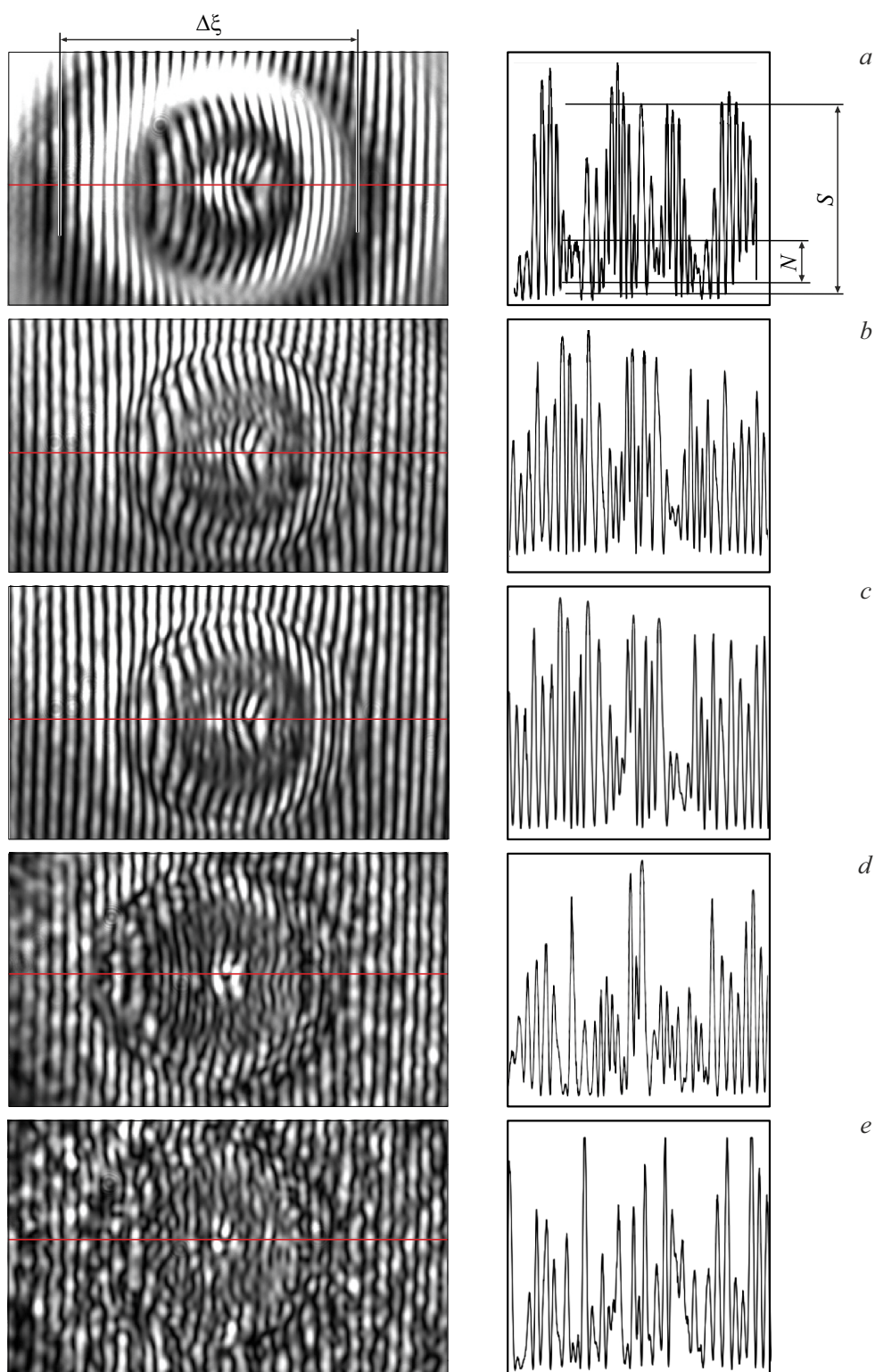
### Моделирование

Моделирование распространения пучка с двумерным фазовым шумом велось при помощи метода распространения пучка с разбиением шага второго порядка SSBPM [26]. Этот метод, в частности, позволяет одновременно рассматривать дифракцию пучка и эффекты неоднородностей, вызванные двумерным фазовым шумом. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 6.

В качестве фазовых экранов использовались маски, выводимые на SLM в реальном эксперименте. Моделировалось распространение пучка на расстояние в 1 км, с одним фазовым экраном посередине оптического пути. Стоит отметить, что обычно для моделирования распространения оптического пучка через турбулентную среду



**Рис. 4.** *a* — изображение интерференционной картины пучка Лагерра-Гаусса на выходе  $OUT(\nu, \xi)$ , для случая  $\sigma = 0$  в диапазоне  $\Delta\xi \pm 28$ . *b* — сечение по  $A-A$ .



**Рис. 5.** Слева: изображения интерференционной картины пучка Лагерра-Гаусса на выходе  $\text{OUT}(\nu, \xi)$ , справа: сечение интерференционной картины на интервале внешней границы второго кольца поперечного сечения пучка  $\Delta\xi$  последовательно для  $\sigma = 0$  (a), 1 (b), 3 (c), 10 (d), 20 (e).

методом SSBPM используется большее число фазовых экранов, однако в нашем случае для моделирования распространения в свободном пространстве пучка с ОУМ

при наличии пространственного фазового шума использовался всего один, чтобы соответствовать условиям эксперимента. Диаметр пучка в перетяжке был равен

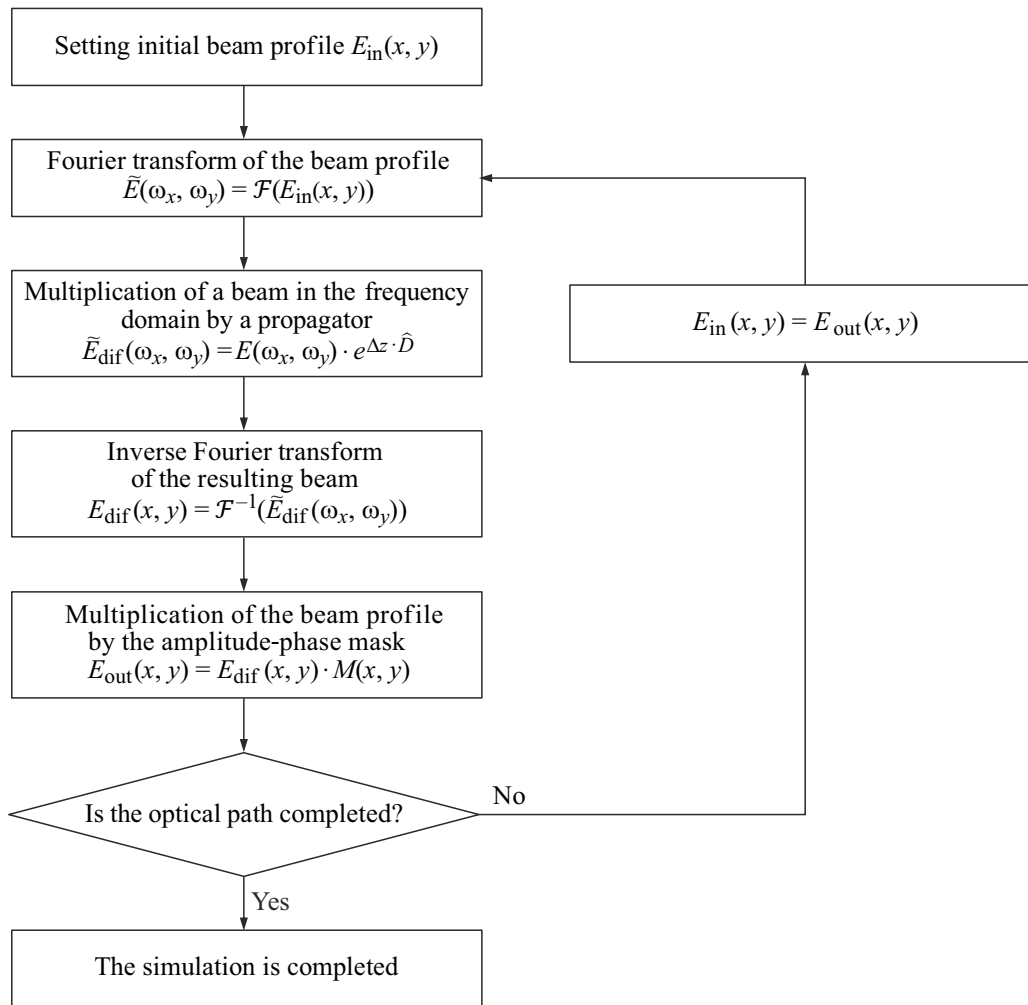


Рис. 6. Блок-схема алгоритма моделирования процесса распространения оптического пучка в турбулентной среде SSBPM.

2.4 mm, длина волны — 650 nm. Пучок, прошедший оптический путь с фазовым экраном, интерферирует в схеме Маха-Цандера с опорным гауссовым пучком под углом в 2.1 mrad для наблюдения интерференционной картины, содержащей „вилку“. В результате моделирования были получены сканограммы интерференционных картин, на которых аналогично описанному в разделе выше алгоритму были найдены отношения  $S/N$  (рис. 7, кривая 2). Результаты измерения отношения  $S/N$  также приведены на рис. 7 (кривая 1).

Стоит отметить, что моделирование дает лучшее отношение  $S/N$  по ряду причин. С одной стороны, разрешение сетки пикселей, на которой велось моделирование, выше, чем разрешение камеры, что позволяет уменьшить шум при детектировании оптического пучка. Разрешение сетки пикселей при моделировании также выше, чем разрешение SLM, что позволяет формировать более резкий пространственный профиль пучка. Наконец, при моделировании не учитываются естественные искажения и потери, вносимые оптическими элемента-

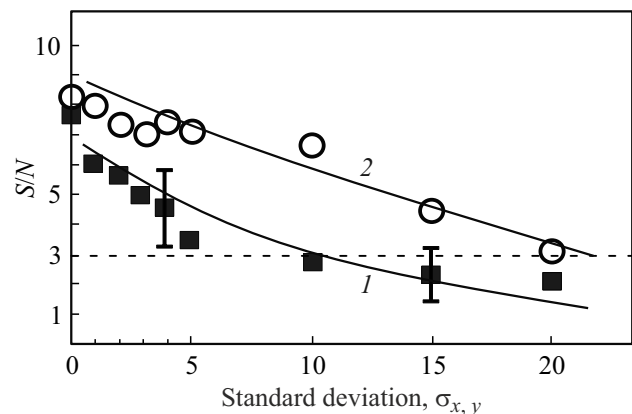


Рис. 7. Зависимость отношения сигнал-шум  $S/N$  от величины среднеквадратичного отклонения фазовых шумов при гауссовом распределении: 1 — эксперимент, 2 — моделирование.

ми, неидеальность волнового фронта исходного лазерного пучка и дифракция пучка на краях SLM.

## Заключение, обсуждение результатов

Использованная в данной работе интерферометрическая регистрация позволяет определять факт наличия оптического вихря даже в условиях достаточно сильного пространственного фазового шума. Очевидно, такой эксперимент не позволяет полноценно моделировать турбулентность среды, так как для этого потребовалось бы последовательно разместить на одной оси  $N$  двумерных фазовых модуляторов, задающих фазовые распределения в  $N$  дискретных плоскостях. При этом результаты моделирования позволяют говорить об удобстве использования предложенного подхода для тестирования реальных оптических систем.

Как видно из приведенных на рис. 7 результатов, при использовании описанной нами методики факт обнаружения оптического вихря по критерию  $S/N = 3$  может быть установлен при величине  $\sigma = 10$ . Здесь также интересно отметить, что даже при более высоких значениях  $\sigma$ : 10 и 20 изображение интерференционной картины оптического вихря может быть распознано (рис. 5, *d, e*), хотя в этих случаях отношение  $S/N < 3$ , что не отвечает критерию надежного обнаружения. Описание пространственного фазового шума при помощи гауссова распределения является одним из самых сложных случаев по сравнению с другими моделями. Таким образом, можно считать, что полученная оценка величины  $\sigma$  является оценкой сверху.

Предложенный метод интерферометрического детектирования может быть использован при разработке систем передачи информации в атмосферных оптических каналах связи, поскольку способ кодирования информации на значении ОУМ пучка позволяет существенно увеличить информационную емкость таких каналов связи. С другой стороны, представленные результаты моделирования прохождения пучка с ОУМ и пространственным фазовым шумом позволяют оценить предельный шум, при котором атмосферный канал связи может эффективно использоваться для передачи информации, в том числе для задач квантового распределения ключа, где шум в канале связи имеет ключевое значение для обеспечения безопасности передаваемой информации.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] J. Wang, J. Liu, S. Li, Y. Zhao, J. Du, L. Zhu. *Nanophotonics*, **11** (4), 645 (2022). DOI: 10.1515/nanoph-2021-0527
- [2] J. Wang. *Photon. Res.*, **4** (5), B14 (2016). DOI: 10.1364/PRJ.4.000B14
- [3] A.E. Willner, K. Pang, H. Song, K.H. Zou, H.B. Zhou. *Appl. Phys. Rev.*, **8** (4), 041312 (2021). DOI: 10.1063/5.0054885
- [4] Z. Wang, R. Malaney, J. Green. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, **1** (2019). DOI: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9014321
- [5] L. Li, R. Zhang, Z. Zhao et al. *Sci. Rep.*, **7**, 17427 (2017). DOI: 10.1038/s41598-017-17580-y
- [6] A.L. Sokolov. *J. Opt. Soc. Am. A.*, **30** (7), 1350 (2013). DOI: 10.1364/JOSAA.30.001350
- [7] А.С. Акентьев, М.А. Садовников, А.Л. Соколов, Г.В. Симонов. *Опт. и спектр.*, **122** (6), 1044 (2017). DOI: 10.7868/S0030403417060022
- [8] А.Л. Соколов, В.М. Петров, В.Ю. Венедиктов, Д.Д. Решетников. *Фотоника*, **17** (7), 542 (2023). DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.7.542.555
- [9] Д.Д. Решетников, А.Л. Соколов, Е.А. Вашукевич, В.М. Петров, Т.Ю. Голубева. *Изв. вузов. Радиофизика*, **67** (1), 58 (2024). DOI: 10.52452/00213462\_2024\_67\_01\_58
- [10] В.П. Лукин. *УФН*, **191** (3), 292 (2021). [*V.P. Lukin. Phys. Usp.*, **64** (3), 280 (2021)]. DOI: 10.3367/UFNr.2020.10.038849
- [11] A. Klug, C. Peters, A. Forbes. *Adv. Photon.*, **5** (1), 016006 (2023). DOI: 10.1117/1.AP.5.1.016006
- [12] S. Wabnitz. *Opt. Lett.*, **39** (6), 1362 (2014). DOI: 10.1364/OL.39.001362
- [13] M. Vorontsov, G. Carhart, R. Gudimetla et al. *Proc. of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conf.*, E18 (2010).
- [14] R. Barros, S. Keary, L. Yatcheva, I. Toselli, S. Gladysz. *Conference: Proc. SPIE 9242, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIX; and Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems XVII*, **9242**, 92421L (2014). DOI: 10.1117/12.2070694
- [15] L. Andrews, R. Phillips. *Laser Beam Propagation through Random Media, Second Edition* (SPIE Publications, Bellingham, Washington, 2005).
- [16] D.M. Fatkhiev, M.A. Butt, E.P. Grakhova et al. *Sensors*, **21** (15), 4988 (2021). DOI: 10.3390/s21154988
- [17] M.P. Petrov, V.M. Petrov, I.S. Zouboulis, L.P. Xu. *Opt. Comm.*, **134** (1–6), 569 (1997). DOI: 10.1016/S0030-4018(96)00370-7
- [18] V.M. Petrov, S. Lichtenberg, J. Petter, T. Tschudi. *Opt. Comm.*, **229** (1–6), 131 (2004). DOI: 10.1016/j.optcom.2003.10.049
- [19] S.M. Shandarov, S.S. Shmakov, N.I. Burimov, O.S. Syvaeva, Yu.F. Kargin, V.M. Petrov. *JETP Letters*, **95** (12), 618 (2012). DOI: 10.1134/S0021364012120144
- [20] J. Cheng, C. Wan, Q. Zhan. *Opt. Express*, **30** (10), 16330 (2022). DOI: 10.1364/OE.455987
- [21] H. Huang, G. Milione, M. Lavery et al. *Sci Rep.*, **5**, 14931 (2015). DOI: 10.1038/srep14931
- [22] G.L. Klimchitskaya, C.C. Korikov, V.M. Petrov. *Phys. Rev. B*, **92**, 159906(E) (2016). DOI: 10.1103/PhysRevB.93.159906
- [23] G.L. Klimchitskaya, V.M. Mostepanenko, V.M. Petrov. *Phys. Rev. A*, **98** (2), 023809 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevA.98.023809
- [24] J.A. Davis, D.M. Cottrell, J. Campos, M.J. Yzuel, I. Moreno. *Appl. Opt.*, **38** (23), 5004 (1999). DOI: 10.1364/AO.38.005004
- [25] E. Bolduc, N. Bent, E. Santamato et al. *Optics Letters*, **38** (18), 3546 (2013). DOI: 10.1364/OL.38.003546
- [26] Y.K. Chahine, S.A. Tedder, B.E. Vyhnalek, A.C. Wroblewski. *Free-Space Laser Communications XXXII*. San Francisco, California, US, **11272**, 1127215 (2020). DOI: 10.1117/12.2543583