

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 535.24; 535.6

## Оценка возможности передачи информации с использованием оптических вихрей при наличии фона, сформированного массивом случайно расположенных дислокаций

Ф.Ю. Канев, В.П. Аксенов, Н.А. Макенова, И.Д. Веретехин\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 11.05.2021 г.

Разработан метод, позволяющий выделить информационный сигнал в пучке, результатом искажений которого является появление в нем дополнительных оптических вихрей. При этом информация также передается с использованием вихря. Исследование было выполнено на основе методов численного эксперимента, в соответствующей модели все дислокации вносились в волновой фронт в плоскости апертуры источника, затем излучение распространялось в условиях свободной дифракции. Оптическая схема эксперимента приближенно соответствовала линии оптической связи, в которой излучение испытывает значительные искажения в тонком слое среды, расположенном вблизи выходной апертуры лазерного генератора. В статье рассмотрено два метода выделения информационного сигнала на фоне шумов и продемонстрирована возможность использования одного из них в реальных линиях связи.

*Ключевые слова:* оптические вихри, особые точки волнового фронта, линии оптической связи, атмосферная турбулентность; optical vortices, singular points of the wavefront, optical communication lines, atmospheric turbulence.

### Введение

В последние несколько лет в разных странах (Россия, США, КНР) интенсивно исследуются возможности передачи информации по проходящим в атмосфере линиям оптической связи [1–9]. Интерес к этой проблеме объясняется преимуществами, появляющимися при переходе от радиочастот к оптическому диапазону, – снижением потерь и затрат энергии, уменьшением веса и объема передатчика и приемника [5], возможностью защиты данных от перехвата [6, 10, 11], но прежде всего – повышением скорости передачи информации [4, 5] за счет увеличения частоты несущего сигнала. Еще одной особенностью оптической линии является дополнительное увеличение плотности информационного потока при использовании в линиях связи вихревого излучения [3, 6, 9]. В этом случае возможно кодирование данных величиной орбитального углового момента пучка [3], но реальные преимущества проявляются при мультиплицировании (сведении в один канал) в плоскости передачи нескольких пучков с различным орбитальным угловым моментом и их демультиплицировании в плоскости приема [3, 9].

Вышеуказанными свойствами обусловлено широкое практическое применение линий оптической связи, в частности предлагается провести такие линии между наземными объектами и спутниками [4], между станциями на Земле и аппаратами, летящими по лунной орбите [5], и т.д.

Нужно отметить, что турбулентное искажение излучения снижает качество оптической связи по каналу, проходящему в атмосфере Земли [7, 8, 12]. Уменьшение искажений и вероятности возникновения ошибок достигается как за счет оптимизации параметров оптической системы [12], так и при использовании методов адаптивной коррекции [8].

Несмотря на большое количество материалов, опубликованных по рассматриваемой теме, ряд задач все еще невозможно считать полностью решенными. Например, не определено влияние дислокаций, возникающих при распространении излучения в атмосфере, на точность регистрации несущего информацию сигнала, в частности на регистрацию вихрей методами из [1, 3, 6]. Для решения указанной проблемы мы предлагаем алгоритм определения особых точек волнового фронта, результаты тестирования которого представлены в [13], где показано, что он обладает высокой точностью, которая остается постоянной при изменении числа дислокаций в пучке от 1 до 40.

В настоящей работе представлены результаты исследований с использованием указанного алгоритма,

\* Федор Юрьевич Канев (mna@iao.ru); Валерий Петрович Аксенов (avr@iao.ru); Наиля Алтыхановна Макенова (makenova@iao.ru); Игорь Дмитриевич Веретехин (aswer95@inbox.ru).

которые демонстрируют возможность выделения информационного сигнала в пучке, результат искажений которого – появление в нем дополнительных оптических вихрей. При этом информация также передается с использованием вихря. Такая модель приближенно описывает линию оптической связи, предназначенную для работы в атмосфере при наличии значительных искажений. Для упрощения проведения исследований на первом этапе было решено отказаться от полной модели турбулентной среды, так как задача в этом случае становится достаточно сложной, а для ее решения необходимо не только получить статистику вихрей для различных условий распространения, но и изучить характерные особенности их зарождения.

## 1. Схема численного эксперимента и алгоритм регистрации особых точек

Численные исследования проводились по схеме, представленной на рис. 1, где показана координатная система и обозначено направление распространения пучка. В плоскости апертуры источника (при  $z = 0$ ) в волновой фронт излучения помещались от 2 до 20 особых точек, их число и координаты задавались генератором случайных чисел, встроенным в язык программирования C++ и обеспечивающим, согласно описанию языка, равномерное распределение. Здесь же в центр пучка вводился дополнительный вихрь, несущий информационный сигнал. Распространение излучения от плоскости  $z = 0$  до плоскости регистрации моделировалось в среде без искажений.

Задание дислокаций выполнялось с использованием уравнения, заимствованного из [14]:

$$E(x, y) = \prod_{l=0}^L \prod_{n_l=1}^{N_{l'}} [(x - x_{nl}) + i(y - y_{nl})]^l \times \prod_{m=1}^{N_l} [(x - x_{ml}) - i(y - y_{ml})]^l \exp[-(x^2 + y^2)/a_0^2], \quad (1)$$

где  $E(x, y)$  – комплексная амплитуда излучения;  $x$  и  $y$  – текущие координаты в плоскости, перпендикулярной направлению распространения;  $x_{nl}$ ,  $y_{nl}$  – координаты особых точек;  $N_{l'}$  – число вихрей с по-

ложительными,  $N_{l'}$  – с отрицательными топологическими зарядами,  $l$  – топологический заряд вихря, который может изменяться в диапазоне от 0 до  $L$ ;  $a_0$  – начальный радиус пучка. Несмотря на то, что координаты  $x_{nl}$ ,  $y_{nl}$  задавались генератором случайных чисел, ограничение их интервала обеспечило размещение всех особых точек в области радиусом меньшим, чем энергетический радиус пучка. При задании случайного распределения особых точек топологические заряды  $l$  попеременно принимали значения  $\pm 1$  (рассматривались вихри только первого порядка).

Распространение излучения от плоскости апертуры источника до плоскости регистрации описывалось волновым уравнением, введенным в приближении квазиоптики [15]:

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + 2k^2 \delta n \right) E. \quad (2)$$

Нормировка параметров, входящих в уравнение, проводилась следующим образом: расстояние  $z$  нормировалось на дифракционную длину  $z_d = ka_0^2$  ( $k$  – волновое число), поперечные координаты  $x$  и  $y$  – на начальный радиус пучка  $a_0$ . В (2)  $\delta n$  – возмущения показателя преломления на трассе. Во всех рассмотренных в настоящей статье вариантах распространения излучения от источника до плоскости регистрации рассчитывалось в среде без искажений, поэтому полагалось, что  $\delta n = 0$ . Для численного решения (2) применялось быстрое преобразование Фурье [16]; во всех случаях, кроме специально отмеченных, размерность расчетной сетки составляла  $1024 \times 1024$  узла; программирование проводилось на языке C++ (Microsoft Visual Studio 2010).

Для регистрации особых точек использовался алгоритм обработки градиентов (при включении в оптическую систему датчика Шака–Гартмана обрабатываются локальные наклоны) волнового фронта излучения [17, 18]. В алгоритме область, занимаемая пучком, разбивалась на небольшие контуры (сторона каждого из контуров сформирована 3–5 точками расчетной сетки), по периметру которых вычислялась циркуляция градиентов, т.е. находилось значение интеграла

$$\Gamma(\alpha) = \oint_R \alpha(\mathbf{r}, z) d\mathbf{r}. \quad (3)$$

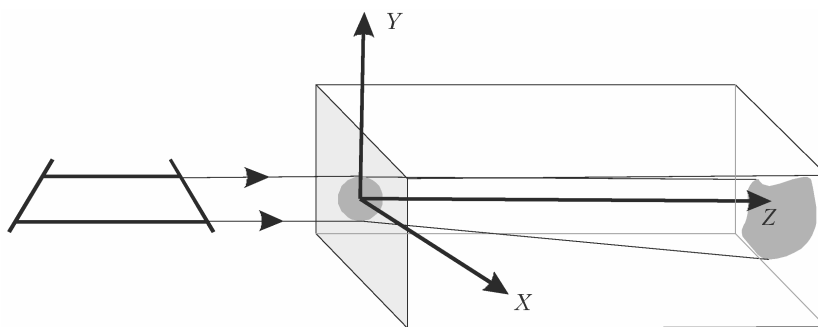


Рис. 1. Схема численного эксперимента

Здесь  $\mathbf{r} = \{x, y\}$  – вектор координат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения;  $R$  – периметр контура интегрирования.

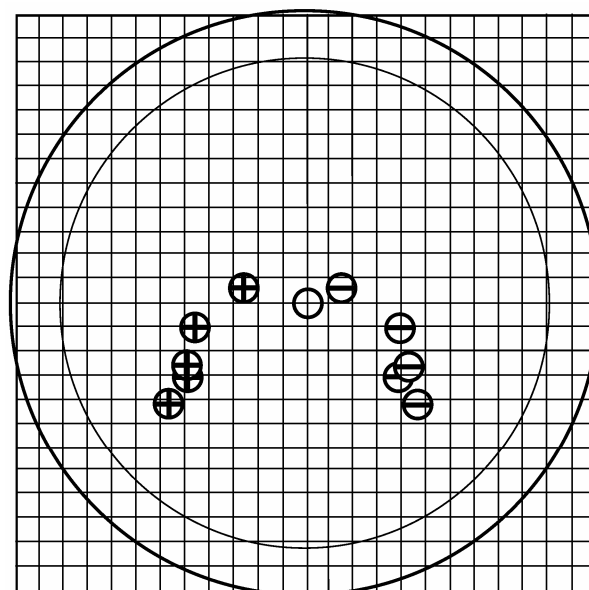
Если результат вычислений был равен  $\pm 2\pi$ , полагалось, что в контуре интегрирования присутствует особая точка первого порядка,  $\pm 4\pi$  – второго и т.д. В численной модели градиенты волнового фронта вычислялись согласно уравнению [18]:

$$\alpha(\mathbf{r}, z) = \frac{1}{2ikI(\mathbf{r}, z)}(E^*\nabla E - E\nabla E^*), \quad (4)$$

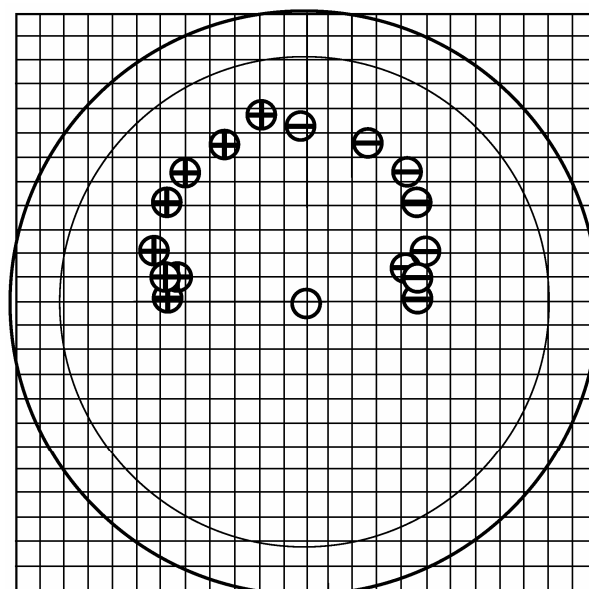
где  $I(\mathbf{r}, z)$  – интенсивность излучения;  $E(\mathbf{r}, z)$  – комплексная амплитуда поля;  $I = EE^*$  [15]. Оценки точности алгоритма приведены в [13], где отмечено, что при изменении числа особых точек в пучке от 1 до 40 ошибки регистрации отсутствуют. В этой численной модели максимальная протяженность трассы распространения зависит от размерности расчетной сетки, поэтому в численных экспериментах координата  $z$  изменялась в интервале 0 до 0,6; на более длинных дистанциях резко возрастала погрешность вычислений. Еще одной особенностью решаемой задачи было то, что при распространении пучка особые точки смещались от своего начального положения и их количество изменялось. Так, смещение вихрей в пучке иллюстрируется на примере диполя, т.е. двух дислокаций с топологическими зарядами +1 и -1, на рис. 2. Видно, что разноименные особые точки сближаются (результат совпадает с данными из [14]), а траектории движения зависят от начального положения вихрей относительно центра пучка.

Изменение числа дислокаций  $N_{\text{dsl}}$  демонстрирует рис. 3, где показано начальное распределение амплитуды с введенными в пучок особыми точками и распределение, вычисленное после прохождения пучком расстояния в 0,4 дифракционной длины. Можем видеть, что в первом примере (рис. 3, а, б) число особых точек уменьшилось с 10 до 6, во втором (рис. 3, в, г) – увеличилось с 15 до 21, в обоих случаях наблюдалось изменение координат вихрей. В проведенных численных экспериментах был выявлен и третий вариант, в котором при распространении число вихрей в пучке не изменялось.

Изменение числа дислокаций также зависит от размеров области, в которой они регистрируются. В области, диаметр которой равен начальному энергетическому диаметру пучка (формула для его вычисления приведена в [19]), это число обычно уменьшается (рис. 4, а); в области с большими размерами (рис. 4, б) на коротких трассах ( $z < 0,2$ ) наблюдается уменьшение  $N_{\text{dsl}}$ , затем, при  $z > 0,2$ , – увеличение  $N_{\text{dsl}}$ . Приведенные на рис. 4 данные были получены в результате обработки 200 реализаций случайного процесса. Они показывают, что в рассматриваемых условиях (т.е. при введении определенного числа особых точек в пучок) точное число вихрей и их координаты могут быть определены лишь при  $z = 0$ . Здесь отклонение от заданных параметров можно объяснить только ошибками регистрации. В любой другой плоскости количество



а



б

Рис. 2. Траектории оптических вихрей (точки), регистрируемые при распространении пучка в неискажающей среде. Положения дислокаций (каждая точка «+» и «-» на рисунках) определялись через интервалы  $\Delta z = 0,07$  дифракционной длины. Полная длина трассы была равна 0,35 (а) и 0,56 (б), в плоскости апертуры источника вихри были смещены вниз относительно оси абсцисс (а) и находились на оси (б). Топологические заряды равнялись +1 и -1

вихрей и их координаты сложным образом зависят от их начального распределения. Подчеркнем, что указанное свойство значительно затрудняет извлечение полезной информации, передаваемой вихревым излучением на фоне шума, который сформирован случайными особыми точками волнового фронта.

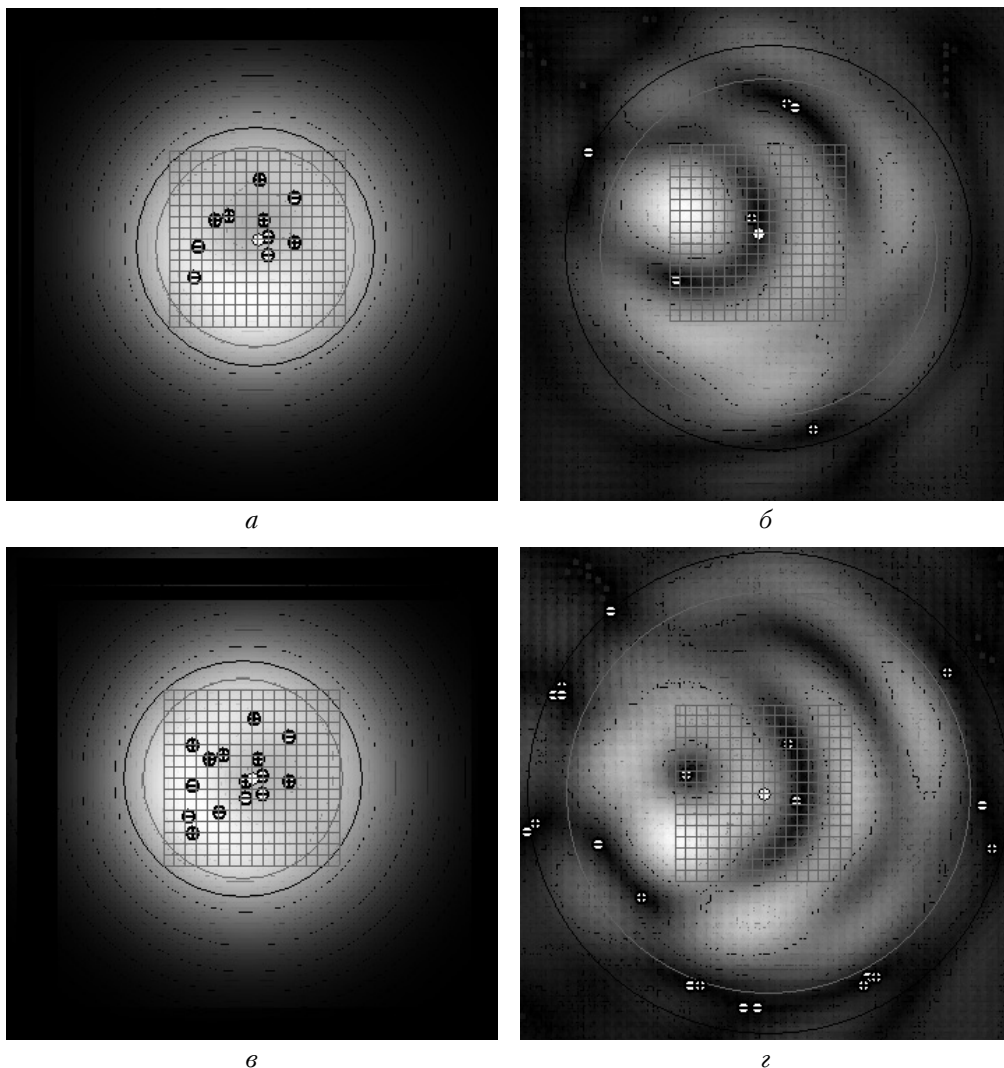


Рис. 3. Изменения амплитудного распределения и числа особых точек в пучках, проходящих одинаковое расстояние в неискажающей среде, в плоскости  $z = 0$  (а, в) и 0,4 (б, г); число особых точек в волновом фронте: 10 (а), 6 (б), 15 (в), 21 (г)

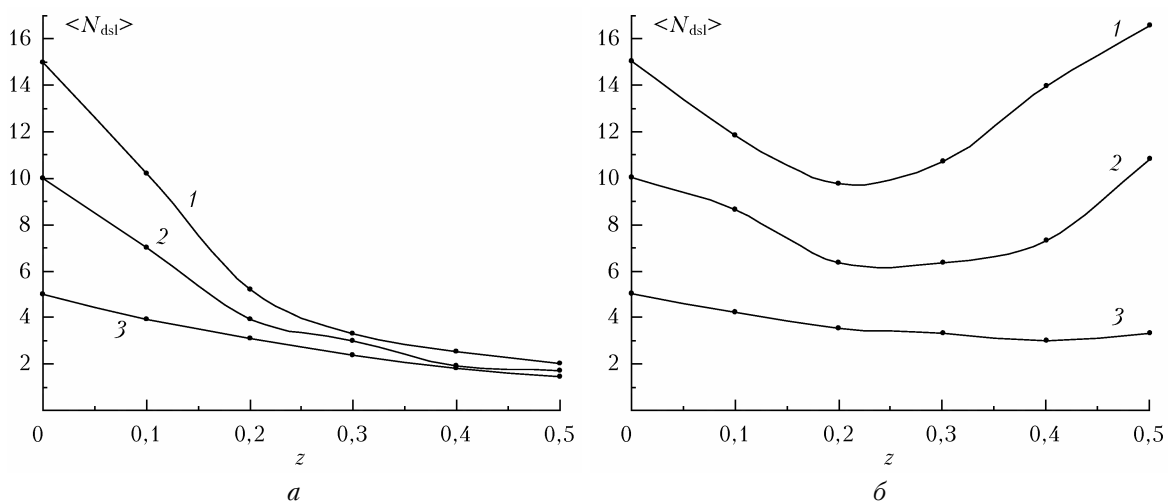


Рис. 4. Изменение среднего числа особых точек при распространении пучка при регистрации вихрей в области диаметром, равным начальному диаметру пучка (а) и энергетическому диаметру, определенному на соответствующем расстоянии (б); в пучок было помещено 15 (1), 10 (2) и 5 (3) особых точек

## 2. Выделение заданного вихря при усреднении распределения особых точек

Первый метод выделения информационного сигнала был основан на процедуре суммирования числа особых точек. Заданный вихрь помещался в центр пучка, а вихри, создающие фон, были расположены случайным образом в пределах энергетического радиуса. От реализации к реализации их координаты изменялись, тогда как положение заданного вихря оставалось постоянным. При выполнении суммирования так же, как и в алгоритме определения дислокаций, вся занимаемая пучком область была разбита на небольшие контуры (показаны на рис. 2 и 3), но размеры полученных ячеек были значительно больше, диаметр каждой из них составлял  $1/8$  энергетического диаметра пучка. Алгоритм выделения информационного сигнала был основан на предположении, что при наличии заданного вихря в результате суммирования в центре распределения будет наблюдаться максимум, отсутствие которого означает, что в системе нет вихря, несущего информацию. Таким образом, особая точка

здесь определялась за счет отличия ее координат от координат дислокаций, формирующих шумовой фон.

Результаты суммирования множества случайных вихрей (суммирование выполнено по 200 реализациям) в ячейках показаны на рис. 5. На рис. 5, б несущий информацию вихрь помещен в центр пучка, на рис. 5, а такой вихрь отсутствует; в обоих случаях плоскость регистрации совпадает с плоскостью апертуры передатчика ( $z = 0$ ).

Так как координаты всех вихрей, кроме центрального, задаются генератором случайных чисел, можно было ожидать, что при  $z = 0$  суммы числа вихрей в каждой из ячеек будут одинаковыми. В действительности мы не наблюдаем равенства сумм на рис. 5, а, и увеличение числа реализаций до 1000 не приводит к существенному изменению распределения. Объяснить отмеченную особенность можно недостаточно равномерным распределением случайных координат. Несмотря на это при введении в центр дополнительного вихря в полученном распределении получается выраженный максимум (рис. 5, б).

При увеличении длины трассы максимум исчезает, распределения особых точек с фиксированным в центре вихрем (рис. 5, з) и без него (рис. 5, в)

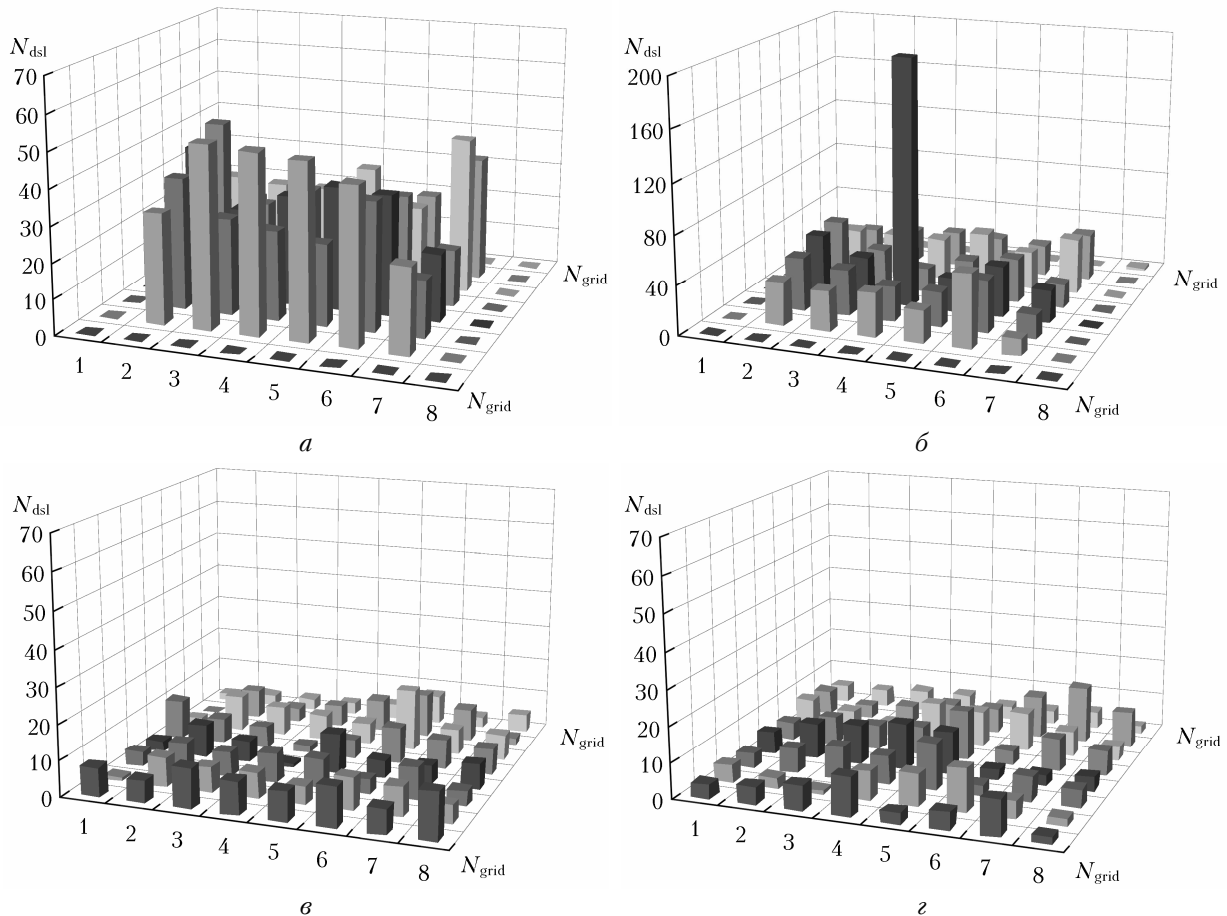


Рис. 5. Сумма особых точек в ячейках, размещенных на энергетическом радиусе пучка. Расчеты выполнены при  $z = 0$  (а, б) и 0,4 (в, з). В плоскости апертуры источника в пучок было помещено 6 (а, в) и 7 (б, з) дислокаций. В первом случае координаты всех вихрей задались генератором случайных чисел, во втором — одна из особых точек всегда находилась в центре пучка

практически перестают различаться. Объяснить такую особенность можно тем, что при распространении пучка вихри смещаются от своих начальных позиций и взаимодействуют между собой. Центральный вихрь может сдвинуться или исчезнуть в результате аннигиляции с дислокацией, имеющей противоположный по знаку топологический заряд.

Приведенные данные показывают неудовлетворительную точность рассмотренного метода. Вторым очевидным недостатком этого подхода в том, что для выполнения суммирования (или усреднения) необходимо продолжительное время, а это означает снижение скорости передачи информации.

### 3. Выделение заданного вихря при обработке распределения особых точек

Выделить заданную особую точку волнового фронта на фоне шума, сформированного случайными вихрями, возможно в случае, если частота характерных изменений фона отличается от частоты информационного сигнала. Например, когда число дислокаций в фоне изменяется так, как это показано на рис. 6 (кривая 1), а заданный вихрь вводится в пучок в интервалах, когда число особых точек не изменялось (рис. 7, а, кривая 1).

На рис. 6 число вихрей  $N_{dsl}$  в плоскости  $z = 0$  (кривая 1) показано в определенные моменты времени  $N_t$ . Хотя это число является случайным, определенным образом задается диапазон его вариаций:  $N_{dsl}$  изменяется от 2 до 9 на рис. 6, а, от 2 до 19 на рис. 6, б, при  $N_t = 1-9; 10-19$  и т.д. число дислокаций не изменяется. Всего приведено 10 таких интервалов (фактически 10 реализаций случайного процесса), их номера указаны в верхней части рис. 6. Также на рисунке показано число дислокаций, регистрируемых в плоскости наблюдений при отсутствии информационного сигнала ( $z = 0,4$ , кривая 2). Здесь снова проявляются три отмеченные выше (разд. 1) особенности: количество особых точек не изменяется при распространении пучка, в этом случае кривые 1 и 2 совпадают (реализации 1, 4, 6, 7 и 10 на рис. 6, а; 6 и 10 на рис. 6, б); количество дислокаций уменьшается, кривая 1 расположена выше, чем 2 (реализации 2, 3, 5, 8, 9 на рис. 6, а и 1, 2, 3, 4, 8 на рис. 6, б); количество дислокаций увеличивается, кривая 1 расположена ниже, чем 2 (реализации 5, 7, 9 на рис. 6, б). Еще раз подчеркнем, что случайный фон в плоскости наблюдения на рис. 6 представлен кривой 2, и на этом уровне мы попытаемся выделить сигнал, несущий информационную нагрузку. Эта операция иллюстрируется данными на рис. 7.

Наиболее простое решение задачи имеет при регистрации вихрей непосредственно в плоскости передающей апертуры (рис. 7, а). Здесь добавление одного вихря означает увеличение на единицу числа вихрей в плоскости наблюдения (вихрь + шум — это кривая 2 на рис. 7). За счет этого информационный сигнал легко может быть выделен (кривая 1

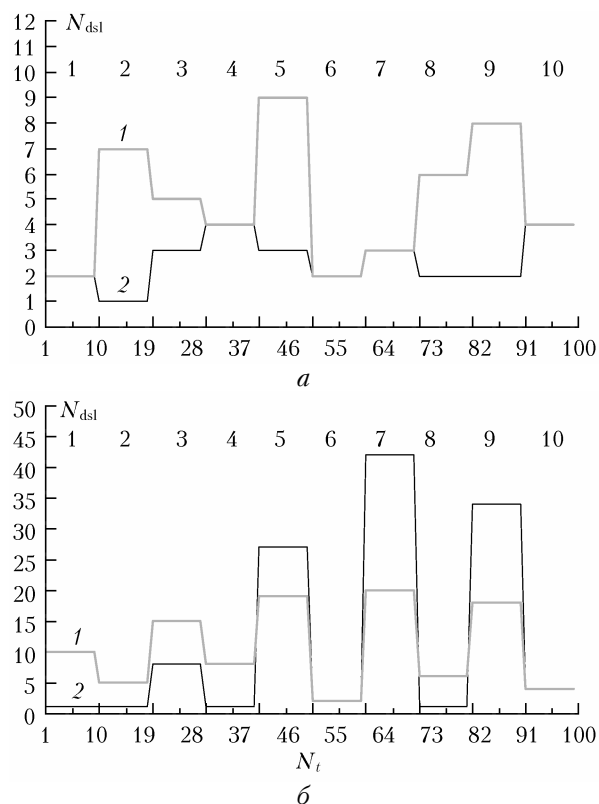


Рис. 6. Случайные вариации числа вихрей в плоскости апертуры источника (кривая 1) и количество особых точек, зарегистрированное в плоскости наблюдения (кривая 2); Число дислокаций при  $z = 0$  изменяется в интервале от 2 до 9 (а) и от 2 до 19 (б)

на рис. 7). Но добавить особую точку нужно в течение времени, когда число дислокаций в фоне неизменно, т.е. частота изменения информационного сигнала должна быть выше частоты изменения фона; кроме того, введение вихря должно быть выполнено в определенные моменты времени.

Число зарегистрированных вихрей изменяется, если пучок проходит некоторое расстояние. Например, на рис. 7, б мы наблюдаем уменьшение числа дислокаций в плоскости наблюдения при наличии информационного сигнала в пучке (реализации 3, 4 и др.), а в некоторых случаях введение дополнительного вихря не приводит к изменению фона (реализации 1 и 2 на рис. 7, в). Несмотря на отмеченные проблемы, появление дополнительного вихря может быть выявлено с использованием следующих правил:

1. В результате введения вихря регистрируемое число дислокаций в пучке увеличилось относительно фона.
2. Число дислокаций уменьшилось относительно фона.
3. Число не изменилось, но изменились координаты в распределении особых точек.

Использование этих правил предполагает, что любые изменения массива регистрируемых особых точек происходят только в результате введения дополнительного вихря. Здесь не учитываются возмущения

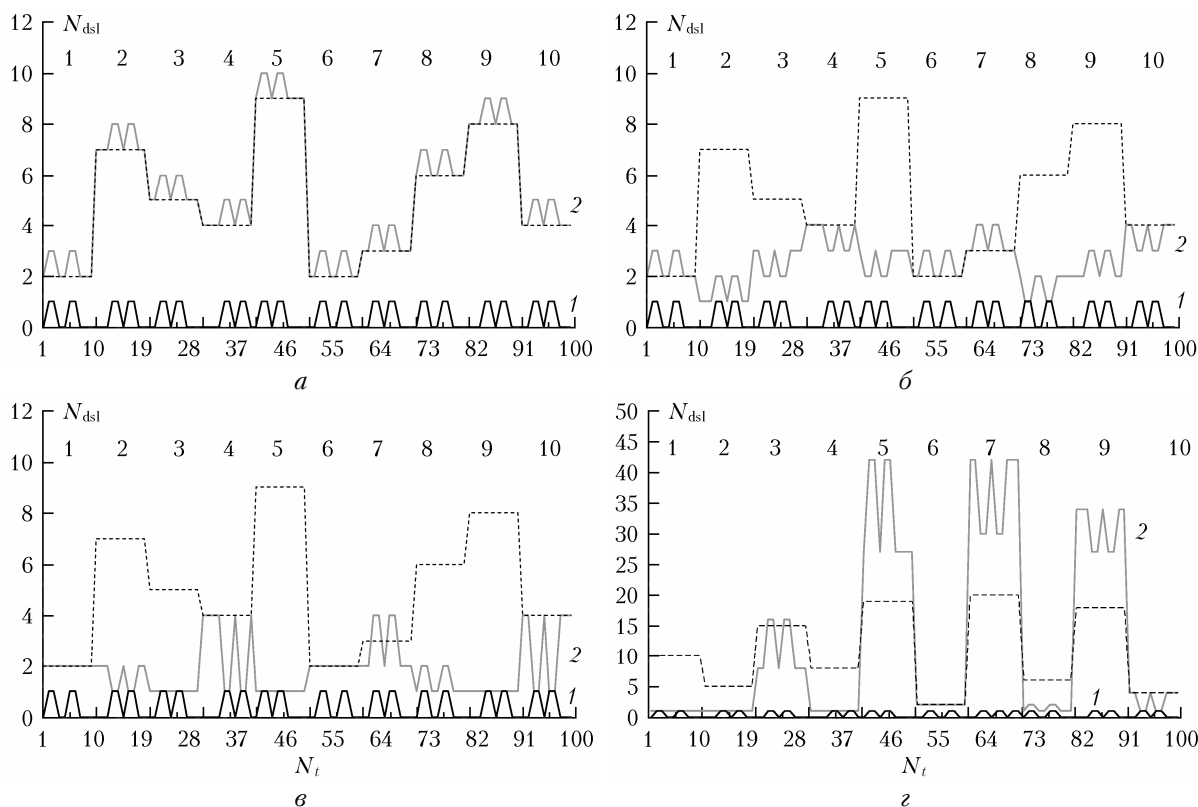


Рис. 7. Точность выделения информационного сигнала на фоне, сформированном случайным массивом дополнительных особых точек: вихри, выделенные в результате применения алгоритма дешифровки (кривая 1); все вихри, зарегистрированные в плоскости наблюдения (кривая 2); штриховая линия показывает число вихрей фона на входе в среду (одинаковое для  $a, б$ , разное для  $в, г$ ). Данные были получены для  $z = 0$  ( $a$ );  $0,2$  ( $б$ );  $0,4$  ( $в, г$ ); сверху указан номер реализации при случайном задании фоновых вихрей

волнового фронта, возникающие при наличии в оптической системе шумов различной природы, и особенности, которые могут появиться в турбулентной атмосфере. Решение этих задач мы рассмотрим в дальнейших публикациях.

Выделенный информационный сигнал на трассах с  $z > 0$  представлен на рис. 7,  $б-г$  кривой 1. Сравнивая эти данные с кривой 1 на рис. 7,  $a$ , где  $z = 0$  и регистрация осуществляется с высокой точностью, видим, что за все время измерений появилась только одна ошибка – это дополнительный вихрь на трассе  $z = 0,4$  при числе дислокаций в фоне, равном 20 (реализация 7, рис. 7,  $г$ ).

Данные численных экспериментов позволяют заключить, что предложенный алгоритм выделения информационного сигнала, передаваемого последовательностью оптических вихрей, обладает высокой точностью. Несмотря на значительные изменения начального распределения особых точек, наблюдаемые при распространении пучка, он может быть использован на трассах разной длины и при различном числе дислокаций, возникающих в результате воздействия на пучок искажающих факторов. Отметим, что эти выводы имеют ограниченное применение. Для определения влияния шума и атмосферных искажений на результаты дешифровки информационного сигнала необходимо провести дополнительные исследования.

#### 4. Пример кодировки и декодировки информационного сигнала при наличии дополнительных вихрей в волновом фронте

Принципиальная возможность выделения заданных вихрей на фоне случайного распределения особых точек в пучке была продемонстрирована в разд. 3. Рассмотрим, как в указанных условиях может быть передана информация, закодированная последовательностью дислокаций. Пример такой кодировки приведен на рис. 8. В верхней части рисунка десятичные цифры представлены в двоичной форме записи, затем каждой единице ставится в соответствие вихрь в волновом фронте, отсутствие вихря означает, что в определенный момент времени передается ноль.

Измерения осуществляются в моменты времени, отмеченные точками на рис. 8. Информация передается за три такта измерений (на одну переданную цифру приходится три точки, это видно на рис. 8). Первый раз регистрируется фон, затем наличие/отсутствие вихря, затем снова фон. Если на первом и третьем тактах получено одинаковое число дислокаций (фон не изменился в течение интервала измерений), на втором такте зарегистрирован сигнал, несущий актуальную информацию. Несовпадение

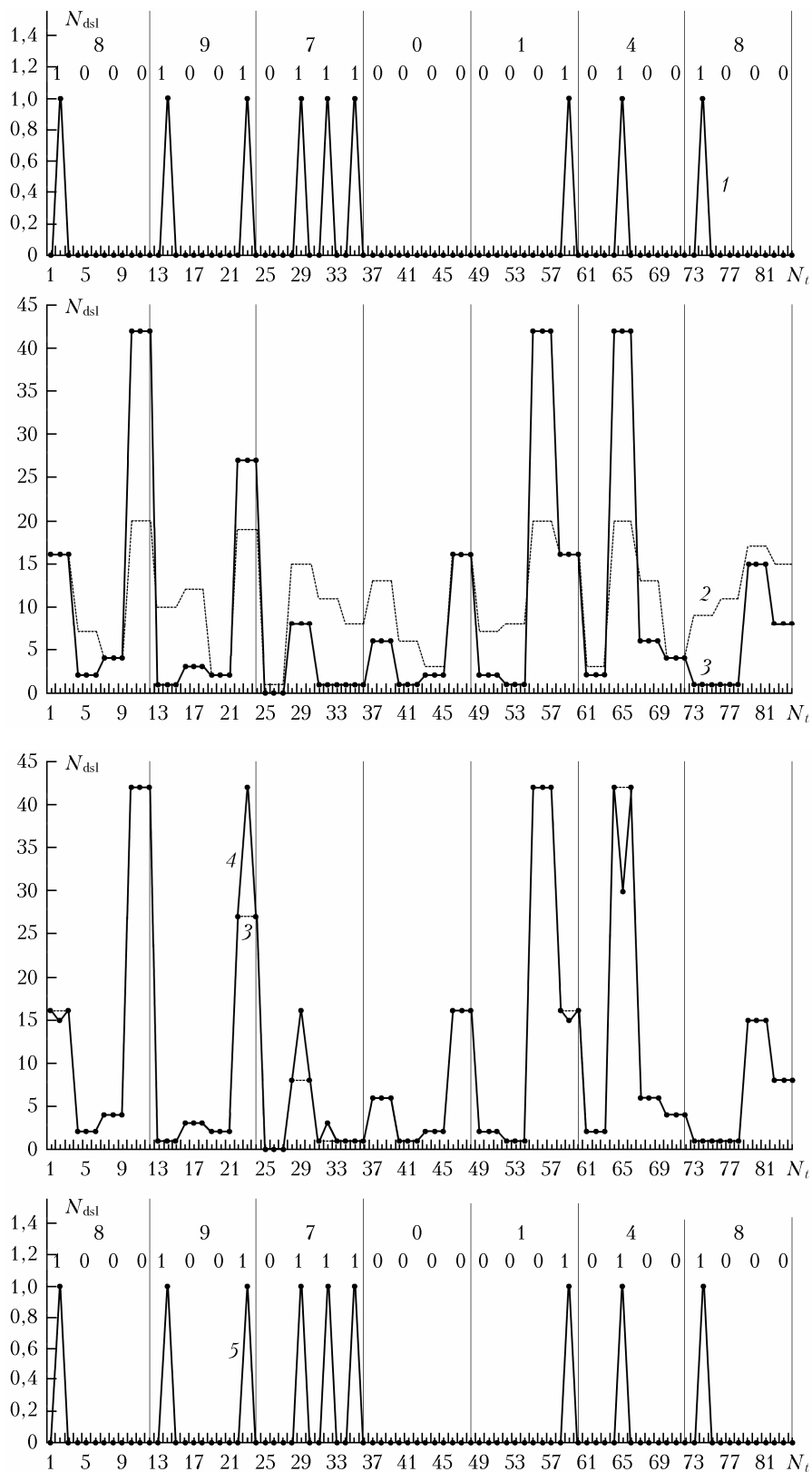


Рис. 8. Кодирование последовательности чисел с использованием оптических вихрей и выделение сигнала, несущего информацию, на уровне фона, сформированного случайным распределением дислокаций: сигнал, заданный вихрями (кривая 1); число вихрей в фоне при  $z = 0$  (кривая 2) и 0,4 (кривая 3); полное число дислокаций (фон + сигнал), зарегистрированное в плоскости  $z = 0,4$  (кривая 4); выделенный информационный сигнал (кривая 5). Точками показаны моменты времени, в которые выполняется регистрация особых точек (всего выполнено 84 акта регистрации)



данных на первом и третьем тактах означает, что измерение сигнала происходит в момент изменения фона, в этом случае информация считается недостоверной и не учитывается при интерпретации результатов. В рассматриваемом примере частота информационного сигнала и время появления вихрей подобраны таким образом, что все измерения являются достоверными. Подчеркнем, что частота изменения фона является достаточно высокой, она только в три раза меньше, чем частота несущего информацию сигнала; можно надеяться, что в реальной атмосфере соотношение частот будет более благоприятным. Количество вихрей в фоновом сигнале варьируется от 2 до 20, в ряде случаев в плоскости наблюдения появляются дополнительные особые точки, которых не было в плоскости апертуры источника (вывод из сравнения кривых 2 и 3 на рис. 8).

Несмотря на сложную форму кривой, полученную при регистрации фонового и информационного сигналов (кривая 4 на рис. 8), в результате применения алгоритма декодировки абсолютно точно удается выделить несущую информацию – последовательность вихрей – и преобразовать эту последовательность в двоичное, а затем и в десятичное число. Указанный пример демонстрирует возможность применения предложенного метода для передачи информации в искажающей среде.

### Заключение

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы:

1. При распространении вихревого излучения в неискажающей среде особые точки волнового фронта смещаются относительно своих начальных положений и взаимодействуют между собой. В результате их число в волновом фронте может уменьшиться, увеличиться или остаться без изменения. Точное прогнозирование изменения количества дислокаций в пучке на данном этапе проведения исследований невозможно.

2. Отмеченные в п. 1 особенности поведения особых точек позволяют выполнить регистрацию в пучке заданного вихря на фоне случайных дислокаций с использованием операции усреднения только на коротких трассах распространения.

3. Предложенный в статье метод дает возможность выделить заданный вихрь на достаточно длинных трассах (проверка применения метода выполнена при  $z = 0,4$ ) при изменении числа дислокаций в фоне от 1 до 20. Приведенный пример демонстрирует возможность передачи информации в указанных условиях с использованием особых точек волнового фронта.

Основная часть приводимых в статье данных была получена в рамках государственного задания ИОА СО РАН. Моделирование алгоритмов и выполнение численных исследований, результаты которых приводятся в разд. 3 и 4, было проведено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-69-46064).

1. Аксенов В.П., Дудоров В.В., Колосов В.В., Погуца Ч.Е., Абрамова Е.С. Регистрация орбитального углового момента лазерного пучка через его разложение по оптическим вихрям и его использование в системе связи в турбулентной атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 5. С. 347–357. DOI: 10.15372/AOO20200504.
2. Aksenov V.P., Kanev F.Yu., Izmailov I.V., Poizner B.N. Optical vortex detector as a basis for a data transfer system: Operational principle, model, and simulation of the influence of turbulence and noise // Opt. Commun. 2012. V. 286, N 6. P. 905–928.
3. 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. Photon. 2015. V. 7. P. 66–106. DOI: 10.1364/AOP.7.000066661943-8206/15/010066-41\$15/0\$15.00.
4. Chan Vincent W.S. Free-space optical communications // J. Lightwave Technol. 2006. V. 24, N 12. P. 4750–4761.
5. Robinson B.S., Boroson D.M., Burianek D.A., Murphy D.V. Overview of the lunar laser communications demonstration // Proc. SPIE. 2011. V. 7923. P. 792302-1–792302-4. DOI: 10.1117/12.878313.
6. Gibson G., Courtial J., Padgett M.J., Vasnetsov M., Pas'ko V., Barnett S.M., Franke-Arnold S. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum // Opt. Express. 2004. V. 12, N 22. P. 5448–5455.
7. Shapiro J.H., Puryear A.L. Reciprocity-enhanced optical communication through atmospheric turbulence – Part I: Reciprocity proofs and far-field power transfer optimization // J. Opt. Commun. Network. 2012. V. 4, N 12. P. 947–954.
8. Shapiro J.H., Puryear A.L., Parenti R.R. Reciprocity-enhanced optical communication through atmospheric turbulence – Part II: Communication architectures and performance // J. Opt. Commun. Network. 2013. V. 5, N 8. P. 888–900.
9. Bozinovic N., Yang Yue, Yongxiong Ren, Tur M., Kristensen P., Hao Huang, Willner A.E., Ramachandran S. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers // Science. 2013. V. 340. P. 1545–1548.
10. Аксенов В.П., Дудоров В.В., Колосов В.В., Погуца Ч.Е., Левицкий М.Е. Анализ корреляции интенсивности в приеме-передающих лазерных системах для формирования криптографического ключа // Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 8. С. 591–597; Aksenov V.P., Dudorov V.V., Kolosov V.V., Pogutsa Ch.E., Levitskii M.E. The analysis of intensity correlation in laser transeiving systems for formation of a cryptographic key // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 6. P. 571–577.
11. Jingzhi Wu, Hui Li, Yangjun Li. Encoding information as orbital angular momentum states of light for wireless optical communications // Opt. Eng. 2007. V. 46, N 1. P. 019701-1–019701-5.
12. Chunyi Chen, Huamin Yang, Shoufeng Tong, Yan Lou. Changes in orbital-angular-momentum modes of a propagated vortex Gaussian beam through weak-to-strong atmospheric turbulence // Opt. Express. 2016. V. 24, N 7. P. 6959–6975.
13. Канев Ф.Ю., Аксенов В.П., Веретехин И.Д. Анализ точности алгоритмов регистрации оптических вихрей // Оптика атмосфер. и океана. 2021. Т. 34, № 1. С. 5–16.
14. Indebetouw G. Optical vortices and their propagation // J. Mod. Opt. 1993. V. 40, N 1. P. 73–87.

15. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 212 с.
16. *Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А.* Дискретное преобразование Фурье. М.: Изд-во физического факультета МГУ, 2019. 88 с.
17. *Chen M., Roux F.S., Olivier J.C.* Detection of phase singularities with a Shack–Hartmann wavefront sensor // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2007. V. 24, N 7. P. 1994–2002.
18. *Канев Ф.Ю., Аксенов В.П., Веретехин И.Д.* Регистрация оптических вихрей датчиком Шека–Гартмана // *Вестн. РФФИ.* 2018. № 4. С. 8–10.
19. *Канев Ф.Ю., Лукин В.П.* Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. 250 с.

***F.Yu. Kanev, N.A. Makenova, I.D. Veretekhin. Assessment of the possibility to transfer information by vortex radiation in the presence of noise formed by randomly located dislocations.***

A technique is developed for extracting an information carrying signal from a beam with optical vortices in the wavefront due to distortions. Specific feature of this communication system is that information is also transferred by an optical vortex. The analysis has been carried out with the use of numerical simulation techniques. In the model developed, all singular points were introduced into the wavefront in the plane of the source emitting aperture, after which the radiation propagates under diffraction-free conditions. This schematic of numerical experiment roughly corresponds to an optical communication line, where a beam passes through a thin medium layer near the laser source, and beam distortions are so strong in this layer that additional vortices appear in the wavefront. Two techniques for extracting an information carrying signal from the distorted beam are considered. A possibility of solving the problem stated with the use of the technique developed is shown.