

A. A. Galushkin, S. L. Gonobobleva
SPbF ARAN

A. A. Zhuravlev, V. A. Parfenov, Yu. V. Filatov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

THE USE OF 3D-SCANNING AND ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR DOCUMENTATION AND CREATING PHYSICAL COPIES OF PRINTS FROM THE COLLECTION OF SPBF ARAN

The paper describes the creation of a 3D archive and physical copies of prints. A way of restoring prints is proposed, based on creation of a special matrix that is obtained by a combined use of 3D scanning technology and additive technologies. Print sampling was performed using an optical 3D-scanner operating on the basis of structured light. The technique of computer processing, necessary for loading the 3D model, obtained as a result of 3D-scanning, into the 3D-printer microprocessor is discussed in detail. The creation of a print replica and a restoration matrix was performed by using the laser 3D printers employing the technology of laser stereolithography. The print reproducing accuracy was estimated by comparing its 3D model with 3D model of the replica. The experiments proved the basic capability of creating 3D archives and prints reproducing.

3D archive, print reproducing, 3D-scanning, additive technology

УДК 3937.525

В. Ю. Венедиктов, К. Н. Гаврильева, А. В. Горелая, А. А. Севрюгин, Е. В. Шубенкова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Д. И. Дмитриев, А. Д. Цветков
Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения

Исследование распространения оптического вихря по укрытой атмосферной трассе

Рассмотрена динамика распространения оптического вихря через искусственную укрытую атмосферную трассу. Продемонстрирован метод генерации оптических пучков с ненулевым орбитальным моментом с помощью жидко-кристаллического модулятора света HoloEye LC-2002, проведены испытания различных методов регистрации оптических вихрей, в том числе с помощью интерферометров сдвига различных конфигураций и датчика волнового фронта Шака-Гартмана. Определено расстояние, при котором происходит распад структуры вихревого пучка для технически возможной в условиях стенда апертуры принимающей интерференционной системы. Представлены результаты экспериментальных исследований размеров пучков на различных дистанциях. Проведены расчеты угла расходимости пучка и сингулярности оптического вихря в зависимости от длины атмосферной трассы. Рассмотрено влияние турбулентной среды на способность принимающей системы зарегистрировать оптический вихрь.

Оптический вихрь, атмосферная трасса, угол расходимости, топологический заряд, турбулентность, сингулярность

В настоящее время установлено, что вихревые, а также близкие к ним по форме винтовые или спиралевидные структурные элементы проявляются не только на молекулярном уровне, но и в глобальных процессах, которые происходят как в атмосфере, так и в океане и космосе. В последние годы внимание исследователей привлекают

световые поля с винтовыми возмущениями волнового фронта. Возмущения такого рода обуславливают вихревой характер распространения света, а следовательно, позволяют говорить о существовании оптических вихрей.

В силу важных аспектов фундаментального и прикладного характера изучение оптических вих-

рей ведется не только в нашей стране, но и за рубежом. На данный момент в оптике образовалась новая область, называемая оптикой винтовых полей или сингулярной оптикой. В рамках данной области рассматриваются не только свойства оптических вихрей, но и физический механизм их образования.

Наиболее часто винтовые структуры в лазерных пучках наблюдаются при распространении лазерного излучения через среду со случайными неоднородностями показателя преломления. Возникновение таких оптических неоднородностей связано с развитием турбулентности, происходящим из-за градиентов температур и потоков воздуха. [1].

Для исследования поведения оптического вихря в условиях турбулентности в исследованиях использовалась искусственная атмосферная трасса (ИАТ), позволяющая проводить испытания с высокой повторяемостью параметров и условий воздушного атмосферного пути. ИАТ – это уникальный стенд, на котором можно проводить исследования не только оптических адаптивных систем, различных оптико-электронных систем, корректоров, но и исследовать поведение различных типов пучков на больших расстояниях при слабом естественном уровне турбулентности атмосферы. Искусственная атмосферная трасса была построена в Научно-исследовательском институте оптико-электронного приборостроения г. Солиный Бор, Лен. обл. Стенд разработан для исследования распространения излучения нелинейных оптических явлений, мощного лазерного излучения.

Экспериментальная установка. Искусственная атмосферная трасса представлена на рис. 1. Она сформирована из 16 зеркал дифракционного качества с коэффициентом отражения 98 % на длинах волн 1.06 и 0.53 мкм, апертура каждого зеркала составляет 500 мм. Зеркала расположены таким образом, что составляют два ряда, расстояние между которыми 40 м. ИАТ позволяет варьировать оптический путь пучка в зависимости от количества зеркал, задействованных в схеме. Для обеспечения стабильности и повторяемости атмосферных условий ИАТ была размещена внутри здания. Также по всему ее периметру были установлены нагреватели, обеспечившие создание различных условий для экспериментов, поддержание стабильного уровня турбулентности [2].

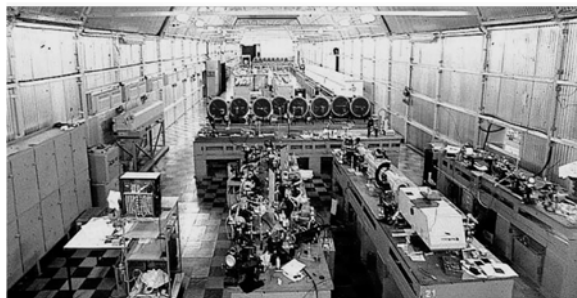


Рис. 1

Оптический вихрь – это результат наложения двух или большего числа световых монохроматических пучков, которое в нашем эксперименте формируется посредством модулятора. Модулятор фирмы HoloEye LC-2002 позволяет применять различные варианты генерируемых компьютерных голограмм (рис. 2), формируя в первом дифракционном порядке распределение интенсивности, характерное для оптического вихря.

Для исследования распространения оптического вихря по укрытой атмосферной трассе была использована схема, представленная на рис. 3. На рис. 2, *a–e*, представлены интерферограммы, генерируемые компьютером с различным топологическим зарядом оптического вихря, где m равно: *a* – 1, *b* – 2, *в* – 3, *г* – 4, *д* – 5, *e* – 6; картина интенсивности оптического вихря с m , равным: *ж* – –1, *з* – 0, *и* – 1. В целях удобства распознавания структуры вихря на выходе системы используются интерференционные картины с четными топологическими зарядами m , соответствующие рис. 2, *б, г*.

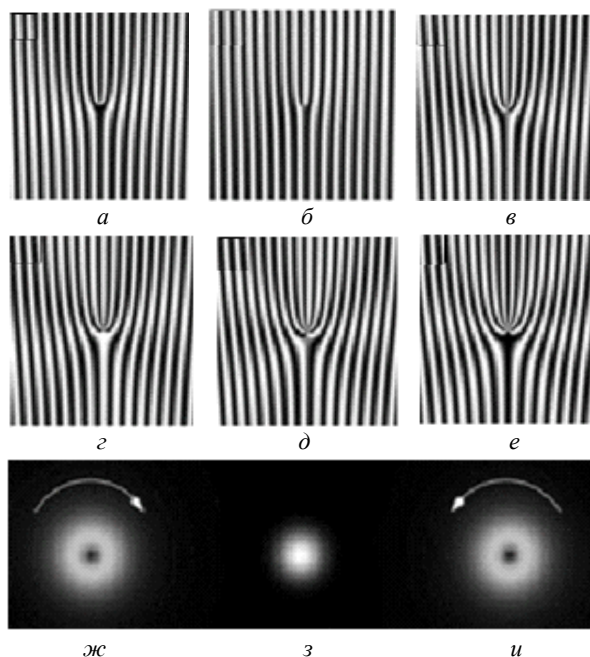


Рис. 2

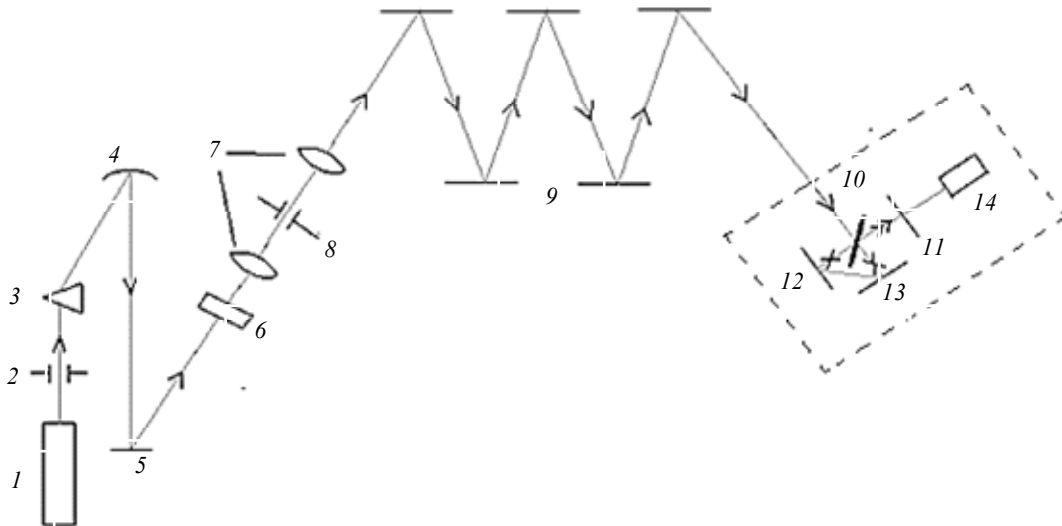


Рис. 3

Источником излучения служит неодимовый лазер 1, генерирующий излучение с длиной волны 0.53 мкм. Схема формирования плоской волны состоит из диафрагмы 2, клина 3, сферического зеркала 4 и плоского зеркала 5, с помощью которого луч запускается на трассу. Далее луч проходит через пространственный модулятор света 6, в котором модулируется оптический вихрь 2-го порядка, расширяется с помощью коллимирующей системы 7, состоящей из двух линз с фокусным расстоянием 500. Диафрагма 8 выделяет первый дифракционный порядок, и далее пучок, несущий информацию об оптическом вихре, поступает на трассу 9, состоящую в общем случае из 16 зеркал с диаметром 500 мм. Приемный интерферометр выделен штриховой линией и состоит из светоделительной пластины 10, двух плоских зеркал 12 и 13. За экраном 11 установлена цифровая камера 14 для регистрации интерференционной картины.

Возможность наблюдения и регистрации «вortexа» зависит от принимающей системы (на рис. 3 выделена штрихами). Регистрация оптического вихря возможна интерферометрическими методами и с помощью датчика Шака–Гартмана, представленного на рис. 4, где 1 – волновой фронт; 2 – массив элементарных линз; 3 – приемник; 4 – фокальные пятна. Принцип работы датчика Шака–Гартмана состоит в том, что излучение проходит через линзовый растр – матрицу микролинз – и попадает на фотоприемник. Линзовый растр состоит из одинаковых линз, которые называют субапертурой. Они разбивают падающий волновой фронт на малые потоки и фокусируют их на ПЗС-матрице.

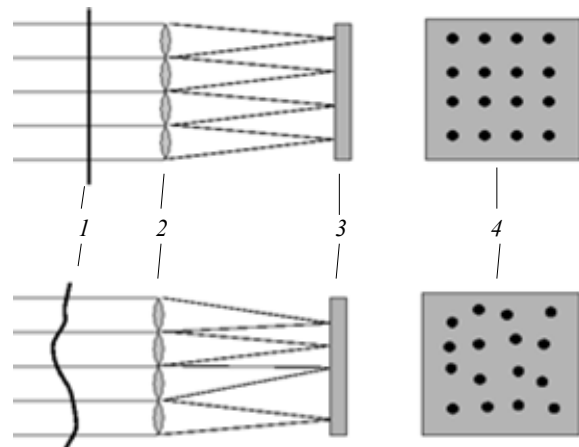


Рис. 4

Когда проходящий волновой фронт плоский, все сфокусированные изображения расположены в правильной сетке, обусловленной расположением линз. Если же падающая волна имеет какие-либо локальные наклоны, то изображения смещаются со своих номинальных значений. При регистрации оптического вихря датчиком Шака–Гартмана изображения фокальных пятен в каждый момент времени смещаются вокруг центра зоны нулевой интенсивности (рис. 5) в направлении, определенном знаком топологического заряда. На рисунке приведен пример поля, полученного с помощью датчика Шака–Гартмана, где черный цвет изображения отображает зону нулевой интенсивности поля, а контур смещения точек указывает на наличие вихря [3].

Были рассмотрены 2 схемы: треугольный интерферометр и интерферометр Саньяка. Интерферометр Саньяка (рис. 6) – однопроходной интерферометр, в котором лучи распространяются по одному и тому же оптическому пути в противоположных направлениях. Данный интерферометр обладает высокой стабильностью.

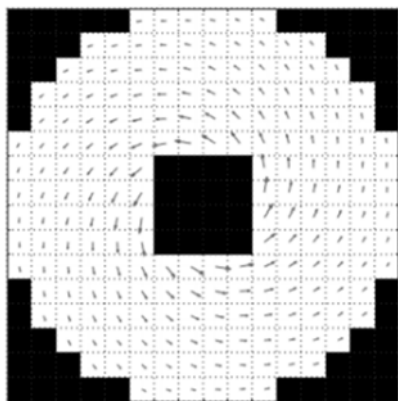


Рис. 5

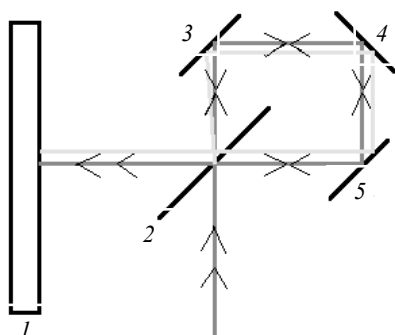


Рис. 6

В интерферометре Саньяка свет разделяется полупрозрачной пластиной 2 на два луча, распространяющихся по кругу и сводимых зеркалами 3, 4 и 5 обратно на делитель, а затем на экран 1. Благодаря симметрии схемы вне зависимости от положения зеркал между лучами сохраняется постоянная разность хода. Схема интерферометра Саньяка оказалась менее удачной в связи со сложной настройкой и малой длиной когерентности лазера [4].

Принцип работы треугольного интерферометра заключен в следующем. Луч от источника света пространственно разделяется на два с помощью светоделительной пластины. Пучки проходят различные оптические пути и перед попаданием на детектор сводятся вместе. Разность расстояний, пройденных каждым лучом, создает разность фаз между ними. Именно введенная разность фаз создает между первоначально идентичными волнами интерференционный узор, который определяется на детекторе. Треугольный интерферометр представлен на рис. 3 светоделительной пластиной и двумя плоскими зеркалами.

Результаты эксперимента. Измерение расходимости пучка проводилось в два этапа: в зависимости от длины трассы на характерных длинах 80, 160, 240 м и вдоль всего пути распространения. В первом, предварительном эксперименте

при длине трассы 240 м измерялись размер пучка и диаметр сингулярности оптического вихря каждые 80 м для оценки технических возможностей принимающей системы. Во втором измерялись размер пучка и диаметр сингулярности каждые 10 м. В табл. 1 представлены результаты предварительного эксперимента по измерению размера пучка и диаметра сингулярности в зависимости от длины атмосферной трассы, снятые через каждые 80 м. При длине трассы 240 м интерференционная картина, искаженная влиянием турбулентности на ИАТ, на выходе системы не позволяет зарегистрировать характерное для оптического вихря распределение интенсивности, т. е. «вилку».

Таблица 1

Расстояние, м	Размер пучка, см	Диаметр сингулярности, см
0	2.9	0.1
80	5.5	1.1
160	9.3	2.1
240	13.0	4.0

Расходимость пучка и сингулярности оптического вихря находились по формуле

$$\theta = 2 \arctg \frac{D - d}{2L},$$

где D – диаметр пучка на экране; d – диаметр пучка на выходе из лазера; L – расстояние. Среднее значение расходимости пучка составило $79''$, а сингулярности – $28''$.

На втором этапе определение расходимости пучка производилось вдоль длины укрытой ИАТ, длина которой составила 160 м. Измерения снимались каждые 10 м (табл. 2). Средний угол расходимости пучка составил порядка $85''$, а среднее значение угла расходимости сингулярности вихря – $35''$.

Таблица 2

Расстояние, м	Размер пучка, см	Диаметр сингулярности, см
10	3.3	0.3
20	3.3	0.3
30	3.4	0.5
40	3.4	0.6
50	3.7	0.6
60	4.4	0.9
70	5.1	1.1
80	5.4	1.3
90	6.0	1.5
100	8.0	1.8
110	10.7	2.6
120	11.0	2.7
130	11.2	3.0
140	11.5	3.1
150	11.6	3.2
160	12.2	3.5

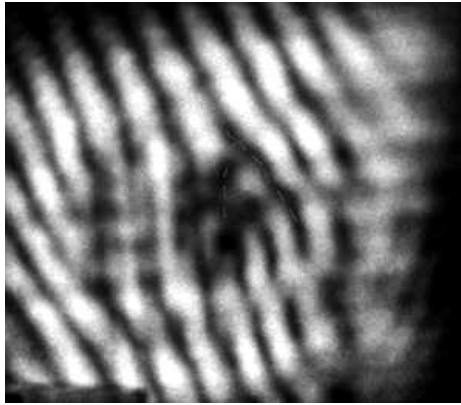


Рис. 7

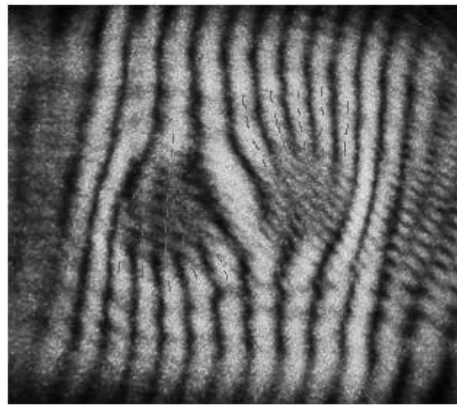


Рис. 10

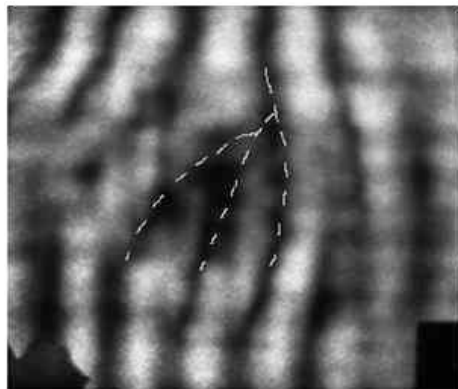


Рис. 8



Рис. 11

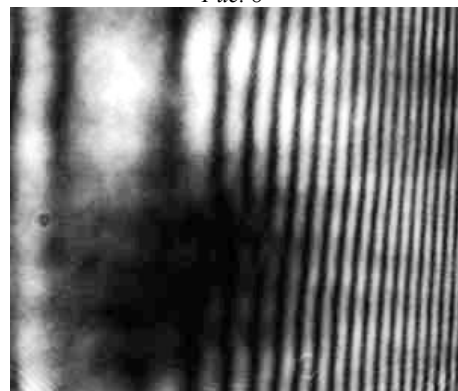


Рис. 9

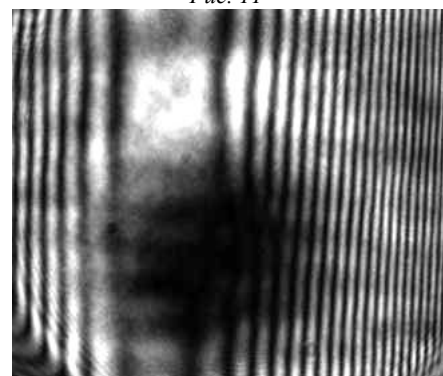


Рис. 12

Сформированный телескопической системой с линзами (рис. 3, 7 ($F_1 = F_2 = 50$ см)) на входе в трассу оптический пучок на выходе из системы увеличился в 4.2 раза. Это накладывает дополнительное ограничение на возможность диагностики структуры вихря на больших расстояниях за счет конечной апертуры зеркал ИАТ и ограниченных размеров элементов принимающей интерференционной системы.

На рис. 7–12 показаны примеры интерферограмм на выходе оптической системы на характерных длинах трассы при запуске «вортекса» с топологическим зарядом, равным 2 и 4, с длинами трассы 80, 160 и 240 м соответственно.

Эксперимент показал удобство наблюдения интерференционной картины пучка с оптическим вихрем заряда, равным 2, перед пучком со структурой топологического заряда, равным 4. Рис. 9 и 12 показывают, что при длине трассы 240 м на интерферограмме структуры вихря не наблюдается.

На рис. 7–12 видно, что характерное распределение интенсивности («вилка») формируется вблизи

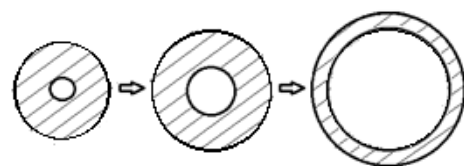


Рис. 13

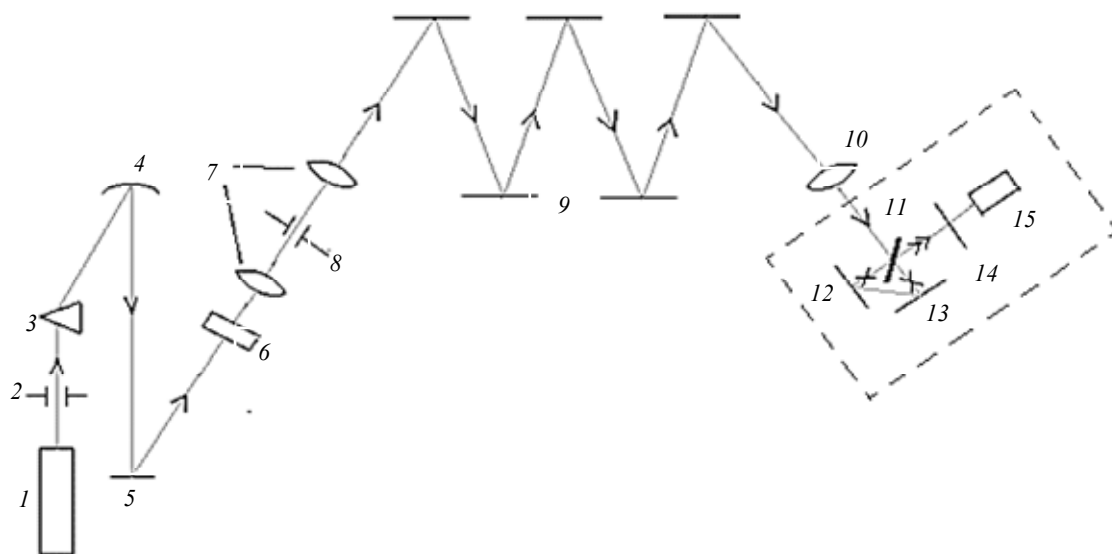


Рис. 14

области сингулярности. С увеличением пучка площадь, занимаемая областью сингулярности пучка, также растет (рис. 13), ограничивая размер площадки для диагностики «вилки», затем за счет дифракционных эффектов на краях зеркал пучок полностью расходится, образуя «бублик», где распознавание структуры интерференционной картины невозможно.

Задачей следующей части эксперимента (рис. 14) было установить, как влияет размер площади пучка на выходе системы на способность регистрации вихря. В качестве коллимирующей системы использовались линзы с фокусным расстоянием $F_1 = 50$ и $F_2 = 100$ см, а также масштабирующая линза $F_3 = 8$ м, «поджимающая» выходной пучок с трассы 80 м. На рис. 15 отмечена сингулярность пучка – 1, сформированная в сходящемся пучке линзы F_2 , и 2 – в параллельном.

Схема эксперимента содержит в качестве источника излучения неодимовый лазер, генерирующий излучение с длиной волны 0,3 мкм. Схема излучения состоит из неодимового лазера 1, диафрагмы 2, клина 3, сферического зеркала 4 и плоского зеркала 5, с помощью которого луч запускается на трассу. Далее луч проходит через пространственный модулятор света 6, в котором модулируется оптический вихрь 2-го порядка, расширяется с помощью коллимирующей системы 7, состоящей из двух линз с фокусным расстоянием $F_1 = 50$ и $F_2 = 100$ см. Диафрагма 8 выделяет первый дифракционный порядок и далее

пучок, несущий информацию об оптическом вихре, поступает на трассу 9, состоящую из 15 зеркал с диаметром 500 мм. Перед приемным интерферометром установлена линза 10 с фокусным расстоянием 8 м. Приемный интерферометр также выделен штриховой линией и состоит из светоделительной пластины 11, двух плоских зеркал 12 и 13. За экраном 14 установлена цифровая камера 15 для регистрации интерференционной картины.

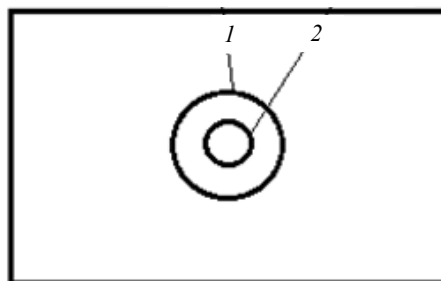


Рис. 15

Вертикальные размеры общей принимающей площадки 27 мм, диаметр зоны 1 при формировании входного излучения в сходящемся пучке составляет 10 мм, диаметр зоны 2 при формировании параллельного пучка составляет 5 мм, оптический путь равен 80 м. При увеличении пучка на выходе коллимирующей системы больше пространства для наблюдения вихря, он медленнее расходится в «бублик» [5].

На рис. 6 интерференционная картина оптического вихря с $m = 2$, где длина трассы: $a - 80$ м; $b - 160$ м; $c - 240$ м; $d - 320$ м. На рис. 7 представлена интерференционная картина оптического вихря с $m = 2$, где длина трассы: $a - 400$ м; $b - 480$ м.

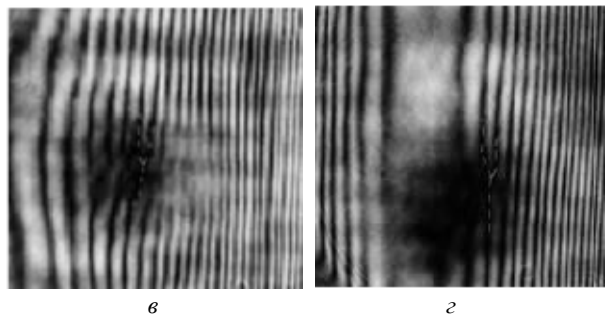
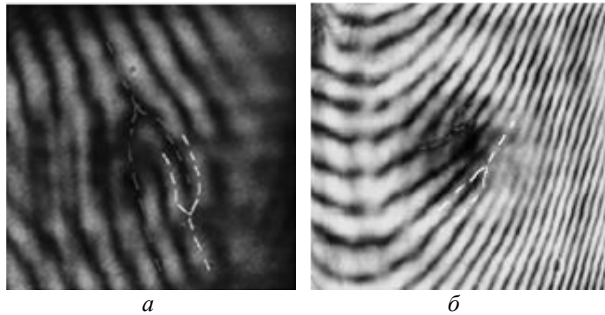


Рис. 16

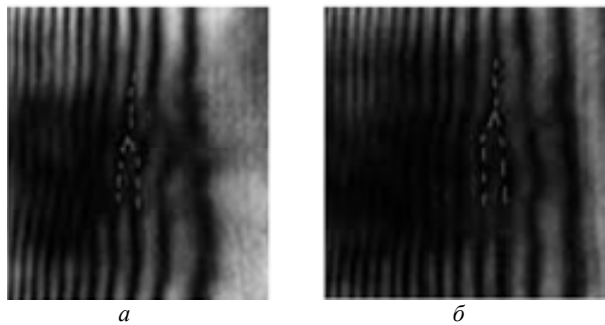


Рис. 17

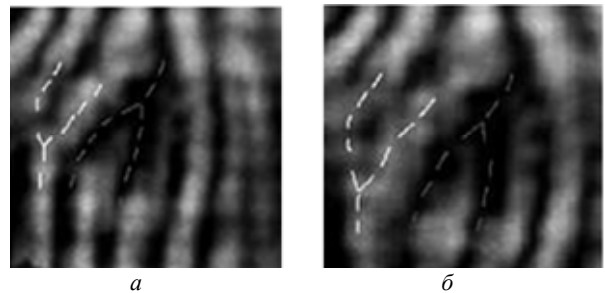


Рис. 18

На рис. 18, *a*, *б* представлены интерференционные картины оптических вихрей, зарегистрированные при слабой (*a*) и сильной (*б*) турбулентности на ИАТ. Изменение условий турбулентности в данном случае достигалось открытием дверей в помещении, где находилась ИАТ. Воздушные потоки, вносимые извне, не позволяли зарегистрировать четкую картину оптического вихря (рис. 18, *б*).

Второй этап исследования оптического вихря заключается в измерении расходимости пучка, а также самой точки сингулярности.

Далее проводились измерения расходимости пучка при длине трассы 440 м через каждые 40 м. На пространственный модулятор света подавались оптические вихри с топологическими зарядами m , равными 2, 4, 6, 8, 10 и 12. Результаты приведены в табл. 3.

По данным таблицы можно сделать вывод, что диаметр сингулярности растет с увеличением расстояния измерения. Чем длиннее ИАТ, тем больше становится сингулярность.

Были представлены экспериментальные результаты исследования распространения оптического вихря на различных длинах укрытой искусственной атмосферной трассы и получены интерференционные картины оптических вихрей с топологическим зарядом $m = 2$ и $m = 4$ на дистанциях 80, 160, 240, 320, 400 и 480 м.

Для увеличения длины трассы, на которой можно зафиксировать структуру «вортекса», были использованы схемы с различными коллимирующими системами (1:1) и (2:1). В результате испытаний в стабильных условиях трассы и при заданном техническом оснащении схема с коллимирующей системой, состоящей из двух линз с фокусным расстоянием $F_1 = 50$ и $F_2 = 100$ см,

Таблица 3

Длина трассы, м	Диаметр сингулярности (m), см					
	2	4	6	8	10	12
40	0.6	1.3	1.2	2.0	2.0	2.0
80	1.0	1.7	2.0	2.0	2.5	3.0
120	1.5	2.2	2.3	3.5	3.5	3.8
160	1.7	2.6	2.5	3.5	4.0	4.0
200	1.7	2.8	3.4	4.0	4.0	5.3
240	2.0	3.5	3.7	4.2	5.2	5.5
280	2.5	3.5	4.0	5.5	6.5	6.5
320	2.6	4.0	5.0	6.0	7.0	7.0
360	3.0	4.2	6.5	6.5	7.0	7.0
400	3.0	4.5	6.5	7.0	7.2	7.5
440	3.5	6.2	6.5	7.0	7.5	8.0
Среднее значение угла	18"	30"	34"	40"	45"	50"

позволила наблюдать характерное распределение интенсивности оптического вихря на расстояниях не менее 480 м.

На примере интерференционных картин оптических вихрей с топологическим зарядом $m = 2$ при открытой и закрытой двери ангара, в котором установлена ИАТ, было показано влияние потоков воздуха на четкость интерференционных полос и регистрацию оптического вихря.

Исследование угла расходимости пучка и области сингулярности проводилось экспериментально на основании измерения их диаметра каждые 80 и 10 м вдоль атмосферной трассы длиной до 240 и 160 м соответственно. Рассчитаны средние значения углов расходимости самого пучка и его сингулярности для двух вариантов измерений. Промоделирован не только второй порядок, но и 4-й, 6-й, 8-й, 10-й и 12-й. Из представленных результатов видно, что диаметр сингулярности растет пропорционально длине атмосферной трассы.

Возможности наблюдения оптического вихря зависят не только от длины атмосферной трассы и от уровня турбулентности соответственно, но и от принимающей системы. В данной работе ис-

пользовался треугольный интерферометр, позволяющий регистрировать оптические вихри на основании изображений интерферограмм, при этом было отмечено удобство настройки схемы и использования оптических вихрей с четными топологическими зарядами. Также в качестве приемника может служить датчик волнового фронта Шака–Гартмана. В дальнейшем планируется исследование распространения оптического вихря по укрытой ИАТ с применением датчика Шака–Гартмана.

Искусственная атмосферная трасса – это уникальный полигон для тестирования различных оптических систем, в том числе и систем, основанных на излучении с ненулевым топологическим зарядом, за счет высокой повторяемости условий и параметров воздушного атмосферного пути. Однако несмотря на успехи в моделировании процесса распространения оптического вихря на расстоянии до 480 м схема исследований требует доработки, а площадка испытаний – технического оснащения для обеспечения полноты исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Короленко П. В. Оптические вихри // Соросовский общеопр. журн. 1998. № 6. С. 94–99.
2. Исследование распространения и адаптивно-оптической коррекции лазерного пучка на изолированной от внешнего воздействия атмосферной трассе / В. Ю. Венедиктов, Д. В. Венедиктов, А. В. Горелая, А. Д. Дмитриева и др. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 11. С. 942–944.
3. Макаров В. А. Формирование заданных волновых фронтов с помощью гибкого зеркала: вып. квалиф. работа магистра / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2017. 81 с. URL: <http://library.eltech.ru/files/vkr/2017/magistri/>

- 1585/2017%D0%92%D0%9A%D0%A0158525%D0%9C%D0%90%D0%9A%D0%90%D0%A0%D0%9E%D0%92.pdf (дата обращения 25.05.2018).

4. Малькин Г. Б. Эффект Саньяка. Корректные и некорректные объяснения / Успехи физ. наук. 2000. № 12. С. 1325–1327.

5. Формирование оптических вихрей в процессе дифракции света на диэлектрическом клине / В. Г. Шведов, Я. В. Издебская, А. Н. Алексеев, А. В. Воляр // Письма в ЖТФ. 2002. № 6. С. 87–88.

V. Y. Venediktov, K. N. Gavrilova, A. V. Gorelaya, A. A. Sevrugin, E. V. Shubenkova
Saint Petersburg Electrotechnical university «LETI»

D. I. Dmitriev, A. D. Tsvetkov
Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering «NII OEP»

STUDY OF THE PROPAGATION OF AN OPTICAL VORTEX ALONG A SHELTERED ATMOSPHERIC PATH

The dynamics of propagation of an optical vortex through an artificial sheltered atmospheric path is considered. The method of generation of optical beams with a nonzero orbital angular momentum by means of a liquid-crystalline HoloEye IC-2002 light modulator is demonstrated, various methods of detection of optical vortices are tested, including shift interferometers of various configurations and the Shack–Hartmann wavefront sensor. The distance at which the structure of the vortex bundle decays for the technically possible under the conditions of the aperture stand of the receiving interference system is determined. The results of experimental studies of beam sizes at different distances are presented. Calculations of the beam divergence angle and the singularity of the optical vortex are performed as a function of the length of the atmospheric path. The influence of the turbulent medium on the ability of the receiving system to register an optical vortex is considered.

Optic vortex, atmospheric route, angle of divergence, topological charge, turbulence, singularity