

ФОРМИРОВАНИЕ ФАНТОМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОМ ЭНДОСКОПЕ НА ОСНОВЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА

*Д. П. Агапов**, И. В. Беловолов, С. А. Магницкий, Д. Н. Фроловцев, А. С. Чиркин

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет
119991, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 27 июня 2023 г.,
после переработки 10 июля 2023 г.
Принята к публикации 10 июля 2023 г.

Экспериментально продемонстрирована возможность получения изображения объекта с помощью волоконно-оптического эндоскопа с применением принципа фантомных изображений. Эндоскоп состоит из многомодового волокна и включает в себя источник излучения с тепловой статистикой, которое формируется при случайной модуляции излучения He–Ne-лазера с помощью фазового пространственного модулятора света. Показано, что после прохождения волокна поле сохраняет псевдотепловую статистику. Полученное таким образом излучение использовано для формирования фантомных изображений как в прошедшем, так и в рассеянном свете.

DOI: 10.31857/S0044451023110032

EDN: PNCCLC

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс получения фантомных изображений (ФИ) отличается от наблюдения традиционных изображений, основанных на измерении пространственного распределения средней интенсивности отраженного или рассеянного от объекта излучения. В фантомной визуализации изображение получают опосредованно. Характерной чертой метода ФИ является использование взаимной корреляционной функции интенсивностей излучения объектного и опорного пучков для извлечения информации о свойствах объекта (например, модуля коэффициента пропускания [1]). Объектным пучком называют часть излучения, которая после взаимодействия с объектом регистрируется собирающим детектором (bucket-detector), не обладающим пространственным разрешением, т. е. излучение интегрально детектируется по всей апертуре пучка после взаимодействия с объектом. Опорный, или восстанавливающий пучок представляет собой не взаимодействующую с объектом часть излучения, которая регистрируется детектором с простран-

ственным разрешением (например, при помощи ПЗС-матрицы или сканирующего детектора).

Для получения ФИ необходимо наличие корреляции между пространственными распределениями интенсивностей в плоскости объекта и в сопряженной плоскости в опорном пучке. По существу, в основе метода ФИ лежит принцип работы интерферометра интенсивностей [2]. В фантомной визуализации используются классические или квантовые поля с тепловой статистикой. Энтропия таких полей, как известно, существенно больше, чем у когерентного излучения, и поэтому количество информации, которое может содержаться в таком свете, в принципе, существенно больше. С этой точки зрения задача фантомной визуализации состоит в нахождении способов извлечения информации о свойствах объекта исходя из статистических свойств световых полей.

В первых работах по ФИ использовались источники излучения на основе спонтанного параметрического рассеяния света [3, 4]. В этом случае пространственные корреляции опорного и объектного пучков имеют квантовую природу, и их описание проводится с использованием аппарата квантовой механики. Впоследствии принцип ФИ был распространен на источники излучения, в которых корреляции интенсивностей имеют классическую природу [5, 6]. В этих случаях излучение с тепловой стати-

* E-mail: dimaagapov@mail.ru

стикой получают при помощи рассеяния когерентного излучения на вращающемся матовом диске [5] или в жидких кристаллах [7]. В целом же схемы наблюдения классических и квантовых ФИ аналогичны, различие может состоять в методах извлечения информации об объекте и его качестве.

Дальнейшим развитием обсуждаемого принципа визуализации, с точки зрения используемых источников излучения, явился метод, названный вычислительными ФИ [8]. В таких схемах вычисляемая корреляционная функция интенсивности аналогична предыдущим случаям, как и извлекаемая из нее информация. Однако случайное поле формируют с помощью управляемого пространственного модулятора света.

Интерес к развитию принципа фантомной оптики стимулируется возможностью получения ФИ в различных частотных диапазонах, а также распространением принципа ФИ на поляризационные и временные свойства объекта. Так, ФИ получены в рентгеновском [9, 10] и терагерцевом диапазонах [11, 12]. Кроме того, принцип ФИ обобщен на акустические волны в ультразвуковом диапазоне [13]. С использованием в качестве источника корреляций запутанных состояний сверххолодных атомов гелия [14] тоже можно получать ФИ. В течение последних нескольких лет разработана и реализована концепция фантомной поляриметрии в классическом [15, 16] и квантовом [17, 18] случаях. Универсальность метода ФИ свидетельствует о возможности его применения во множестве приложений.

В настоящей работе приведены результаты исследований, являющихся дальнейшим развитием идеи вычислительных ФИ на элементной базе волоконной оптики. Это направление — волоконная фантомная оптика (ВФО) — является новым и в настоящее время находится на начальной стадии развития. ВФО находится на стыке волоконной и статистической оптики, оптики ФИ и интеллектуальных систем формирования и обработки изображений.

К настоящему времени в ВФО можно выделить два основных направления — это волоконная фантомная визуализация [19] и временные фантомные «изображения» в волокне [20]. В дальнейшем речь пойдет о волоконной фантомной визуализации. В экспериментальных системах ВФО для создания световых шаблонов используется ряд источников излучения. Так, в работе [21] предложен источник на основе массива многомодовых волокон, к каждому из которых подключен свой волоконный фазовый модулятор света. Подобная система экспериментально реализована в работах [22, 23]. Однако эта

система работала только в режиме «на просвет», т. е. регистрировалось излучение, прошедшее через объект. В качестве другого типа источников можно выделить системы, состоящие из матрицы микрозеркал и многомодового оптического волокна (ОВ). В работах [24, 25] такой источник использовался для передачи изображения через многомодовое ОВ, при этом система также работала в режиме «на просвет». В работе [26] реализована однопиксельная визуализация, однако сигнал с объекта представлял собой сигнал флюоресценции. Наконец, рассмотрим еще один источник, который состоит из фазового пространственного модулятора света (space light modulator, SLM) и многомодового ОВ. В работе [27] предложена визуализация через ОВ, а в [28] получены ФИ в режиме «на просвет» с использованием источника, выполненного на основе SLM и ОВ. Что касается рассеивающих объектов, то в литературе имеются сообщения о применении метода ФИ для исследования структуры таких объектов [29, 30]. Встречается также информация о результатах использования волоконных зондов для интегрального сбора рассеянного излучения [31]. Отдельно стоит выделить направление, в котором предполагается формирование трехмерных изображений в ВФО [32]. Однако сообщения о системах, использующих эти подходы совместно с волоконным источником теплового излучения, отсутствуют.

В предлагаемой работе, насколько нам известно, впервые получены ФИ от объектов в рассеянном свете в многомодовом волоконно-оптическом эндоскопе. Случайное поле с тепловой статистикой формировалось за счет модуляции когерентного излучения с помощью SLM. Представлены также результаты получения ФИ на созданном лабораторном макете эндоскопа в режиме «на просвет».

Статья построена следующим образом. В разд. 2 изложен принцип получения ФИ в случайном классическом поле при дискретной обработке изображения. Раздел 3 посвящен описанию псевдотеплового источника излучения и его статистических характеристик. В разд. 4 представлены экспериментальные результаты по фантомной визуализации объектов в прошедшем и рассеянном свете. В заключительном разделе анализируются результаты и отмечено направление дальнейших экспериментов по волоконно-оптической эндоскопии с неклассическим источником света.

2. ОПИСАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ФИ В КЛАССИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Как отмечалось выше, формирование ФИ с использованием статистических свойств классических световых полей основано на измерении взаимной пространственной корреляционной функции интенсивностей в объектном и опорном пучках. В рамках дискретного описания процесса задача сводится к проблеме восстановления оптического изображения из корреляционной функции вида

$$G_{i,j} = \langle \tilde{I}_{i,j} \tilde{I}_B \rangle - \langle \tilde{I}_{i,j} \rangle \langle \tilde{I}_B \rangle. \quad (1)$$

Здесь $\tilde{I}_{i,j}$ — регистрируемая за время экспозиции интенсивность света, поступающая на виртуальный пиксель объекта с номерами i и j вдоль ортогональных координат,

$$\tilde{I}_B = \sum_{k,m} R_{k,m} \tilde{I}_{k,m}$$

— прошедшая через объект или рассеянная объектом суммарная за время экспозиции интенсивность света, регистрируемая однопиксельным (интегрирующим) детектором, $R_{k,m}$ — коэффициент рассеяния от виртуального пикселя объекта с координатами k, m ; угловые скобки означают усреднение по снимкам (по паттернам). Под виртуальным пикселем подразумевается один из пикселей при мысленном разбиении плоскости объекта на число пикселей ПЗС-камеры, используемой в канале регистрации опорного пучка.

Подстановка в (1) выражений для интенсивностей дает

$$G_{i,j} = R_{i,j} \langle (\tilde{I}_{i,j})^2 \rangle + \sum_{k,m \neq i,j} \langle R_{k,m} \tilde{I}_{i,j} \tilde{I}_{k,m} \rangle - R_{i,j} \langle \tilde{I}_{i,j} \rangle^2 - \langle \tilde{I}_{i,j} \rangle \sum_{k,m \neq i,j} \langle R_{k,m} \tilde{I}_{k,m} \rangle. \quad (2)$$

Если случайно модулированный по поперечному сечению световой пучок имеет радиус корреляции меньший, чем размер виртуального пикселя, то

$$\langle \tilde{I}_{i,j} \tilde{I}_{k,m} \rangle = \langle \tilde{I}_{i,j} \rangle \langle \tilde{I}_{k,m} \rangle$$

и взаимная корреляционная функция (2) принимает вид

$$G_{i,j} = R_{i,j} \langle \tilde{I}_{i,j}^2 \rangle - R_{i,j} \langle \tilde{I}_{i,j} \rangle^2 = R_{i,j} \left(\langle \tilde{I}_{i,j}^2 \rangle - \langle \tilde{I}_{i,j} \rangle^2 \right). \quad (3)$$

Ее можно записать следующим образом:

$$G_{i,j} = R_{i,j} D_{i,j}, \quad (4)$$

где

$$D_{i,j} = \langle \tilde{I}_{i,j}^2 \rangle - \langle \tilde{I}_{i,j} \rangle^2$$

— дисперсия интенсивности света, освещающего (i, j) -й виртуальный пиксель на поверхности объекта, взятая в течение времени экспозиции τ . В случае наблюдения объекта на просвет вместо коэффициентов отражения $R_{i,j}$ в выражении (4) будут стоять коэффициенты пропускания $T_{i,j}$.

При облучении объекта светом с одинаковой по всей плоскости объекта дисперсией интенсивности ($D_{i,j} = D_0 = \text{const}$) выражение (4) можно пронормировать, проведя калибровочное измерение при отсутствии объекта. Тогда нормированная функция

$$g_{i,j} = G_{i,j} / G_0$$

определяет коэффициент рассеяния

$$g_{i,j} = R_{i,j}. \quad (5)$$

Следует обратить внимание на важную особенность соотношения (4). Абсолютное значение взаимной корреляционной функции $G_{i,j}$ оказывается пропорциональным дисперсии флуктуирующей от реализации к реализации интенсивности $\tilde{I}_{i,j}$. При дискретном подходе наблюдения ФИ важным является наличие ненулевой дисперсии интенсивности.

3. ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОМ ЭНДОСКОПЕ

Схема стенда для изучения статистических свойств источника излучения изображена на рис. 1.

Источником излучения выступает He–Ne-лазер, работающий в непрерывном режиме на длине волны 632 нм. После прохождения через расширитель лазерный пучок поступает на SLM, с помощью которого создается излучение с псевдотепловой статистикой [33]. Затем излучение заводится в многомодовое ОВ. При этом расстояние от SLM до объ-

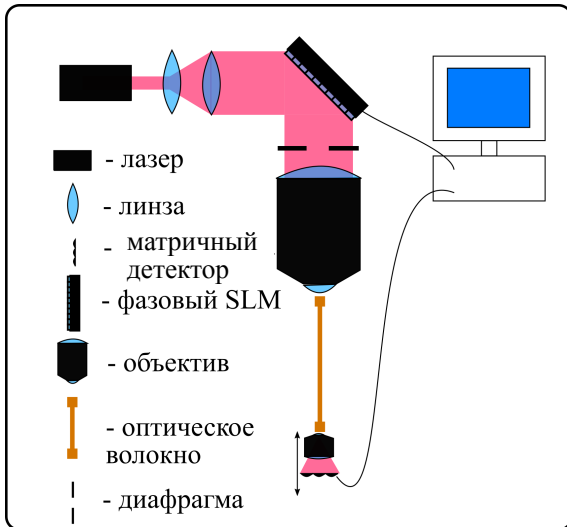


Рис. 1. (В цвете онлайн) Схема установки для изучения статистических свойств источника излучения волоконно-оптического эндоскопа. Лазерный пучок попадает на пространственный модулятор света, рассеивается и заводится в оптическое волокно

ектива выбрано таким образом, что на торец ОВ поступает излучение с радиусом корреляции около 2.1 мкм. Использовалось градиентное многомодовое ОВ с диаметром сердцевины 62.5 мкм и длиной 10 см. На этапе калибровки требуется получить распределение интенсивности в плоскости объекта в зависимости от распределения фазы на SLM. Для этого на выходе из волокна устанавливался объектив ЛОМО 40x/0.95, передающий изображение из области вблизи торца ОВ на камеру Thorlabs C1285R12M с увеличением 25.5 раз. Камера и объектив установлены на подвижной платформе с микрометрическим винтом. Для различных положений платформы с камерой и объективом снималось пространственное распределение интенсивности (спеклструктура) при различных расстояниях от выходного торца волокна до объектива.

Пространственный профиль фазы лазерного излучения модулировался с помощью пространственного модулятора света SLM-100 фирмы Santec с разрешением 1440×1050 пикселей. Модулятор является 10-разрядным, т.е. каждый пиксель имеет 1024 градации возможной фазовой задержки. Управление SLM осуществлялось персональным компьютером с использованием библиотеки OpenCV на языке Python. Чтобы получить случайную фазовую модуляцию лазерного пучка, программа генерирует случайный массив чисел в диапазоне от 0 до 1023, который затем выводится на матрицу фазового модулятора. При этом диапазон полностью обеспечивает вносимые фазовые задержки в интервале от 0

до 2π радиан. Типичный вид двумерного пространственного распределения фазы приведен на рис. 2.

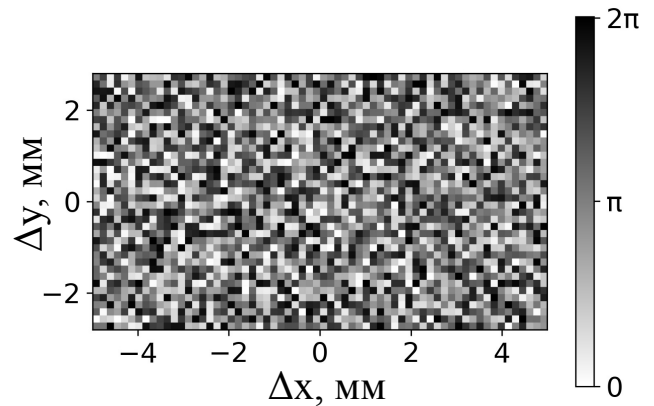


Рис. 2. Реализация распределения фазы на шаблоне пространственного модулятора света (на SLM)

Для получения фантомных изображений чрезвычайно важными являются статистические свойства используемого света. Для их изучения проводилась съемка серии кадров пространственного распределения интенсивности поля в плоскости объекта (рис. 3а) при различных пространственных распределениях фазы на SLM, а затем проводились вычисления. В профиле пучка случайно выбиралось несколько пикселей. Для всех возможных пар выбранных пикселей, а также для каждого пикселя по отдельности вычислялось значение корреляционной функции $g^{(2)}$. Для этого набор из $N = 1000$ спеклструктур оцифровывался и обрабатывался согласно следующему алгоритму. Пусть $I_n(i, j)$ — интенсивность в (i, j) -м пикселе, $I_n(l, m)$ — интенсивность в (l, m) -м пикселе, где n — номер реализации (шаблона). Взаимная корреляционная функция находилась по формуле

$$g^{(2)}(i, j; l, m) = \frac{N \sum_{n=1}^N I_n(i, j) I_n(l, m)}{\sum_{n=1}^N I_n(i, j) \sum_{n=1}^N I_n(l, m)}. \quad (6)$$

Полученные значения корреляционной функции затем усреднялись. Более подробно об исследовании статистических свойств излучения, получаемого с помощью фазового SLM, можно узнать в нашей работе [33], где показано, в частности, что получаемое при этом поле имеет тепловую статистику.

Корреляционная функция интенсивности, вычисленная с помощью программы [34], приведена на рис. 3б. Из неё определялись радиусы корреляции в ортогональных направлениях.

В эксперименте были измерены зависимости радиусов корреляции от расстояния между выходным

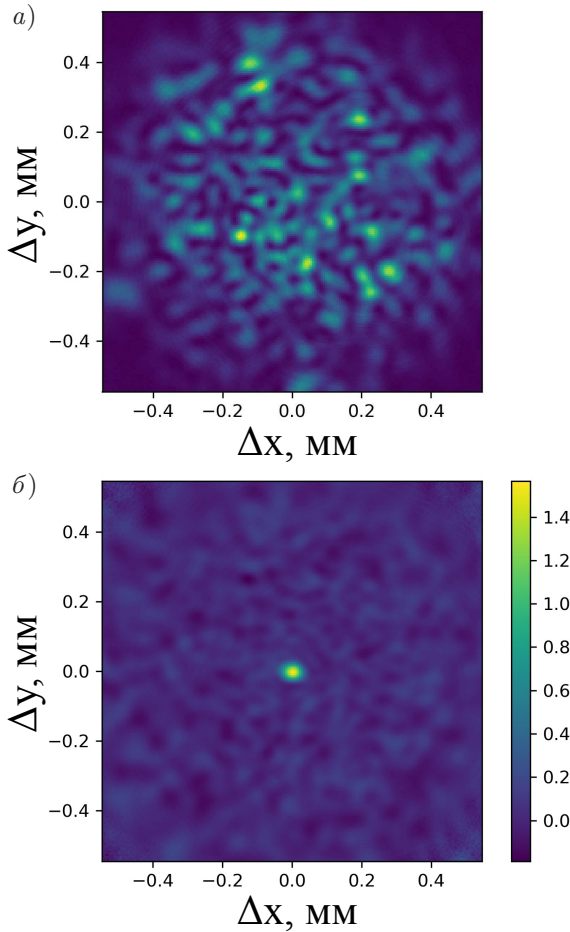


Рис. 3. (В цвете онлайн) Спекл-структура на выходе ОВ на расстоянии 2 мм от торца (а) и вычисленная для нее корреляционная функция интенсивности (б)

торцом волокна и плоскостью наблюдения. Экспериментальные результаты представлены на рис. 4а.

На рис. 4а также представлены данные численного моделирования процессов формирования поля случайной фазовой модуляцией на SLM и его распространения в ступенчатом ОВ (см. Теоретическая кривая). Моделирование проводилось на языке Python, написана библиотека lightprop2d [34] и доработана библиотека ruMMF [35]. В результате моделирования были получены спекл-картины (см. рис. 3). Для них также рассчитывались корреляционные функции и зависимости радиусов корреляций от расстояния до выхода ОВ, которые представлены на рис. 4а. Из графиков видно, что радиус корреляции с увеличением расстояния от торца ОВ растет, что находится в полном согласии с предсказанием теоремы Ван Циттерта – Цернике [2]. Причины небольшого отклонения связаны с тем фактом, что радиус корреляции на выходе волокна зависит от реального углового спектра излучения, заводимого

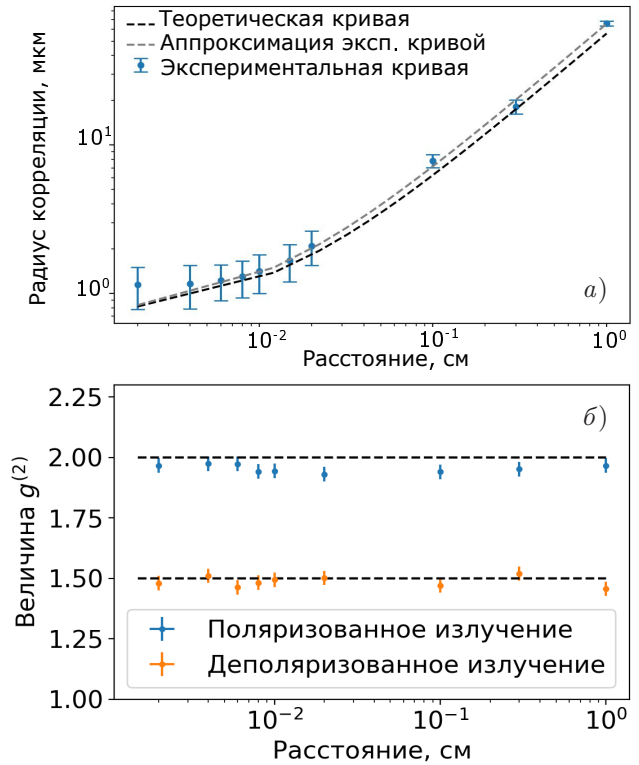
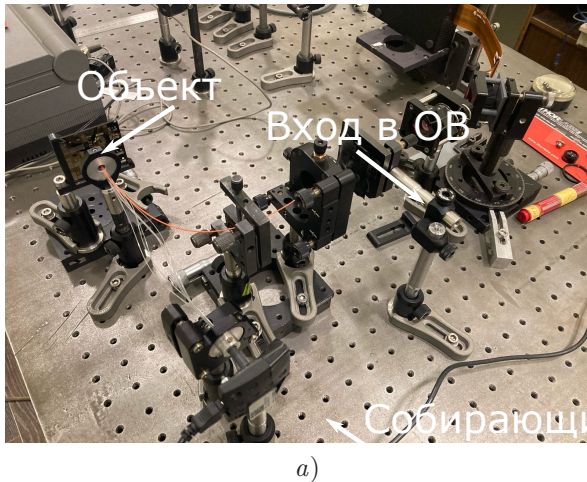


Рис. 4. (В цвете онлайн) а) Зависимость радиуса корреляций от расстояния до выходного торца волокна. б) Зависимость величины $g^{(2)}$ от расстояния до выходного торца волокна.

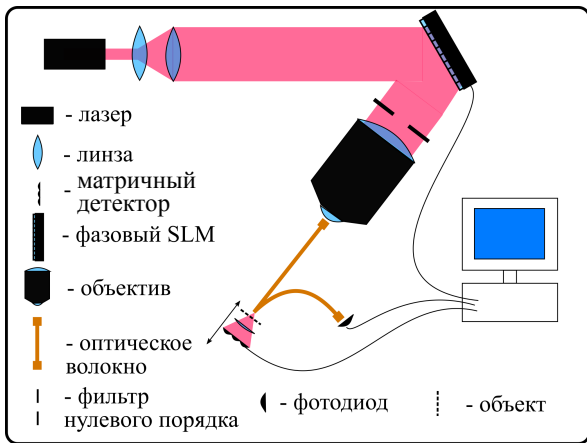
в ОВ, который сложно контролировать при проведении эксперимента.

Экспериментальные данные позволили также рассчитать параметр $g^{(2)}(0) = g^{(2)}(i, j; i, j)$, характеризующий статистику поля (см. выражение (2)). Полученные значения $g^{(2)}(0)$ в зависимости от расстояния до выходного торца волокна показаны на рис. 4б). Для сравнения результатов на этом же рисунке представлена зависимость $g^{(2)}(0)$ для случая, когда после волокна установлен пленочный поляризатор. Получены значения $g^{(2)}(0) \approx 1.5$ для неполяризованного света и $g^{(2)}(0) \approx 2$ для поляризованного, что убедительно свидетельствует о тепловой, гауссовской статистике интенсивности прошедшего через волокно света. Отличие представленной на рисунке зависимости параметра $g^{(2)}$ от двойки связано с тем, что часть неполяризованного излучения проходила сквозь пленочный поляризатор.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанный тип волоконных источников на основе фазового SLM можно использовать для получения полей с тепловой статистикой, что важно в системах ВФО.



а)



б)

Рис. 5. (В цвете онлайн) Фотография лабораторного макета-прототипа волоконного эндоскопа (а) и его схема (б) (ср. с рис. 1)

4. ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛОКОННЫХ ФИ ОБЪЕКТОВ В ПРОШЕДШЕМ И РАССЕЯННОМ СВЕТЕ

В данном разделе описано получение вычислительных ФИ объекта как в прошедшем, так и в рассеянном свете. На рис. 5 представлены фотография и схема установки для получения амплитудных ФИ.

Пространственно-некогерентный свет, формируемый описанным выше источником, облучает объект исследования. В зависимости от режима работы (в рассеянном свете или на просвет) в схеме осуществлялись модификации.

Визуализация объекта при облучении на просвет. В этом режиме в качестве объекта использовалась мишень, представляющая собой набор щелей разной ширины. Сначала проводилась калибровка установки. Получение ФИ в проходящем свете имело в значительной мере тестовый характер. При помощи микрометрической подвижной платформы си-

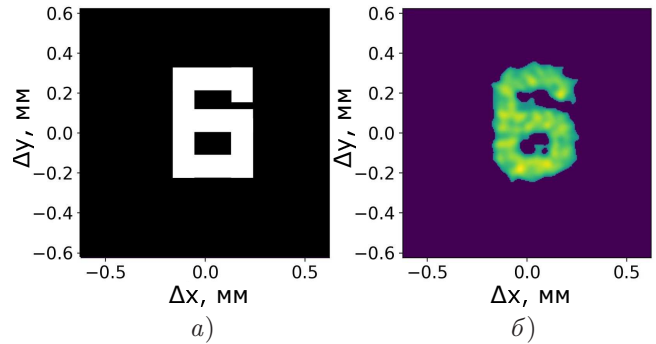


Рис. 6. (В цвете онлайн) Исходный объекта (а) и его фантомная визуализация (б) в прошедшем свете на расстоянии 3 мм от торца волокна

стема камера-линза наводилась на рабочую плоскость (плоскость, где ожидается объект). Для выбранной плоскости и фиксированной последовательности случайных шаблонов, подаваемых на SLM, снималась серия снимков, представляющих собой распределение поля после выхода из ОВ. Затем в рабочую плоскость устанавливался объект, камера переводилась в интегральный режим (осуществлялось суммирование сигнала со всех пикселей). Для той же последовательности распределений фазы на SLM, которая использовалась при калибровке, записывались значения интегральных интенсивностей прошедшего через объект излучения. По этим данным вычислялась взаимная пространственная корреляционная функция (1) между полученными при калибровке спекл-картинами и интегральной интенсивностью, прошедшего через объект излучения. Вычислялась также корреляционная функция в отсутствие объекта, что необходимо для нормировки. В каждой точке определялось отношение двух вычисленных значений. Согласно (1), полученный результат дает распределение квадрата модуля коэффициента пропускания объекта. Типичные ФИ объекта, расположенного на расстоянии 3 мм от выходного торца волокна, представлены на рис. 6.

Визуализация при рассеянии света от объекта. Рассеянное объектом назад излучение имеет значительно большую угловую расходимость, чем при наблюдении на просвет. Поэтому возникает необходимость сбора рассеянного излучения в плоскости, расположенной как можно более близко к объекту. Для этого в схему добавлялся специальный зонд, в центре которого находилось описанное ранее ОВ, а вокруг него располагались семь многомодовых волокон, работающих на полном внутреннем отражении, каждое диаметром 400 мкм. Они предназначены для сбора рассеянного объектом излучения в направлении подводящего ОВ. В таком волокон-

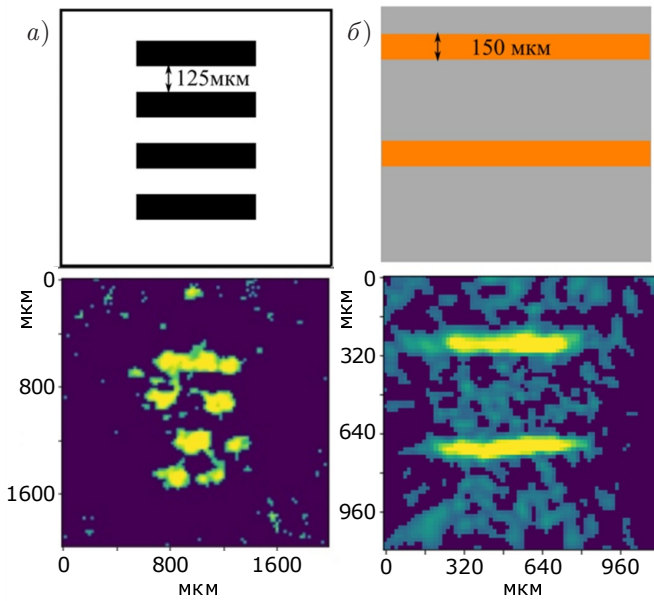


Рис. 7. (В цвете онлайн) Экспериментально полученные ФИ *а)* отражающего объекта (мира) и *б)* рассеивающего объекта (медные проволоки). На верхних рисунках схематично изображена структура объектов, а на нижних — их ФИ, полученные в рассеянном свете

ном зонде собирающие ОВ расположены сбоку от подводящего волокна. На выходе собирающих ОВ располагался суммирующий детектор.

Процедура получения ФИ в рассеянном свете полностью аналогична вышеописанной с той разницей, что интегральное детектирование происходит на выходе собирающих ОВ, а не установленным за объектом детектором. В экспериментах получены ФИ двух типов рассеивающих объектов: мира и двух медных проволок диаметром 150 мкм на фоне белой бумаги. Оба объекта устанавливались на расстоянии 2 мм от выходного торца подводящего ОВ. Восстановленные распределения сечений рассеяния назад (ФИ рассеивающих объектов) приведены на рис. 7.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что с помощью методов ВФО можно восстанавливать структуру объектов в рассеянном свете. Обратим внимание на то, что ФИ мира в рассеянном свете являются светлыми участками, не пропускающими излучение, в то время как в полученных на просвет ФИ они будут темными.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные нами при исследовании результаты показали возможность применения системы «фазо-

вый SLM + многомодовое волокно» для формирования случайных псевдотепловых световых полей, что подтверждается данными для параметра $g^{(2)}$ (см. рис. 4б). Для таких полей в случае поляризованного излучения параметр $g^{(2)} = 2$. Экспериментальное значение близко к этой величине, что свидетельствует о гауссовой статистике излучения. Небольшое отличие $g^{(2)}$ от 2.0, может быть связано с вкладом в рассеянный SLM свет не только от случайно модулируемой части излучения, т. е. при отражении излучения от вносящих случайную фазовую задержку пикселей, но и от лазерного излучения, отраженного от промежутков между пикселями [33].

На рис. 4а показаны экспериментальная и теоретическая зависимости радиусов корреляции от расстояния до выходного торца волокна. Виден одинаковый характер изменения радиуса корреляции в зависимости от расстояния, но экспериментальные значения примерно в 1.8 раза больше теоретических. Это связано, по нашему мнению, с тем, что при моделировании поля на входе ОВ использовалось приближение дельта-коррелированного поля с тепловой статистикой, в то время как в реальности радиус корреляции конечен. Это приводит к тому, что на выходном торце волокна рассчитанный в результате моделирования радиус корреляции составлял 2.0 мкм, в то время экспериментальное значение 2.3 мкм. Величина радиуса корреляции играет ключевую роль с точки зрения качества ФИ. В работе [36] показано, что предельное разрешение в фантомной визуализации определяется величиной радиуса корреляции используемого излучения. Таким образом, чем ближе к волокну находится объект, тем лучше разрешающая способность предлагаемой схемы. Также следует заметить, что в эксперименте при подаче на вход ОВ когерентного излучения на выходе имелась бы статическая, «замороженная» картина неоднородностей поля.

Созданный источник пространственно-некогерентного излучения использован для получения ФИ как в проходящем, так и в рассеянном свете. Рассеивающие объекты были с принципиально разными свойствами: отражающие и диффузно рассеивающие. Работающая на отражение мира (рис. 7а) с шириной штрихов 125 мкм восстанавливалась фрагментарно. Это обусловлено тем, что диаграмма направленности рассеяния у таких объектов является узкой, а в используемом нами зонде собирающие волокна располагались сбоку от подводящего волокна. Кроме того, волокна упакованы не оптимальным способом, что приводит к потере излучения от некоторых участков объекта. ешающий

С другой стороны, как можно видеть на рис. 7, для объекта с широкой диаграммой рассеяния, такого как медная проволока на фоне белой бумаги, данный эффект проявляется существенно слабее и изображение восстанавливается лучше.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим основные результаты изложенных в работе исследований. Экспериментально подтверждено, что тепловая статистика поля, полученного при случайной фазовой модуляции когерентного излучения, сохраняется при распространении через многомодовое ОВ.

Продемонстрировано, что созданный на фантомном принципе макет волоконного эндоскопа позволяет получать ФИ как в прошедшем, так и в рассеянном свете. Последнее является наиболее важным результатом выполненных исследований.

Таким образом, в настоящей работе впервые проведено комплексное исследование устройства, которое может лечь в основу практической реализации волоконно-оптического эндоскопа на фантомном принципе, допускающего для восстановления изображения объекта использовать слабоинтенсивный свет и пространственно-неразрешающий изображение детектор.

Предложенный в работе принцип можно обобщить и на случай квантового источника света с коррелированными одиночными фотонами, генерируемыми при спонтанном параметрическом рассеянии.

Благодарности. Авторы благодарят П. П. Гостева за помощь в разработке программного обеспечения для численных расчетов.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-12-00155).

ЛИТЕРАТУРА

1. N. Bornman, M. Agnew, F. Zhu et al., *npj Quantum Inf.* **5**, 63 (2019).
2. С. А. Ахманов, Ю. Е. Дьяков, А. С. Чиркин, *Введение в статистическую радиофизику и оптику*, Наука, Москва (1981).
3. Д. Н. Клышко, *ЖЭТФ* **94**(6), 82 (1988).
4. T. B. Pittman, Y. Shih, D. V. Strekalov et al., *Phys. Rev. A* **52**, R3429 (1995).
5. J. H. Shapiro and R. W. Boyd, *Quantum Inf. Process* (2012), DOI 10.1007/s11128-011-0356-5.
6. F. Wang, L. Liu, P. Yu et al., *Sci. Rep.* **6**, 24703 (2016).
7. N. Davletshin, D. Ikonnikov, V. Sutormin et al., *Opt. Lett.* **47**, 9 (2022).
8. Z. H. Xu, W. Chen, J. Penuelas et al., *Opt. Express* **26**, 2427 (2018).
9. H. Yu, R. Lu, S. Han et al., **117**, 113901 (2016).
10. D. Pelliccia, A. Rack, M. Scheel et al., *Phys. Rev. Lett.* **117**, 113902 (2016).
11. L. Olivieri, J. S. T. Gongora, and L. Peters, *Optica* **7**, 186 (2020).
12. L. Olivieri, J. S. T. Gongora, A. Pasquazi et al., *ACS Photonics*, **5**, 3379 (2018).
13. M. Q. Li, R. M. Lan, X. F. Liu et al., *Appl. Phys. Lett.* **117**, 084102 (2020).
14. S. S. Hodgman, W. Bu, S. B. Mann et al., *Phys. Rev. Lett.* **122**, 233601 (2019).
15. A. S. Chirkin, P. P. Gostev, D. P. Agapov et al., *Laser Phys. Lett.* **15**, 115404 (2018).
16. Д. П. Агапов, И. А. Беловолов, С. А. Магницкий и др., в сб. *XIII международные чтения по квантовой оптике (IWQO-2019)*, стр. 252.
17. S. Magnitskiy, D. Agapov, and A. Chirkin, *Opt. Lett.* **47**, 754 (2022).
18. С. А. Магницкий, Д. П. Агапов, И. А. Беловолов и др., *Вестник МГУ, сер. Физика, астрономия* №6, 19 (2021).
19. Д. А. Балакин, Д. П. Агапов, П. П. Гостев и др., *ЖЭТФ* **162**, 811 (2022).
20. H. Wu, B. Han, Z. Wang et al., *Opt. Express* **28**, 9957 (2020).
21. C. Liu, J. Chen, J. Liu et al., *Opt. Express* **26**, 10048 (2018).
22. T. Fukui, Y. Kohno, R. Tang et al., *J. Lightwave Technol.* **39**, 839 (2021).
23. T. Fukui, Y. Nakano, and T. Tanemura, *JOSA* **38**, 3796 (2021).
24. O. Herman, O. Wagner, N. Shabairou, and Z. Zalevsky, *Opt. Fiber Technol.* **54** 102122 (2020).
25. A. M. Caravaca-Aguirre and R. Piestun, *Opt. Express* **25**, 1656 (2017).

26. V. L. Amitonova and J. F. de Boer, *Opt. Lett.* **43**, 5427 (2018).
27. S. Singh, S. Labouesse, and R. Piestun, *IEEE Trans. Comput. Imaging* **9**, 159 (2023).
28. D. Yang, M. Hao, G. Wu et al., *Optics and Lasers in Engineering* **149**, 106827 (2022).
29. Y. Xu, W. Liu, E. Zhang et al., *Opt. Express* **23**, 32993 (2015).
30. W. Gong, P. Zhang, X. Shen et al., arXiv:0806.3543.
31. Y. Tian, Z. Ding, H. Feng et al., *IEEE Photon. J.* **12**(6), 1 (2020).
32. А. В. Белинский, П. П. Гостев, С. А. Магницкий и др., *Письма в ЖЭТФ* **177**, 207 (2023).
33. Д. П. Агапов, И. А. Беловолов, П. П. Гостев и др., *ЖЭТФ* **162**, 215 (2022).
34. <https://github.com/vongostev/lightprop2d>
35. <https://github.com/vongostev/pyMMF>
36. M. D'Angelo, A. Valencia, M. H. Rubin et al., *Phys. Rev. A* **72**, 013810 (2005).