

О проблеме восстановления амплитудно–фазового профиля лазерного пучка в турбулентной среде

А. М. Зотов^{1,*}, П. В. Короленко^{1,2,†}, Ю. В. Рыжикова^{1,‡}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д. 53
(Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

Выполнен краткий ретроспективный анализ результатов исследований изменений структуры лазерных пучков в турбулентной среде. Предложен алгоритм восстановления волнового фронта по интерферограммам сдвига при наличии топологических фазовых возмущений. Осуществлено тестирование предложенного алгоритма на основе численного моделирования и экспериментальных данных.

PACS: 42.68.Bz; 42.25.Hz; 02.60.Gf

УДК: 535.015

Ключевые слова: флуктуации лазерного излучения, оптика случайно-неоднородных сред, винтовые дислокации волнового фронта.

Ретроспективный анализ результатов исследований изменений структуры лазерных пучков в турбулентной среде показывает что, несмотря на большое количество работ, (например [1–3]), выполненных по данной теме, ряд вопросов остается недостаточно изученным. Нуждаются в совершенствовании методы измерений характеристик лазерного излучения, а также способы восстановления распределений интенсивности и фазы из интерферометрических измерений при сильной и слабой турбулентности. Требуют дополнительного исследования скейлинговые свойства флуктуаций световых пучков [4].

В данной работе изложен новый подход к обработке экспериментальных данных о структуре волнового фронта, получаемых с помощью интерферометра поперечного сдвига [5]. Он основан на процедуре поэтапной пространственной фильтрации изображения интерферограммы и последовательного решения обратной задачи. В тех случаях, когда интерферограмма характеризуется ветвлением интерференционных полос из-за появления на волновом фронте винтовых дислокаций, изменяющих топологию волнового фронта, использовалось представление светового поля, в виде реальной и мнимой частей комплексной амплитуды. Специально разработанная пошаговая схема вычислений позволяла восстановить реальные и мнимые компоненты амплитуды в виде непрерывных плавных распределений и по ним восстановить фазу.

Тестирование разработанного метода оценки распределений амплитуды и фазы проводилось на основе численного моделирования пучков с различными типами возмущения волнового фронта и их сдвиговых интерферограмм.

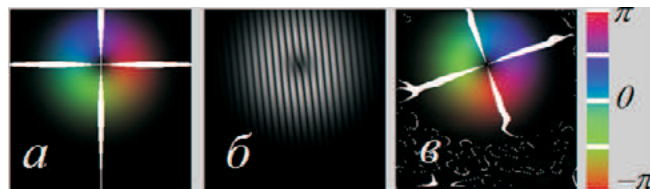


Рис. 1: Восстановление амплитудно–фазового распределения ТЕМ–пучка по сдвиговой интерферограмме. *a* — структура заданного поля, *b* — интерферограмма сдвига, *в* — структура восстановленного поля. Справа приведена цветовая циклическая палитра изменения фазы



Рис. 2: Восстановление амплитудно–фазового распределения спеклового поля. *a* — структура заданного фрагмента спекл–поля, *b* — интерферограмма сдвига, *в* — структура восстановленного поля. Справа приведена цветовая циклическая палитра

Результаты тестирования приведены на рис. 1 и рис. 2. Белыми линиями показаны нулевые линии реальной и мнимой частей амплитуды (в точках винтовых дислокаций они пересекаются). Рис. 1 и рис. 2 иллюстрируют качество восстановления амплитудно-фазового распределения. В качестве тестовых полей использовался ТЕМ-пучок с винтовой дислокацией на оси (рис. 1*a*) и фрагмент спекл–поля (рис. 2*a*). Восстановленные распределения амплитуды и фазы (рис. 1*в* и рис. 2*в*) путем обработки сдвиговых

*E-mail: azotov@gmail.com

†E-mail: pvkorolenko@rambler.ru

‡E-mail: ryzhikovaju@physics.msu.ru

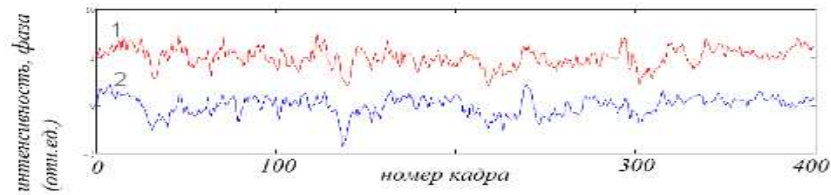
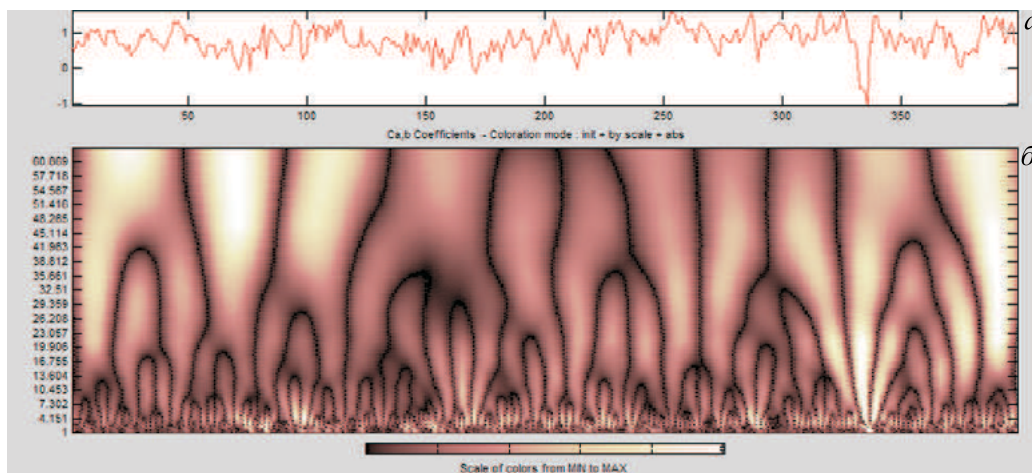


Рис. 3: Локальные временные флуктуации интенсивности (1) и фазы (2) в случае двух проходов через кювету

Таблица I: Сопоставление результатов численного расчета с экспериментальными данными

Количество проходов через кювету	Численные расчеты коэффициента корреляции	Экспериментальные данные коэффициента корреляции
2	0,54	$0,58 \pm 0,02$
4	0,39	$0,49 \pm 0,02$
6	0,38	$0,42 \pm 0,02$

Рис. 4: Локальные временные флуктуации фазы в случае шести проходов пучка через кювету (а). Картина вейвлет-коэффициентов $C_{a,b}$ (б)

интерферограмм (рис. 1б и рис. 2б), несмотря на присутствие некоторых искажений, удовлетворительно описывали исходные поля.

В ходе численного моделирования в качестве дополнительной задачи был выполнен сравнительный анализ характеристик восстанавливаемых полей в условиях слабых и сильных флуктуаций излучения. Особое внимание было обращено на недостаточно проработанный в литературе вопрос о корреляции изменений интенсивности и фазы. Расчеты показали, что изменение коэффициента корреляции как для слабых, так и для сильных флуктуаций происходит более медленно по сравнению с изменением уровня флуктуаций интенсивности и фазы. Для определения статистических характеристик флуктуаций излучения использовалась модель, описывающая его прохождение через случайные фазовые экраны. Был установлен плавный характер снижения максимального

значения коэффициента корреляции с увеличением интенсивности турбулентности.

Подробно рассмотрен случай, когда фазовый экран имел фрактальную структуру. Его генерация производилась с использованием свойств функции Вейерштрасса [6]. После прохождения такого экрана фрактальные признаки оказывались присущими пространственно-временным флуктуациям фазы и интенсивности.

Параллельно с теоретическими расчетами проводились экспериментальные исследования особенностей флуктуационной структуры излучения. Эксперименты проводились на стенде, основным элементом которого была многоходовая кювета с турбулентной средой. Через кювету распространялся коллимированный лазерный пучок. После прохождения кюветы пучок направлялся в интерферометр сдвига в роли которого выступала пластина с малым углом наклона граней.

Структура интерферограмм фиксировалась с помощью скоростной видеокамеры, сигнал с которой подавался в компьютер для последующей обработки. На рис. 3 приведены в качестве примера кривые, характеризующие покадрово измеренные локальные флуктуации фазы и интенсивности в центре пучка для двух проходов через ковету.

Даже при визуальном рассмотрении кривых видно, что они характеризуются высокой степенью скоррелированности. При увеличении числа проходов и повышении интенсивности турбулентности коэффициент взаимной корреляции интенсивности и фазы заметным

образом снижался. Выполненные теоретические расчеты с использованием метода фазовых экранов [7] подтвердили указанную тенденцию (см. таб. 1).

Для оценки глубины масштабирования флуктуационной структуры излучения был выполнен вейвлет-анализ [6] особенностей изменений фазы регистрируемых лазерных пучков. В качестве примера на рис. 4 приведена вейвлет-картина одной из записей фазовых флуктуаций, указывающая на широкий спектр возмущений фазы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 16-32-00386 мол_а, 14-02-00461 а).

- [1] Аксенов В. П., Канев Ф. Ю., Куксенко Д. С., Макенова Н. А., Хапаева А. В. Известия Томского политехнического университета. **323**, N 2. С. 181. (2013).
- [2] Гурвич А. С., Кон А. И., Миронов В. Л., Хмелевцов С. С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. (М.: Наука, 1976).
- [3] Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. **2**. Многократное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности и дистанционное зондирование. Пер. с англ. (М.: Мир, 1981).
- [4] Зотов А. М., Ким Е. Г., Короленко П. В., Рыжикова

Ю. В. Электромагнитные волны и электронные системы. **18**, N 12. С. 10. (2013).

- [5] Малакары Д. Оптический производственный контроль. Пер. с англ. (М.: Машиностроение, 1985).
- [6] Вохник О. М., Зотов А. М., Короленко П. В., Рыжикова Ю. В. Моделирование и обработка стохастических сигналов и структур. Учебное пособие. (М.: МГУ. 2013).
- [7] Лукин И. П., Рычков Д. С., Фалиц А. В., Лай Кин Сенг, Лю Мин Ронг. Квантовая электроника. **39**, N 9. С. 863. (2009).

The problem of restoring the amplitude and phase profile of the laser beam in a turbulent medium

A.M. Zotov^{1,a}, P.V. Korolenko^{1,2,b}, Yu. V. Ryzhikova^{1,c}

¹Department of optics, spectroscopy and nanosystems physics, Faculty of Physics

Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia ²P. N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia E-mail: ^aazotov@gmail.com, ^bpokorolenko@rambler.ru, ^cryzhikovaju@physics.msu.ru

The results of research of the laser beams in a turbulent medium are made. Wavefront reconstruction algorithm for shear interferograms in the presence of topological phase perturbation is proposed. Testing of the proposed algorithm based on numerical modeling and experimental data has been carried out.

PACS: 42.68.Bz; 42.25.Hz; 02.60.Gf

Keywords: fluctuations of laser radiation, optics of randomly inhomogeneous media, screw dislocations in light wavefronts.

Received 25.04.2016.

Сведения об авторах

1. Зотов Алексей Михайлович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-17-17, e-mail: azotov@gmail.com.
2. Короленко Павел Васильевич — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-57-40, e-mail: pvkorolenko@rambler.ru.
3. Рыжикова Юлия Владимировна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-57-40, e-mail: ryzhikovaju@physics.msu.ru.