

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Халилова Сервера Искандаровича «Определение орбитальных параметров Стокса структурированных пучков Лагерра–Гаусса», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика

В современной оптике структурированных световых полей важной задачей является надёжная диагностика формируемых пучков, в том числе их орбитальных параметров. Зарегистрированное распределение интенсивности содержит лишь часть информации о пространственно-фазовой структуре пучка, а измерение орбитального углового момента характеризует только одну составляющую его орбитального состояния. Комплексный подход приобретает особую значимость при астигматических преобразованиях, когда величина орбитального углового момента зависит не только от азимутального, но и от радиального числа. Этим обусловлена **актуальность** диссертационного исследования С.И. Халилова, **целью** которого явилась разработка и экспериментальная реализация метода измерения орбитальных параметров Стокса структурированных вихревых пучков на основе моментов интенсивности второго порядка в оптической системе первого рода с последующим отображением состояний пучков на орбитальную сферу Пуанкаре.

Для достижения поставленной цели в диссертации объединены два взаимосвязанных направления исследования. Первое связано с разработкой метода определения орбитальных параметров Стокса, основанного на расчёте моментов интенсивности второго порядка. Второе посвящено исследованию изменений пространственных и орбитальных характеристик структурированных пучков Лагерра–Гаусса при астигматических преобразованиях. Оба направления дополняют друг друга: разработанный метод позволяет определить орбитальное состояние пучка, а выявленные закономерности – проследить его эволюцию в астигматической оптической системе.

Для проведения измерений регистрируются два распределения интенсивности – в фокусе сферической линзы и в плоскости двойного фокуса цилиндрической линзы. По результатам их обработки определяются все три орбитальных параметра Стокса, задающие положение пучка на орбитальной сфере Пуанкаре, без дополнительного восстановления фазы пучка.

Диссертация состоит из введения, трех глав, в которых изложены основные результаты исследований, заключения и списка библиографических источников. Материал изложен на 138 страницах, содержит 37 иллюстраций и список литературы из 165 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, дан обзор основополагающих и современных работ по диагностике структурированных пучков, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты его научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Приведены также положения, выносимые на защиту, сведения о достоверности результатов, апробации, публикациях и личном вкладе автора.

В первой главе рассмотрены двухпараметрические структурированные пучки Лагерра–Гаусса с амплитудным параметром ϵ и фазовым параметром θ . Их модовый состав задаётся суперпозицией мод Эрмита–Гаусса, а варьирование управляющих параметров позволяет переходить между различными состояниями при сохранении общего порядка пучка.

Существенным результатом главы является физическая интерпретация осцилляций орбитального углового момента. Возмущение амплитуд и фаз мод Эрмита–Гаусса снимает вырождение кольцевых дислокаций исходной моды и приводит к образованию топологических диполей, а изменение фазового управляющего параметра сопровождается быстрыми осцилляциями орбитального углового момента, число которых связано с радиальным числом. При простом астигматизме различный набег фаз Гуй у ортогональных компонент нарушает равновесие противоположных топологических

вкладов, что приводит к возникновению выраженных всплесков и провалов орбитального углового момента.

При переходе к общему астигматизму ориентация цилиндрической линзы становится дополнительным управляющим параметром. В диссертации исследованы изменения знака и величины орбитального углового момента при повороте осей астигматического элемента, а также режим, в котором распределение интенсивности следует за поворотом этих осей. Сопоставление модового спектра с расположением вихрей позволяет связать экстремальные значения момента с нарушением симметрии весов топологических диполей.

Во второй главе с использованием функции распределения Вигнера получены явные выражения для четырёхмерной симплектической матрицы $\mathbf{P}$ моментов интенсивности второго порядка сЛГ-пучка. Матрица представлена в блочном виде через субматрицу $\mathbf{W}$, описывающую пространственное распределение интенсивности, субматрицу $\mathbf{M}$, характеризующую фазовые свойства пучка, и субматрицу $\mathbf{U}$, определяющую его угловую структуру. Установленные для сЛГ-пучков соотношения симметрии сокращают число независимых элементов матрицы. На основе её симплектических свойств получена двумерная эрмитова матрица, аналогичная матрице когерентности в поляризационной оптике, элементы которой выражаются через параметры S_0, S_1, S_2 и S_3 .

Параметр S_1 связан с разностью квадратов радиусов перетяжки пучка вдоль осей x и y . Параметр S_2 определяется аналогичной разностью для направлений, повернутых относительно осей x и y на углы $\pm\pi/4$, а параметр S_3 характеризует продольный орбитальный угловой момент пучка. Параметры S_1, S_2 и S_3 задают координаты состояния пучка на орбитальной сфере Пуанкаре, причём сумма их квадратов является инвариантом преобразований в оптических системах первого порядка. Формализм симплектических преобразований и представление состояний на орбитальной сфере Пуанкаре были разработаны в предшествующих исследованиях. В диссертации этот аппарат применён к двухпараметрическим структурированным пучкам Лагерра–Гаусса.

При изменении фазового параметра θ состояния сЛГ-пучка образуют на орбитальной сфере Пуанкаре пространственные многолепестковые траектории, которые могут иметь точки самопересечения. Число лепестков каждой такой траектории равно полному порядку исходной моды Лагерра–Гаусса $N=2n+\ell$, где n и ℓ – соответственно радиальное и азимутальное числа. Изменение амплитудного параметра ϵ управляет формой траектории, охватываемой ею площадью и положением точек самопересечения, тогда как изменение фазового параметра θ задаёт перемещение состояния по траектории. Связь координат на сфере с распределением интенсивности устанавливается посредством характеристического эллипса субматрицы $\mathbf{W}$: угол ϕ описывает поворот картины интенсивности, а угол β определяет величину и знак орбитального углового момента.

В главе теоретически обоснован принцип взаимности между орбитальным угловым моментом ℓ_z и перекрёстным моментом интенсивности $4W_{xy}$ при прохождении пучка через цилиндрическую линзу. В плоскости её двойного фокуса при условии $z_0=2f_{CL}$ вследствие накопления разности фаз G_{ui} , равной $\pi/2$, эти величины взаимно преобразуются. По первому распределению интенсивности, зарегистрированному в фокальной плоскости сферической линзы, рассчитываются моменты интенсивности второго порядка W_{xx}, W_{yy} и W_{xy} , по которым определяются параметры S_1 и S_2 . Третий параметр $S_3=\ell_z$ определяется по перекрёстному моменту W_{xy} , вычисленному из второго распределения интенсивности, зарегистрированного в плоскости двойного фокуса цилиндрической линзы. Таким образом, для определения трёх орбитальных параметров Стокса требуются два распределения интенсивности и их компьютерная обработка. Метод экспериментально реализован для двухпараметрических устойчивых сЛГ-пучков при различных значениях амплитудного и фазового управляющих параметров. Полученные экспериментальные результаты согласуются с данными компьютерного моделирования.

В третьей главе разработан и экспериментально реализован модифицированный метод определения орбитальных параметров Стокса в трёхлинзовой оптической системе. При выполнении условия $z_0=2f_{CL}$ выявлены две критические плоскости, характеризующиеся равенством радиусов пучка в ортогональных направлениях. В первой плоскости астигматическая разность фаз Γ_{ui} достигает $\pi/2$, а во второй обращается в нуль. Для обеих плоскостей установлен эффект взаимности между орбитальным угловым моментом и перекрёстным моментом интенсивности W_{xy} . Кроме того, во второй критической плоскости воспроизводится пространственная структура пучка на входе цилиндрической линзы.

На орбитальной сфере Пуанкаре распространение пучка до первой критической плоскости представлено поворотом траектории состояний на 90° , после чего происходит её обратное вращение и совмещение с исходной траекторией во второй плоскости. Установленные свойства критических плоскостей использованы для измерения полного набора орбитальных параметров Стокса неастигматических и астигматических структурированных пучков Лагерра–Гаусса.

Получено соотношение $\Gamma_{xy}=\arctan(S_3/S_2)$, связывающее астигматическую разность фаз Γ_{ui} с орбитальными параметрами Стокса, и установлен инвариант $LW = \pm\sqrt{S_2^2 + S_3^2}$, равный орбитальному угловому моменту входного пучка.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Научная новизна диссертационной работы состоит прежде всего в разработке и экспериментальной реализации метода определения всех трёх орбитальных параметров Стокса структурированных пучков Лагерра–Гаусса на основе моментов интенсивности второго порядка. Для этого регистрируются два распределения интенсивности – в фокусе сферической линзы и в плоскости двойного фокуса цилиндрической линзы. Их обработка позволяет определить орбитальное состояние исследуемого пучка и представить его на орбитальной сфере Пуанкаре.

К числу новых результатов относится также выявление в трёхлинзовой оптической системе двух критических плоскостей, в которых происходит преобразование пространственной структуры пучка. Показано, что при распространении до первой критической плоскости траектория состояний на орбитальной сфере Пуанкаре поворачивается на 90° , а между первой и второй плоскостями совершает обратное вращение. Свойства этих плоскостей положены в основу модифицированного метода определения орбитальных параметров Стокса неастигматических и астигматических структурированных пучков.

Получено выражение $\Gamma_{xy}=\arctan(S_3/S_2)$, связывающее астигматическую разность фаз Γ_{ui} с орбитальными параметрами Стокса. Кроме того, установлено, что при астигматическом преобразовании орбитальный угловой момент структурированного пучка Лагерра–Гаусса определяется не только его топологическим зарядом, но и радиальным числом. Показано, что величина $LW = \pm\sqrt{S_2^2 + S_3^2}$ сохраняется при таком преобразовании и является его инвариантом.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечиваются корректным применением методов параксиальной волновой оптики, сочетанием аналитических расчётов, численного моделирования и экспериментальных исследований. Теоретический анализ выполнен с использованием матричного ABCD-формализма, функции распределения Вигнера и матрицы моментов интенсивности второго порядка. Полученные соотношения устанавливают связь между орбитальными параметрами Стокса и непосредственно измеряемыми моментами интенсивности.

Численное моделирование выполнено для пучков с различными квантовыми числами и управляющими параметрами во всех рассмотренных конфигурациях оптических систем. Расчётные распределения интенсивности и значения орбитальных характеристик сопоставлены с экспериментальными данными. Относительная

погрешность определения параметров Стокса в первом плече установки была ниже 4%, среднеквадратичная ошибка оценки S_3 не превышала 5%, а расхождение между результатами эксперимента и компьютерного моделирования при исследовании критических плоскостей составляло не более 4%.

Таким образом, выводы опираются на согласованное применение теоретической модели, численных расчётов и экспериментальных данных. Они сформулированы в пределах параксиальной модели, исследованных семейств структурированных пучков и рассмотренных астигматических систем. Материалы диссертации и опубликованных работ дают достаточные основания считать основные результаты обоснованными и достоверными.

Теоретическая значимость диссертации состоит в обосновании метода измерения орбитальных параметров Стокса по моментам интенсивности второго порядка, который устанавливает связь между орбитальным состоянием пучка и изменениями его пространственной структуры. Показано влияние радиального числа на орбитальный угловой момент при астигматическом преобразовании и получено соотношение $\Gamma_{xy} = \arctan(S_3/S_2)$, связывающее астигматическую разность фаз Γ_{ui} с орбитальными параметрами Стокса. Отображение пучка на орбитальной сфере Пуанкаре позволило проследить его преобразование в астигматической системе: при распространении до первой критической плоскости траектория поворачивается на 90° вокруг оси S_1 . Между критическими плоскостями она вращается в обратном направлении и во второй плоскости полностью совмещается с исходной траекторией, что соответствует восстановлению исходного состояния пучка перед цилиндрической линзой.

Практическая значимость работы определяется экспериментальной реализацией метода прямого измерения орбитальных параметров Стокса и его модифицированного варианта. Разработанные методы позволяют определить все три параметра S_1 , S_2 и S_3 по зарегистрированным распределениям интенсивности без применения сложных интерферометрических или дифракционных систем. Предложенные измерительные схемы и алгоритмы могут использоваться для экспериментальной диагностики неастигматических и астигматических структурированных пучков Лагерра–Гаусса, а также контроля их орбитального углового момента. Обработку данных обеспечивают программы для ЭВМ RU2025685861 и RU2025685862, предназначенные соответственно для определения орбитальных параметров Стокса и вычисления параметров эллипса интенсивности.

Перспективными областями применения разработанных подходов являются оптическая связь, микроманипулирование, лазерная обработка материалов и исследование квантовых систем с орбитальными степенями свободы света. При этом применимость методов экспериментально подтверждена для исследованных в диссертации семейств параксиальных пучков и рассмотренных конфигураций астигматических оптических систем.

Основные результаты диссертационного исследования отражены в 15 научных работах, включая 13 статей, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. По результатам исследований зарегистрированы две программы для ЭВМ. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на девяти международных и всероссийских научных конференциях.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы и достаточно полно отражает её основные положения и результаты.

Отмечая положительные стороны диссертации Халилова С.И., следует обратить внимание на следующие **замечания**:

1. Можно отметить небольшую неструктурированность изложения: в частности, в первой главе результаты эксперимента приведены до описания схемы эксперимента

2. Имеет место использование нестандартных терминов: например, "шаг пикселя", хотя более употребим термин "размер пикселя", или "субматрица", хотя более употребим термин "подматрица"

3 Глава 1.2.3, описание рисунка 11 в тексте: регистрация осуществляется на CMOS_2, а не CMOS_1. Также в тексте нет описания назначения CMOS_1 и BS

4. В третьем выводе по первой главе сказано, что поворот цилиндрической линзы позволяет управлять ОУМ, величина которого может превышать сумму радиального и азимутального квантовых чисел, однако пример получения такого ОУМ в главе не приведен

5. В тексте диссертации иногда встречается слово "наши" в отношении проведенного исследования

6. Встречается разделение десятичной части числа точкой: например, на стр. 46 или стр. 115

7. Встречаются несогласованные предложения: например, стр. 32 после уравнения (22), первые предложения вторых абзацев на стр. 41 и 74, первое предложение гл. 2.3.2 и т.д.

8. Некоторые цитируемые русскоязычные источники приведены в списках литературы диссертации и автореферата на английском языке.

Сделанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают основные защищаемые положения и сформулированные выводы, то есть не снижают научную и практическую ценность полученных результатов.

Диссертация Халилова Сервера Искандаровича «Определение орбитальных параметров Стокса структурированных пучков Лагерра-Гаусса» соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Халилов Сервер Искандарович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – «Оптика».

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук, доцент
Старший научный сотрудник лаборатории
лазерных измерений

Отделение «Институт систем обработки
изображений – Самара» Курчатовского
комплекса кристаллографии и фотоники
федерального государственного бюджетного
учреждения «Национальный исследовательский
центр «Курчатовский институт»



Стафеев Сергей Сергеевич

«02» сентября 2026 г.

Контактные данные:

Отделение «Институт систем обработки изображений – Самара» Курчатовского
комплекса кристаллографии и фотоники федерального государственного бюджетного
учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Почтовый адрес: 443001, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 151

Телефон: (846) 332-57-87

E-mail: stafeev@ipsiras.ru

Собственноручную подпись
заверяю:

Стафеев Сергей Сергеевич
ведущий специалист



О.В. Ашихмина