

## **Отзыв**

официального оппонента на диссертацию и автореферат  
Ильиных Сергея Петровича  
на тему: «Методы и алгоритмы высокоразрешающих оптико-электронных систем с пошаговым фазовым сдвигом»  
по специальности 2.2.6 (05.11.07) – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы  
на соискание ученой степени доктора технических наук

### **Актуальность темы диссертации**

Удовлетворить всевозрастающий интерес к созданию, исследованию и применению микро- и наноустройств и материалов в различных областях науки и техники невозможно без наличия соответствующих измерительных инструментов и средств. Оптико-электронные системы интерференционного типа с фазовым сдвигом являются широко используемым средством для прецизионных измерений в различных областях науки и техники. В настоящее время совершенствование данных систем идет по пути разработки новых методов и алгоритмов, позволяющих измерять характеристики микро- и наноустройств и параметры материалов с высокой производительностью, малыми погрешностями и большой разрешающей способностью. Поэтому решаемые в диссертационной работе задачи создания высокоразрешающих оптико-электронных измерительных систем являются весьма актуальными.

### **Новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Новизна выполненной работы состоит, в частности, в создании обобщенного метода расшифровки интерференционных сигналов в оптико-электронных измерительных системах с пошаговым фазовым сдвигом, что позволяет с единых позиций выполнять анализ существующих и вновь разрабатываемых алгоритмов интерференционных оптических измерений.

Автором синтезирована оптимальная по количеству фазовых сдвигов формула расшифровки интерференционных картин, устойчивая к нелинейности профиля интерференционных сигналов.

Им предложен помехоустойчивый табличный метод развертывания фазы по набору многочастотных интерференционных сигналов; при этом погрешность фазовых измерений не зависит от числа используемых частот.

В работе также разработаны и научно обоснованы методы преобразования траектории интерференционных сигналов, что позволяет устранить влияние неточности задания фазовых сдвигов в оптико-электронных измерительных системах.

Предложенные С.П. Ильиных методы направлены на повышение пространственного разрешения оптико-электронных интерференционных измерительных систем и их быстродействия, позволяя производить измерения в режиме реального времени и в отсутствие априорной информации о фазовых сдвигах.

Кроме того, автором была показана возможность высокоточного измерения параметров напряженно-деформируемого состояния крупногабаритных объектов.

Оригинальность и новизна выполненных исследований и полученных результатов подтверждаются публикациями в российских и зарубежных журналах, патентом РФ, свидетельствами о регистрации в Роспатенте программ для ЭВМ, а также выступлениями на российских и международных конференциях.

### **Значимость для науки и практики полученных автором диссертации результатов**

Научное значение диссертационной работы заключается в возможности совершенствования оптико-электронных измерительных систем с пошаговым фазовым сдвигом на основе разработанных автором теории траекторного анализа и обобщенного метода расшифровки набора интерференционных сигналов.

Практическая значимость заключается в целесообразности применения полученных результатов и выводов диссертации в деятельности предприятий и научных исследованиях. Об этом свидетельствуют представленные в диссертации акты о внедрении и использовании полученных автором результатов и сделанных выводов.

О значимости результатов исследований Ильиных С.П. для фундаментальной науки свидетельствует их поддержка четырьмя грантами РФФИ, а также их соответствие приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники, утвержденных соответствующими указами Президента Российской Федерации.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты диссертации могут представлять интерес как при разработке и модернизации оптико-электронных измерительных систем с пошаговым сдвигом на предприятиях, таких как ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», АО «НПО ГИПО», ФГУП «НИИОФИ» и других, так и в учебном процессе, при преподавании таких дисциплин, как «Информационно-измерительные и управляющие системы (в промышленности)» и «Оптические и голографические информационно-измерительные системы», и выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ студентами университетов

НГТУ, ТУСУР, НИ ТПУ, НИ ТГУ и других, при подготовке по направлениям «Приборостроение», «Оптехника», «Лазерная техника и лазерные технологии», «Фотоника и оптоинформатика», а также в системе повышения квалификации специалистов соответствующих профилей. Они также могут быть использованы при проведении дальнейших исследований в области совершенствования измерительных систем, приборов и комплексов, основанных на интерферометрических методах, в указанных выше университетах и учреждениях РАН, таких как ИАЭ СО РАН, ИОА СО РАН, ИМКЭС СО РАН.

#### **Достоверность полученных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций**

обеспечивается корректным использованием автором современных представлений о методах анализа интерференционных картин в оптико-электронных измерительных системах, а также соответствующих математических моделей; применением апробированных подходов к математическому моделированию и алгоритмов теоретического анализа, основанных на математическом аппарате аналитической и дифференциальной геометрии; согласием теоретических предсказаний с экспериментальными данными автора; использованием методов математической статистики при обработке результатов натуральных и компьютерных экспериментов.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, базируется на адекватном использовании предшествующих результатов, теоретическом анализе в рамках принятых приближений и грамотном применении методов численного моделирования, корректной оценке погрешностей измерения фазы при расшифровке интерференционных картин и рассмотрении способов устранения влияния нелинейности профиля интерференционных полос на данные по расшифровке картин интерференции, экспериментальной демонстрации решения ряда научно-прикладных задач на основе разработанных методов и алгоритмов.

#### **Оценка содержания диссертации и ее завершенности**

Диссертация Ильиных С.П. состоит из введения, пяти глав, заключения и общих выводов. Объем диссертации составляет 320 страниц, включая 33 таблицы, 142 рисунка. Соискателем сформулированы выводы после каждой из пяти глав, а также сделаны общие выводы по результатам всей работы. В

приложении приведены акты о внедрении, а также 1 патент и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ в Роспатенте.

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируется цель и задачи диссертационного исследования, отражаются сведения о его научной новизне и практической значимости; приводятся положения, выносимые на защиту. Здесь же рассмотрены существующие методы и алгоритмы анализа интерферограмм и указано на эффективность метода фазовых сдвигов (шагов) при решении широкого круга интерференционных задач, а также дается информация о личном вкладе автора и апробации работы.

**В первой главе** предложен обобщенный метод построения формул расшифровки интерференционных картин с фазовыми шагами, не требующий явного решения системы трансцендентных уравнений. Это позволяет значительно уменьшить время измерения двумерного фазового распределения. Автором проанализировано 25 известных формул расшифровки интерференционных картин с фазовыми шагами и показано, что известные алгоритмы могут быть построены путем формирования структурной матрицы такой системы. Им также предложен здесь новый метод анализа одной интерференционной картины с использованием псевдофазовых сдвигов. По материалам главы сделаны выводы, которые представляются обоснованными.

**Во второй главе** методом компьютерного моделирования исследовано влияние неточности установки фазовых сдвигов и других параметров интерференционных сигналов на погрешность измерения фазы. Предложены модели погрешностей, учитывающие структуры формул расшифровки и рассмотрены методы оценки основных параметров интерферограмм.

Важным результатом анализа является найденная С.П. Ильиных оптимальная по числу фазовых сдвигов формула расшифровки, позволяющая в 20 раз уменьшить влияние нелинейности профиля интерференционных полос на результаты расшифровки.

Им также предложен новый скоростной двухмерный метод повышения латеральной разрешающей способности цифровых голограмм на основе субпиксельного сканирования. В результате его использования разрешение цифровых голограмм с 150-250 лин/мм может быть повышено до уровня 1000-2000 лин/мм. Выводы по второй главе являются обоснованными и достоверными.

**Третья глава** посвящена рассмотрению нового подхода к анализу интерференционных сигналов, получаемых в оптико-электронных интерференционных измерительных системах с фазовыми сдвигами. Метод основан на представлении набора интерференционных сигналов, получаемых с различными фазовыми сдвигами, в виде их пространственной эллиптической траектории. Предложено два метода преобразования такой траектории в круговую. Отличительной чертой такого подхода является возможность оценки фазы при неизвестных величинах вносимых фазовых

сдвигов, при этом ошибка в измерении фазы не превышает погрешности квантования интерференционных сигналов.

**В четвертой главе** автором рассмотрены различные методы решения проблемы фазовой неопределенности в интерферометрии. Им предложены и реализованы методы повышения устойчивости и быстродействия таких методов. Разработанные алгоритмы построены по каскадной схеме, что позволяет значительно повысить их производительность в сравнении со стандартными схемами. Так, при размерах фотоприемной матрицы 1400x800 пикселей, быстродействие составило менее 1/30 сек, что позволяет исследовать многие динамические процессы. Характерно, что в отличие от известных многочастотных методов, погрешность измерения фазы на основе предлагаемых автором подходов не зависит от числа используемых частот.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментальных исследований по применению разработанных Ильиных С.П. методов и алгоритмов для решения прикладных задач механики. Им решались следующие задачи.

1. Измерение поля смещения плоского объекта методами цифровой голографической интерферометрии. В экспериментах измерялось смещение плоской пластины с шероховатой поверхностью. Было получено, что при смещении объекта на 15 мкм погрешность измерения поля смещения плоского объекта не превышала 0.1 %.

2. Исследование прогиба мембраны в режиме реального времени. Автором использовались разработанные в работе методы измерения интенсивностей опорного и предметного пучков, что позволило рассчитать комплексную функцию, характеризующую голограмму. Показано, что сравнение голограмм двух различных состояний объекта позволяет измерять деформации мембраны в режиме реального времени.

3. Исследование напряженно-деформируемого состояния крупногабаритных объектов методом структурированного освещения. В данном случае при размерах измеряемого объекта более 50 см погрешность измерения рельефа не превышала 10 мкм. Это позволяет использовать данный метод для измерения микроперемещений крупногабаритных объектов.

4. Исследование возможности повышения пространственного разрешения цифровых голограмм методом субпиксельного сканирования. При исходном пространственном разрешении фотокамеры 300 и 500 лин/мм здесь в итоге получено разрешение 1382 и 2059 лин/мм.

**В заключении** приводятся основные результаты работы и выводы, которые представляются надежно обоснованными.

В числе **недостатков диссертации** отмечу следующие.

1. Рассмотренные в диссертации подходы к анализу интерференционных картин, реализуемых в двухлучевых оптико-электронных системах,

ограничиваются скалярным приближением для светового поля и отсутствием дислокаций волнового фронта в интерферирующих пучках. Как векторный характер электромагнитного излучения, который должен проявляться, в частности, при интерферометрических исследованиях неоднородностей показателя преломления в кристаллических образцах, будет влиять на возможность восстановления вносимых фазовых сдвигов, автором не обсуждается. Не рассматриваются и особенности расшифровки картин интерференции сингулярных световых пучков.

2. На рис. 5.1.1 рассеивающая линза, формирующая объектный пучок, изображена как положительная (собирающая).

3. В третьем защищаемом положении (стр. 150) не определены границы, определяющие понятие «низкого разрешения» - разве оно в данной формулировке может быть любым?

4. Хотя диссертация написана хорошим грамотным языком, её оформлению автор не уделил должного внимания. В частности, в предложении перед формулой (1.1.10) (стр. 28) пропущено слово «интенсивность»; в формулах (2.2.3) (стр. 84) функции  $\sin$  и  $\cos$  набраны прямым шрифтом, а для тангенса почему-то используется наклонный шрифт; рисунок с номером 5.3.5 встречается дважды – на стр. 271 и стр. 272.

## Заключение

В диссертации последовательно излагаются все основные результаты, что позволило автору обосновать выводы по работе и положения, выносимые на защиту. Рассматриваемая диссертационная работа является завершённым научно-исследовательским трудом, достойным претендовать на получение докторской степени по техническим наукам. Она характеризуется внутренним единством структуры, основанном на последовательном и многостороннем рассмотрении методов и алгоритмов, необходимых для реализации высокоразрешающих оптико-электронных систем с пошаговым фазовым сдвигом. Полученные в ней результаты свидетельствуют об их соответствии поставленной цели и задачам.

Недостатки, отмеченные выше, не влияют на общую **положительную оценку работы**, которая выполнена на высоком научном и техническом уровне и вносит весомый вклад в развитие оптико-электронных измерительных систем, основанных на интерференционных методах. Диссертация базируется на достаточном числе исходных данных, примеров и расчетов. По каждой главе и работе в целом автором сделаны достаточно четкие выводы.

**Текст диссертации соответствует как по содержанию, так и по качеству материалам, опубликованным автором в 54 печатных работах, в том числе в 25 статьях в журналах из перечня ВАК и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 1 патенте РФ на полезную модель, 2 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ. Они неоднократно обсуждались на Российских и**

Международных конференциях и получили одобрение ведущих специалистов в области оптико-электронных систем.

**Автореферат** соответствует всем требованиям ВАК Минобрнауки РФ, правильно и полно отражая основное содержание диссертации.

Таким образом, диссертация Ильиных С. П. является научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические решения по проблеме создания электронно-оптических измерительных систем с пошаговым фазовым сдвигом, обладающих расширенными функциональными возможностями и высокими точностными характеристиками. Внедрение этих решений вносит значительный вклад в развитие страны, что соответствует п. 9 действующего «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (с изменениями от 21.04.2016 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор, Ильиных Сергей Петрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.6 (05.11.07) – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

**Официальный оппонент,**

Шандаров Станислав Михайлович

профессор кафедры электронных приборов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», доктор физико-математических наук (01.04.03 – Радиофизика), профессор по кафедре электронных приборов



Шандаров Станислав Михайлович

Тел.: 8 (3822) 41-38-87

e-mail: [stanislav.m.shandarov@tusur.ru](mailto:stanislav.m.shandarov@tusur.ru)

30 декабря 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (просп. Ленина, 40, Томск, Томская область, 634050, тел.: 8 (3822) 51-05-30, e-mail: [office@tusur.ru](mailto:office@tusur.ru) <https://www.tusur.ru>

Подпись <sup>доктора</sup> физико-математических наук, профессора Станислава Михайловича Шандарова УДОСТОВЕРЯЮ:

Нач. общего отдела  
Телефон: 8 (3822) 51-32-62



С.В. Мощанская