

«УТВЕРЖДАЮ»

ФГБУН КТИ НП СО РАН

Директор



К. т. н. Завьялов П. С.

«*Завьялов*» 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук» (КТИ НП СО РАН) на диссертационную работу Ильиных Сергея Петровича «Методы и алгоритмы высоко разрешающих оптико-электронных систем с пошаговым фазовым сдвигом», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.11.07 (2.2.6) – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Актуальность работы

Измерение деформаций и рельефа поверхности объектов оптическими бесконтактными методами в автоматическом режиме с высокой точностью является важной задачей при контроле продукции промышленного производства. Широкое использование нанотехнологий и наноматериалов в мировом и отечественном промышленном производстве, постоянно растущие требования по контролю качества промышленных изделий машиностроения, электроники и точной механики делают оптическую интерферометрию одним из наиболее перспективных направлений современного приборостроения. Существующие интерференционные методы и средства измерений деформаций и рельефа применяются для решения широкого круга задач неразрушающего контроля в метрологии,

промышленности и научных исследованиях. В настоящее время многие зарубежные фирмы (Zeiss – Германия, Zygo, Veeco – США и др.) предлагают широкий спектр интерферометрических систем. Но они в основном предназначены для работы в лабораторных условиях. В России также ведутся исследования по интерференционным измерениям. В основном они ориентированы на применение уже известных методов для решения конкретных задач и не могут обеспечить возрастающие потребности промышленности. Оптико-электронные системы интерференционных измерений с фазовым сдвигом, базируются на предположении о косинусоидальном характере интерференции и требуют точного задания вносимых фазовых сдвигов. Несоблюдение этих условий приводит к низкой производительности, снижению разрешающей способности по высоте и большой погрешности измерений. Необходимость обеспечения в интерферометрах прецизионного сдвига в большом диапазоне приводит к заметному усложнению их конструкции. Высокая цена таких систем ограничивает их доступность для широкого круга пользователей. Это требует создания новых методов и алгоритмов, позволяющих измерять деформации и рельеф поверхностей с высокой производительностью, меньшей погрешностью и большей разрешающей способностью, которые позволяют значительно продвинуться в данном направлении. Поэтому решаемые в диссертационной работе задачи являются актуальными.

Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. В диссертационной работе впервые:

1. Предложен и научно обоснован обобщенный метод оценки фазы интерференционных сигналов в оптико-электронных измерительных системах с пошаговым фазовым сдвигом. Показано, что существующие алгоритмы расшифровки интерференционных картин являются следствием предлагаемого метода.

2. Предложены и научно обоснованы методы преобразования траектории интерференционных сигналов в оптико-электронных измерительных системах, позволяющие устранить влияние неточности задания фазовых сдвигов.

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

4. Предложен метод повышения пространственного разрешения оптико-электронных интерференционных измерительных систем с повышенным быстродействием, позволяющий производить измерения в режиме реального времени.

5. Предложен помехоустойчивый алгоритм развертывания фазы по совокупности многочастотных интерференционных сигналов.

6. Предложен метод измерения фазы интерференционных сигналов, не требующий априорной информации о фазовых сдвигах.

7. 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 совершенствовании оптико-электронных измерительных систем с пошаговым фазовым сдвигом на основе разработанных автором теории траекторного анализа и обобщенного метода расшифровки совокупности интерференционных сигналов.

Практическая значимость заключается в целесообразности применения полученных результатов и выводов диссертации в деятельности предприятий. Об этом свидетельствуют представленные в диссертации акты о внедрении и использовании полученных результатов и выводов диссертационного исследования.

Связь темы диссертации с научно-техническими программами

Результаты диссертационного исследования Ильиных С.П. нашли отражение в научно-исследовательских работах, выполненных в Новосибирском государственном техническом университете под руководством и с участием автора:

1. Грант РФФИ 06-08-00616-а «Разработка и исследование высокоточных прецизионных интерференционных систем для измерения объектов со сложной формой рельефа», 2006-2008 гг.:

- разработаны теоретические основы высокоточных интерференционных систем с расширенным динамическим диапазоном;

- разработаны и практически реализованы структуры оптико-электронных измерительных систем для широкого круга приложений.

2. Грант РФФИ 14-08-01100А «Цифровая голографическая интерферометрия реального времени для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния динамических объектов», 2014-2015г.г. Разработана цифровая голографическая система, обеспечивающая контроль динамических объектов в режиме реального времени, с высокой точностью и большим динамическим диапазоном.

3. Грант РФФИ №16-08-00565-а «Разработка методов сверхразрешения в цифровой голографической интерферометрии» (№ гос. регистр. АААА-А16-116020210337-0, 2017 г.), использованы следующие направления диссертационного исследования Ильиных С.П.:

- разработан и внедрен метод повышения пространственного разрешения оптико-электронных интерференционных измерительных систем с повышенным быстродействием, позволяющего производить измерения в режиме реального времени (защищено патентом РФ на полезную модель № 181750 МКИ G01 В9/021 Цифровое голографическое устройство).

- разработанный Ильиных С.П. метод позволяет повысить латеральное разрешение оптико-электронных интерференционных измерительных систем до 1000 и 2000 линий/мм по вертикали и горизонтали, соответственно, что существенно повышает качество методов цифровой голографической интерферометрии.

4. Грант РФФИ №18-08-00580-а «Разработка и исследование методов компьютерной голографической интерферометрии объектов сложной формы» № гос. регистр. АААА-А18-118030290031-0, 2019 г.:

- разработан новый метод измерения полей смещений, не зависящий от сложности рельефа объекта (с перепадами высот значительно превышающими длину волны лазерного излучения). Особенностью метода является то, что погрешность измерения поля смещений объекта от деформаций не зависит от расстояния до измеряемого объекта.

- разработаны новые алгоритмы расшифровки интерференционных картин не чувствительные к искажениям профиля интерференционных полос и неточности установки фазовых сдвигов.

- разработан новый метод анализа цифровых голограмм. Использование добавочной информации об интенсивности интерферирующих пучков позволяет обеспечить высокую точность при восстановлении фазовой информации.

- На основе технологии OpenCl разработано эффективное программное обеспечение, позволяющее выполнять измерения с помощью графических ускорителей в режиме реального времени (время измерений сопоставимо с частотой ввода изображений и составляет, не более 1/30 сек) с непосредственным отображением результатов измерения в удобном виде на экране монитора. Это позволяет производить измерение и одновременное наблюдение хода динамических процессов при исследовании напряженно-деформируемого состояния промышленных и биологических объектов.

- реализована цифровая голографическая система, позволяющая измерять смещения объекта под действием нагрузки, не зависимо от сложности его рельефа.

5. Программа стратегического развития НГТУ на 2012 г., проект 2.3.1 «Решение комплексных проблем по направлению «Информационные и цифровые технологии и системы», НИР С2-7:

- разработана и исследована цифровая оптико-электронная измерительная система контроля напряженно-деформируемого состояния крупногабаритных объектов.

- создан программно-алгоритмический комплекс, позволяющий выполнять измерения в режиме реального времени. Система позволяет измерять отклонения поверхности крупногабаритных объектов с микрометровой точностью.

Полученные результаты полностью соответствуют Указу Президента Российской Федерации от 07.07.2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (в редакции Указа Президента Российской Федерации от 16.12.2015 г. № 623)»

Рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования

Ведущая организация рекомендует использовать основные результаты и выводы исследования:

1. При разработке и модернизации оптико-электронных измерительных систем на предприятиях и организациях г. Новосибирска: АО «Новосибирский приборостроительный завод», Западно-Сибирский филиал «Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ») и других профильных организациях и предприятиях.

2. В учебном процессе для преподавания таких дисциплин, как «Информационно-измерительные и управляющие системы (в промышленности)» и «Оптические и голографические информационно-измерительные системы» студентам вузов технических специальностей. При подготовке бакалавров, специалистов и магистров по направлению «Приборостроение», а также в системе повышения квалификации специалистов соответствующих профилей.

3. Для дальнейших исследований в области совершенствования измерительных систем и приборов, систем и комплексов с использованием электромагнитного излучения оптического диапазона волн.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается большим объемом проведенных исследований (исследовано 25 существующих алгоритмов расшифровки интерференционных картин).

Разработанные методы и алгоритмы анализа интерференционных картин научно обоснованы и подтверждены экспериментальными исследованиями.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Текст автореферата полностью отражает содержание диссертации и защищаемые научные положения.

Подтверждения опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 54 научных работах, из них работ, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук (перечень ВАК) –25, из них в научных

изданиях, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science – 16; в научных изданиях также индексируемых этими базами – 17 в следующих изданиях: Автотметрия (Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing), Дефектоскопия, Инженерный вестник Дона, Научный Вестник Новосибирского Государственного Технического Университета, Омский научный вестник, Оптика и Спектроскопия (Holographic nondestructive quality control of composite cylindrical shells), Optical Engineering (США). Получены 1 патент РФ на полезную модель и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Основные результаты диссертации также докладывались на всероссийских и международных конференциях: Всесоюзный симпозиум «Применение лазеров», Куйбышев, 1990 г., Научно-технич. конф. «Проблемы железнодорожного транспорта и транспортного строительства Сибири», 1997, 4th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. – Republic of Korea, Ulsan, 2000, Seventh International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life, 2002, VIII международная НТК «Оптические методы исследования потоков», 2005, Третья международная научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», 2007, DST-RFBR Sponsored Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and modern heuristics in automation and robotics, (2010, 2011), Международная НПК «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий»: Качество – Безопасность – Диагностика (ИНФО – 2010, 2016, 2017), The 6-th International Forum on Strategic Technologies, 2011, 2016, Международная научно-практическая конференция «Инновационные информационные технологии» (I2T), 2012, 2013, 2014, 2016, The 7-th International Forum on Strategic Technology IFOST-2012, 2016, International Conference on actual problem electronics instrument engineering (APEIE), 2012, 2014, 2016, 2018, Международная научная конференция «СибОптика-2013, 2018», International summer school computer science : proc. of summer school, Germany, Chemnitz, 7–13 Juli 2014, V междунар. науч.-практ. конф., Махачкала, 2014, Inter-national Siberian conference on control and communications (SIBCON–2015), Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний: методы и средства», Новосибирск, 2017, 2018, Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2018, Information innovative technologies : materials of the intern.

sci.-practical conf., Czech Republic, Prague 2018, 1 International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, 10-11 Dec. 2020.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

Тема и содержание диссертационной работы, соответствуют паспорту научной специальности 2.2.6 (05.11.07) – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы, ее формуле «... специальность в области науки и техники, занимающаяся использованием оптического диапазона электромагнитных волн для создания исследовательских, измерительных, ... и технологических приборов, систем ..., а также разработкой способов применения таких приборов, систем Значение решения научных и технических проблем в данной области состоит в создании новых методов и аппаратуры для физических исследований с использованием оптического излучения, высокоточных измерений, ... и решения других задач народнохозяйственного и оборонного назначения, требующих использования оптической и оптико-электронной техники» и областям исследований, обозначенных в пунктах:

«1. Исследование и разработка новых методов и процессов, которые могут быть положены в основу создания оптических и оптико-электронных приборов, систем и комплексов различного назначения».

«2. Разработка, совершенствование и исследование характеристик приборов, систем и комплексов с использованием электромагнитного излучения оптического диапазона волн, предназначенных для решения задач:

- измерения геометрических и физических величин;
- исследования и контроля параметров различных сред и объектов, в том числе при решении технологических, экологических и биологических задач;
- создания оптического и оптико-электронного оборудования для научных исследований в различных областях науки и техники».

Оценка содержания диссертации, её завершенность в целом, замечания по оформлению

Представленная работа имеет завершенную логичную структуру и состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения и списка литературы, включающего 264 наименования. Общий объем работы – 320

страниц машинописного текста, в том числе 33 таблицы, 142 рисунка и 1 приложение.

Во введении обосновывается актуальность диссертационного исследования, дана оценка степени разработанности темы диссертационного исследования, четко сформулирована цель и соответствующие ей задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается обобщенный метод построения формул расшифровки интерференционных картин с произвольными величинами фазовых сдвигов (методы, основанные на преобразовании Фурье, методы Carré и методы с кратными фазовыми сдвигами). Выполнен анализ алгоритмов расшифровки интерференционных картин. Показано, что существующие алгоритмы являются следствием обобщенного метода. Рассмотрена возможность применения принципов метода фазовых сдвигов для анализа одной интерференционной картины.

Во второй главе рассмотрены вопросы исследования влияния различных факторов на погрешность измерения фазы. Предложены модели погрешностей, учитывающие структуры формул расшифровки. Рассмотрены методы оценки основных параметров интерференционных картин. Предложены способы повышения латеральной разрешающей способности и устранения влияния нелинейности профиля интерференционных полос на результаты расшифровки интерференционных картин.

Третья глава посвящена рассмотрению нового подхода к анализу интерференционных сигналов, получаемых в оптико-электронных интерференционных измерительных системах, основанного на анализе траектории в пространстве их интенсивностей. Предложены методы преобразования эллиптической траектории в круговую путем преобразования интенсивностей интерференционных картин таким образом, чтобы эллиптическая траектория проецировалась на некоторую плоскость в виде круга. Такой подход не требует априорного знания вносимых фазовых сдвигов, а, следовательно, не требует их оценки.

В четвертой главе рассмотрены методы решения проблемы фазовой неопределенности в интерферометрии. Предложенные алгоритмы восстановления полной фазы просты, легко автоматизируются и позволяют

обеспечить динамический диапазон измерений до сотен длин волн без потери интерферометрической точности.

В пятой главе экспериментально исследуются разработанные алгоритмы анализа и расшифровки интерференционных картин путем решения ряда прикладных задач интерферометрии:

1. Измерение поля смещения плоского объекта методами цифровой голографической интерферометрии;
2. Исследование прогиба мембраны в режиме реального времени;
3. Исследование напряженно-деформируемого состояния крупногабаритных объектов методом структурированного освещения;
4. Исследование возможности повышения пространственного разрешения интерференционных изображений.

В заключении диссертации корректно сформулированы выводы и практические рекомендации.

В ходе ознакомления с диссертационной работой возникли следующие вопросы и замечания:

1. В диссертации широко используется термин «высокоразрешающий» - однако его точного определения не приводится. Поэтому не понятно, что автор подразумевает под этим понятием.

2. Полученные диссертантом теоретические результаты не в достаточной степени подтверждены экспериментом.

3. Указанные диссертантом погрешности измерений (стр. 266) правильно было бы назвать расчётными, поскольку система не сертифицирована как средство измерения.

4. При оценке результатов экспериментальных исследований (Глава 5 - стр. 256 - 282) отсутствуют сведения о повторяемости результатов измерений.

5. На стр. 283 указано, что точность метода структурированного освещения – не хуже ± 5 мкм. Автор, по-видимому, имел ввиду погрешность измерений систем со структурированным освещением.

6. Не перечислены предприятия и организации, заинтересованные в результатах диссертационной работы.

К замечаниям по оформлению диссертации можно отнести следующее:

- в диссертации с самого начала нарушен принятый порядок нумерации ссылок на литературу;

- номер рисунка на стр. 110 не содержит указания на раздел;

- следовало более подробно описать рисунки 1.71 (стр. 77) 2.6.10 (стр. 136, 137) и 2.6.11 (стр. 137);

- в подрисуночной подписи рисунка 3.3.5 неверная ссылка на предыдущий рисунок;

- неверная нумерация таблицы 5.2.1 (стр. 264);

- на стр. 286 имеет место повторение текста: «В диссертации поставлена и решена крупная научная проблема...».

Указанные замечания не снижают ценности проделанной автором работы и ее положительной оценки. В целом диссертация Ильиных С.П. выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченное научное исследование в области оптико-электронных приборов и комплексов, в ходе которого получены новые, оригинальные методы и алгоритмы высокоразрешающих оптико-электронных систем с пошаговым фазовым сдвигом.

Результаты работы полностью и своевременно опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, прошли апробацию в виде докладов на многих конференциях. Автореферат диссертации полно и верно отражает содержание работы. Язык диссертации – чёткий, ясный.

Заключение

В диссертации поставлена, обоснована и решена крупная научно-техническая проблема создания аппаратно-программных измерительных систем, обладающих расширенными функциональными возможностями и высокими точностными характеристиками, ориентированных на применение в научных экспериментах и в промышленных технологиях, что имеет существенное значение для оптической и голографической интерферометрии. Диссертационная работа полностью отвечает п.п. 9 – 14 действующего «Положения о порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 (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 учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.6 (05.11.07) – Оптико-электронные приборы и комплексы.

Отзыв на диссертацию Ильиных С.П. «Методы и алгоритмы высокоразрешающих оптико-электронных систем с пошаговым фазовым

сдвигом» обсужден и утвержден на расширенном заседании Научно-технического совета КТИ НП СО РАН 21 декабря 2021 года, протокол № 9.

Научный руководитель КТИ НП СО РАН
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ,
Юрий Васильевич Чугуй
E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Подпись научного руководителя
КТИ НП СО РАН,
д.т.н., профессора Чугуя Ю.В.
удостоверяю:



Заведующий канцелярией КТИ НП СО РАН

Ирина Викторовна Троянова

21 декабря 2021 года

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН)

Адрес: 630058, г. Новосибирск-58,

ул. Русская 41, тел. (383)306-62-08

E-mail: info@tdisie.nsc.ru

<https://www.tdisie.nsc.ru/>