

**На правах рукописи**

**Хайдуков Дмитрий Сергеевич**

**РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА  
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КАРТИН С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ ФАЗОВЫМИ  
СДВИГАМИ**

Специальность:

05.11.16 — Информационно-измерительные и управляющие системы

(в промышленности)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Гужов Владимир Иванович

Официальные оппоненты: Герасимов Сергей Иванович,  
доктор технических наук, профессор,  
Сибирский государственный университет  
путей сообщения, заведующий кафедрой  
«Строительная механика»

Полещук Александр Григорьевич,  
доктор технических наук,  
Институт автоматизации и электрометрии СО  
РАН, заведующий лабораторией  
дифракционной оптики

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Сибирский  
государственный университет геосистем и  
технологий», г. Новосибирск

Защита диссертации состоится «31» марта 2015 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте <http://www.nstu.ru>.

Автореферат разослан «25» февраля 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Чехонадских Александр Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Измерительные задачи, связанные с количественной и качественной оценкой геометрических параметров рельефа поверхности объектов, порождают актуальную проблему метрологического обеспечения. В высокоточных отраслях промышленности активно используются методы бесконтактного контроля. Методы бесконтактного контроля позволяют определять характеристики объектов, не причиняя им ущерба в процессе измерений. Широкое распространение получили измерительные системы, основанные на интерференционных принципах. Традиционно такие системы включают в себя интерферометр, который является первичным преобразователем, устройства регистрации и систему обработки данных. За последнее время оптические схемы интерферометров практически не изменяются и основной прогресс в достижении предельных точностных характеристик обеспечивают системы обработки данных, в задачу которых входит расшифровка регистрируемых в процессе измерений интерференционных картин, а также представление результатов измерения в удобном для человека виде.

Таким образом, исследование и разработка новых алгоритмов расшифровки интерференционных картин и создание информационно-измерительных систем бесконтактного контроля на их основе является актуальной задачей при промышленном производстве изделий, требующих высокой точности при изготовлении.

**Степень разработанности.** Бесконтактное измерение рельефа поверхности на основе принципа интерференции является современной областью исследования. Регистрируемые в ходе измерений интерференционные картины содержат большой объем информации, который должен быть обработан и расшифрован для получения качественных и количественных

оценок. Для этого необходимы компьютерные системы, в задачу которых входит получение информации, ее преобразование, обработка, расшифровка и представление результатов в соответствующем виде. Стоимость оптической установки в современных интерференционных измерительных системах составляет не более половины от общей стоимости всей системы. В настоящее время наблюдается тенденция к дальнейшему увеличению доли электронных блоков и программного обеспечения для расшифровки интерференционных картин.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является исследование и улучшение алгоритмов расшифровки в интерференционных измерительных системах, основанных на фазовом сдвиге, и разработка измерительной системы на основе этих алгоритмов.

**Задачи исследования.** В ходе исследования для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать существующие алгоритмы расшифровки интерференционных картин в измерительных системах на основе пошагового фазового сдвига.
2. Разработать новые алгоритмы расшифровки интерференционных картин в измерительных системах на основе пошагового фазового сдвига в условиях отсутствия информации о реальной величине вносимых фазовых сдвигов.
3. Разработать программное обеспечение, реализующее предлагаемые алгоритмы расшифровки интерференционных картин.
4. Разработать измерительную систему и экспериментально исследовать предлагаемые алгоритмы расшифровки для реальных интерференционных картин.

**Научная новизна.** Наиболее значимые научные результаты работы:

1. Обобщенный алгоритм расшифровки интерференционных картин в методе пошагового фазового сдвига, позволяющий конструировать формулы расшифровки, не прибегая к решению систем тригонометрических уравнений.

2. Двухточечный метод расшифровки интерференционных картин на основе анализа траекторий интерференционных сигналов, устойчивый к погрешностям задания фазового сдвига.

3. Алгоритм расшифровки по трем интерференционным картинам в фазосдвигающей интерферометрии, не требующий априорной информации о величине вносимых фазовых сдвигов.

**Методы исследования.** В ходе исследования были использованы методы компьютерного моделирования интерференционных картин, аналитической геометрии, тригонометрии, приближения функций, математической статистики, цифровой обработки изображений.

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся:

1. Обобщенный алгоритм расшифровки интерференционных картин на основе метода пошагового фазового сдвига, позволяющий конструировать формулы расшифровки для произвольного числа фазовых сдвигов без решения системы тригонометрических уравнений.

2. Алгоритм определения фазовых сдвигов, основанный на анализе траектории интенсивностей интерференционных картин с различными фазовыми сдвигами в двух точках изображения.

3. Алгоритм расшифровки интерференционных картин, не требующий априорной информации о реальной величине вносимых фазовых сдвигов в интерференционных измерительных системах на основе пошагового фазового сдвига.

4. Программное обеспечение, реализующее разработанные алгоритмы расшифровки интерференционных картин в измерительных системах.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Содержание диссертации соответствует п.6 области исследований «Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов

построения и технических решений» паспорта специальности 05.11.16 — Информационно-измерительные и управляющие системы (в промышленности).

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и адекватность полученных результатов подтверждается согласованностью результатов численных и натуральных экспериментов, проведённых в ходе данного исследования, а также заключениями экспертных комиссий при презентации данной работы на российских и международных конференциях и научных школах.

Основные положения и результаты данной работы были представлены на 7-м международном форуме по стратегическим технологиям IFOST 2012 (The 7-th International Forum on Strategic Technology - September 17-21, 2012, Tomsk), школе молодых учёных САИТ-2011 (г. Новосибирск), 10-й Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (3-5 декабря 2010 г., Новосибирск), 12-й Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (29 ноября – 2 декабря 2012 г., Новосибирск), 11-й международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», 3-й международной летней школе по информационно-коммуникационным технологиям (7-13 июля 2014, г. Хемниц, Германия).

**Практическая значимость работы.** Разработаны новые алгоритмы расшифровки, не требующие априорной информации о величине фазовых сдвигов в интерференционных измерительных системах на основе пошагового фазового сдвига. Данные алгоритмы позволяют создать новый класс интерференционных измерительных систем, обладающих более низкой погрешностью измерений по сравнению с существующими измерительными системами. Такие измерительные системы на основе предлагаемых алгоритмов расшифровки интерференционных картин не требуют высокоточных устройств задания фазового сдвига, следовательно, будут иметь более простую структуру и меньшую стоимость.

Исследования выполнялись в рамках гранта мэрии г. Новосибирска «Разработка цифровой голографической системы для измерения деформаций», исполнитель проекта, 2012 г.; гранта мэрии г. Новосибирска «Разработка цифрового голографического микроскопа для высокоточных измерений 3-D профиля», исполнитель проекта, 2013 г.; гранта «Цифровая голографическая система для измерения деформаций» программы "Участник молодежного научно-инновационного конкурса" (УМНИК), руководитель проекта, 2012 г.; гранта программы стратегического развития НГТУ на 2012 г., проект 2.3.1 «Решение комплексных проблем по направлению "Информационные и цифровые технологии и системы", шифр НИР С2-7 «Цифровая голографическая интерферометрия», исполнитель проекта; гранта РФФИ 14-08-01100А «Цифровая голографическая интерферометрия реального времени для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния динамических объектов», 2014 г., исполнитель проекта.

Материалы данной диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре Оптических информационных технологий Новосибирского государственного технического университета.

**Публикации.** По теме диссертации было опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 статьи в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень ВАК российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Кроме того, получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в Фонде Алгоритмов и Программ СО РАН (№PR14007 «Обработка интерферограмм»).

**Личный вклад автора.** Личный вклад заключается в разработке измерительной интерференционной системы, новых алгоритмов расшифровки, программного обеспечения, реализующего алгоритмы расшифровки интерференционных картин, анализе полученных результатов, непосредственном проведении модельных и натуральных научных экспериментов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 86 наименований и трех приложений. Общий объем работы составляет 118 страниц, включая 104 страницы основного текста, 65 рисунков и 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цели и задачи работы.

**В первой главе** описывается метод пошагового фазового сдвига, приводится анализ погрешностей данного метода измерений.

Базовое уравнение двухлучевой интерферометрии имеет следующий вид:

$$I(x, y) = I_0(x, y)[1 + V(x, y)\cos(\varphi(x, y))], \quad (1)$$

где  $I(x, y)$  — значение интенсивности интерференционной картины (интерферограммы) в точке  $(x, y)$ ,  $I_0(x, y)$  — средняя интенсивность,  $V(x, y)$  — модуляция интенсивности,  $\varphi(x, y) = \varphi_p(x, y) - \varphi_r(x, y)$  — разность фаз между опорным и объектным волновыми фронтами.

Задача расшифровки интерференционной картины состоит в определении значений поля разности фаз  $\varphi(x, y)$  по измеренным значениям интенсивности интерференционного сигнала. С математической точки зрения это нелинейная обратная задача, которая решается в условиях априорной неопределенности параметров ( $I_0(x, y)$  — средней интенсивности и  $V(x, y)$  — модуляции интенсивности или видности) в базовом уравнении двухлучевой интерферометрии (1).

Метод пошагового фазового сдвига основан на регистрации нескольких интерференционных картин при изменении фазы опорной волны на известные

значения.

На рисунке 1 показана принципиальная схема оптической установки, в которой фазовый сдвиг задается перемещением зеркала, закрепленного на пьезокерамике.

Пучок света от когерентного источника излучения (лазера), попадая на делительный куб, разделяется на опорный и объектный пучки. В опорном плече находится зеркало, закрепленное на пьезокерамике, предназначенное для внесения эталонных фазовых сдвигов. Конфигурация объектного плеча зависит от задачи измерения и от формы поверхности тестируемого объекта. В выходной плоскости располагается массив детекторов для регистрации интенсивности в каждой точке поля. После каждого фазового сдвига информация о поле интенсивностей повторно вводится в компьютер.

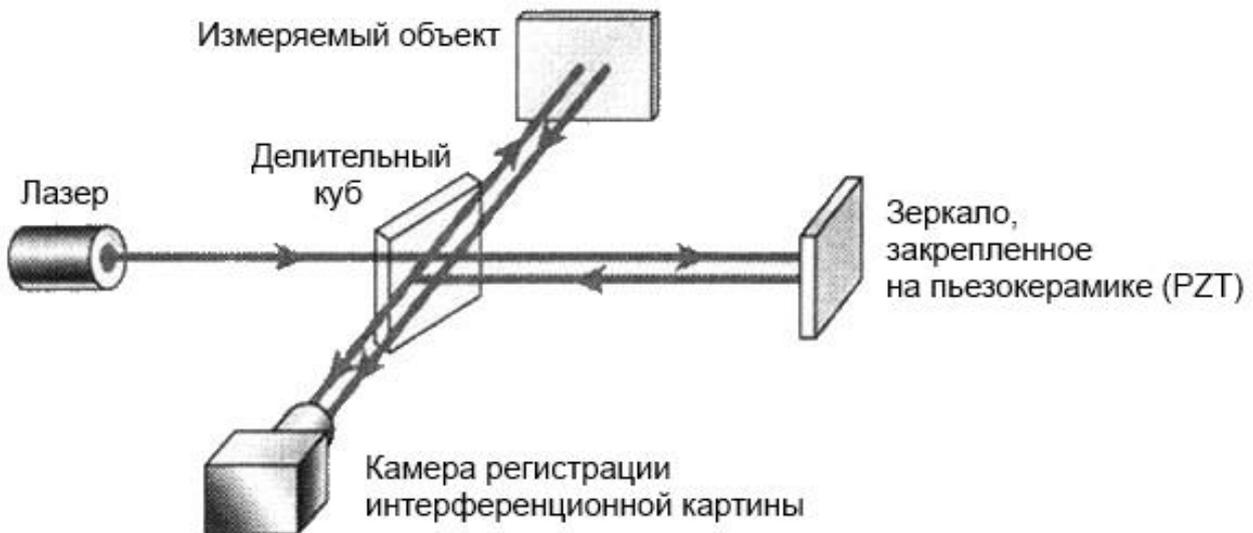


Рисунок 1 — Схема интерферометра Тваймана-Грина с перемещением зеркала, закрепленного на пьезокерамике (PZT)

При различных фазовых сдвигах интенсивность в точке  $(x, y)$  интерференционной картины со сдвигом  $\delta_i$  можно представить в виде

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) [1 + V(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \delta_i)], \quad (2)$$

где  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $m$  — число фазовых сдвигов и  $\delta_1 = 0$ .

После регистрации набора интерференционных картин с известными фазовыми сдвигами  $\delta_i$  разность фаз  $\varphi$  может быть найдена с помощью алгоритмов расшифровки.

При известном фазовом сдвиге для определения разности фаз интерферирующих волновых фронтов  $\varphi$  используются следующие выражения. Например, если фазовые сдвиги одинаковы в интервале от 0 до  $2\pi$ , т.е.  $\delta_i = 2\pi(i-1)/n$ , то разность фаз интерферирующих волновых фронтов  $\varphi$  может быть определена как

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{i=1}^n I_i \sin \delta_i}{\sum_{i=1}^n I_i \cos \delta_i}. \quad (3)$$

При трех произвольных сдвигах, решая тригонометрическую систему, состоящую из трех уравнений типа (2), можно получить следующее выражение:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{(I_2 - I_3) \cdot \sin(\delta_1) + (I_3 - I_1) \cdot \sin(\delta_2) + (I_1 - I_2) \cdot \sin(\delta_3)}{(I_3 - I_2) \cdot \cos(\delta_1) + (I_1 - I_3) \cdot \cos(\delta_2) + (I_2 - I_1) \cdot \cos(\delta_3)}. \quad (4)$$

Основным источником погрешностей в фазосдвигающей интерферометрии являются ошибки при задании сдвига. Учесть такие ошибки сложно, поскольку они проявляются косвенно через измеряемую интенсивность. Ошибки при внесении фазового сдвига существенно сказываются на результатах измерения, что является недостатком метода фазового сдвига.

Поэтому необходимо разработать алгоритмы, устраняющие погрешность от неправильного задания фазового сдвига. Такие алгоритмы описаны в главах 3 и 4 диссертации.

**Во второй главе** предлагается обобщенный алгоритм расшифровки интерференционных картин, на основе которого могут генерироваться все ранее известные алгоритмы расшифровки.

Представим выражение (2) в векторной форме. Учитывая, что:

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta, \quad (5)$$

выражение (2) примет следующий вид:

$$\mathbf{I} = I_0 \cdot \mathbf{R} + (I_0 \cdot V \cdot \cos \varphi) \cdot \mathbf{C} - (I_0 \cdot V \cdot \sin \varphi) \cdot \mathbf{S}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{I} = [I_1 \ \dots \ I_m]^T$  — набор измеренных интенсивностей с различными фазовыми сдвигами  $\delta_i$  в каждой точке интерферограммы  $(x, y)$ ,  $\mathbf{R} = [1 \ \dots \ 1]^T$ ,  $\mathbf{C} = [\cos \delta_1 \ \dots \ \cos \delta_m]^T$ ,  $\mathbf{S} = [\sin \delta_1 \ \dots \ \sin \delta_m]^T$ , размерность векторов определяется  $m$  - числом фазовых сдвигов  $\delta_i$ .

Для выделения квадратурных составляющих  $\sin \varphi$  и  $\cos \varphi$  воспользуемся свойством скалярного произведения ортогональных векторов:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{a}^\perp = 0. \quad (7)$$

Умножая правую и левую часть выражения (6) на соответствующие векторы получим:

$$\mathbf{I} \cdot \mathbf{C}^\perp = I_0 \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{C}^\perp + (I_0 \cdot V \cdot \cos \varphi) \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{C}^\perp - (I_0 \cdot V \cdot \sin \varphi) \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{C}^\perp, \quad (8)$$

$$\mathbf{I} \cdot \mathbf{S}^\perp = I_0 \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{S}^\perp + (I_0 \cdot V \cdot \cos \varphi) \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{S}^\perp - (I_0 \cdot V \cdot \sin \varphi) \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^\perp, \quad (9)$$

где  $\mathbf{S}^\perp$  и  $\mathbf{C}^\perp$  — векторы, ортогональные векторам  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{C}$  соответственно.

Скалярные произведения векторов  $\mathbf{R} \cdot \mathbf{C}^\perp = 0$  и  $\mathbf{R} \cdot \mathbf{S}^\perp = 0$ , откуда:

$$I_0 \cdot V \cdot \sin \varphi = -\frac{\mathbf{I} \cdot \mathbf{C}^\perp}{\mathbf{S} \cdot \mathbf{C}^\perp}, \quad (10)$$

$$I_0 \cdot V \cdot \cos \varphi = -\frac{\mathbf{I} \cdot \mathbf{S}^\perp}{\mathbf{C} \cdot \mathbf{S}^\perp}. \quad (11)$$

Тогда алгоритм расшифровки в векторной форме примет следующий вид:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\mathbf{I} \cdot \mathbf{C}^\perp}{\mathbf{I} \cdot \mathbf{S}^\perp}. \quad (12)$$

Обобщенный алгоритм расшифровки интерференционных картин, полученных методом пошагового фазового сдвига, позволяет получать конкретные формулы расшифровки для произвольного количества фазовых сдвигов, не прибегая к решению систем тригонометрических уравнений.

**В третьей главе** предлагается алгоритм определения фазовых сдвигов, основанный на анализе траектории интенсивностей интерференционных картин. Алгоритм позволяет из набора интерференционных картин найти внесенный фазовый сдвиг. Предлагаемый подход позволяет уменьшить основную погрешность метода расшифровки интерференционных картин, основанного на пошаговом фазовом сдвиге — погрешность, вызванную неправильным заданием фазового сдвига.

Значение интенсивности в произвольной точке  $(x, y)$  интерференционной картины определяется выражением (1).

Если известно точное значение фазового сдвига, то в уравнении 3 неизвестных:  $\varphi$  — разность фаз интерферирующих волновых фронтов,  $I_0$  — средняя интенсивность,  $V$  — модуляция интенсивности (видность). Для их нахождения нам необходимо не менее 3 уравнений с различными значениями  $\delta_i$ . Если же считать, что вносимый фазовый сдвиг тоже неизвестен, то в этом уравнении уже 4 неизвестных:  $\varphi, \delta_i, I_0, V$ .

Можно сделать допущение, что в соседних точках фазовые сдвиги одинаковы. Это предположение выполняется в большинстве случаев исходя из физических условий проведения эксперимента. Тогда мы можем получить добавочные уравнения, рассматривая решения не в одной, а в нескольких пространственных точках  $(x_k, y_k)$ :

$$I_{i,k}(x_k, y_k) = I_{0,k}(x_k, y_k) \cdot [1 + V_k(x_k, y_k) \cos(\varphi_k(x_k, y_k) + \delta_i)]. \quad (13)$$

Если мы берем  $m$  фазовых сдвигов, то общее число неизвестных в 2 точках будет:  $2 \cdot 3 + m - 1$ . Считаем, что  $\delta_1 = 0$ . Если взять 5 сдвигов, то в 2 точках получится 10 уравнений и 10 неизвестных:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{1,1} = I_{0,1}[1 + V_1 \cos(\varphi_1)], \\ I_{1,2} = I_{0,2}[1 + V_2 \cos(\varphi_2)], \\ I_{2,1} = I_{0,1}[1 + V_1 \cos(\varphi_1 + \delta_2)], \\ I_{2,2} = I_{0,2}[1 + V_2 \cos(\varphi_2 + \delta_2)], \\ I_{3,1} = I_{0,1}[1 + V_1 \cos(\varphi_1 + \delta_3)], \\ I_{3,2} = I_{0,2}[1 + V_2 \cos(\varphi_2 + \delta_3)], \\ I_{4,1} = I_{0,1}[1 + V_1 \cos(\varphi_1 + \delta_4)], \\ I_{4,2} = I_{0,2}[1 + V_2 \cos(\varphi_2 + \delta_4)], \\ I_{5,1} = I_{0,1}[1 + V_1 \cos(\varphi_1 + \delta_5)], \\ I_{5,2} = I_{0,2}[1 + V_2 \cos(\varphi_2 + \delta_5)]. \end{array} \right. \quad (14)$$

Этого достаточно, чтобы точно (с компенсацией погрешности установки фазового сдвига) определить фазовые разности в двух точках интерференционной картины.

В общем случае, число точек  $k = 1, \dots, n$ . Общее число неизвестных:  $3n + m - 1$ . Число уравнений:  $nm$ . Решение можно найти, если общее число уравнений больше или равно числу неизвестных, т.е.:

$$n \cdot m \geq 3 \cdot n + m - 1. \quad (15)$$

Зафиксируем на интерференционном изображении две произвольные точки и будем регистрировать в них значения интенсивностей при внесении фазовых сдвигов (рисунок 2).

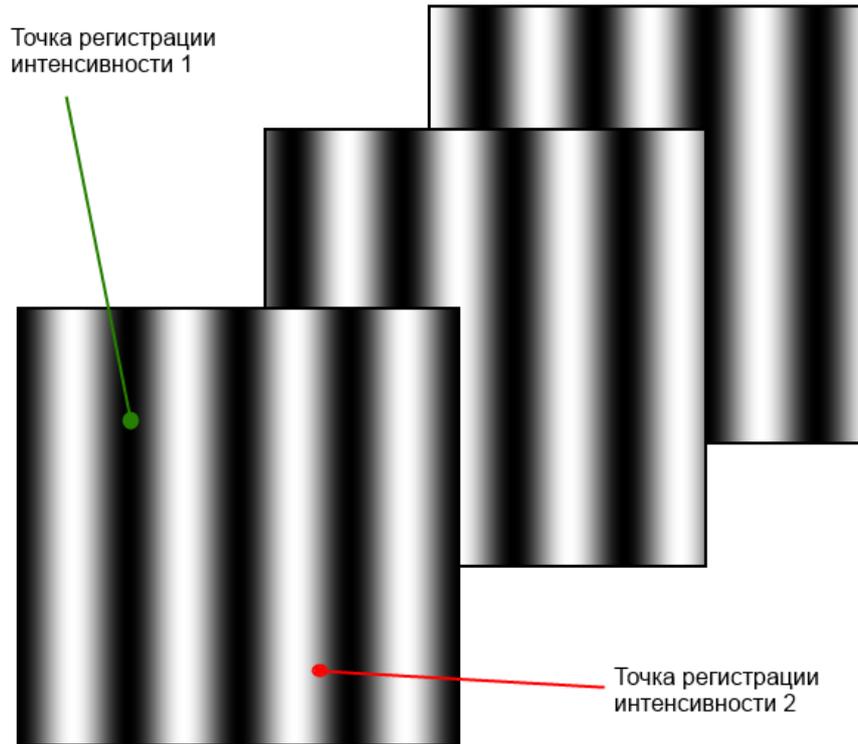


Рисунок 2 — Регистрация интенсивностей в двух точках интерференционной картины при внесении фазовых сдвигов

Возьмем плоскость, и по оси абсцисс будем откладывать значения интенсивности в первой точке, по оси ординат — значения интенсивности во второй точке. При изменении углов сдвига от  $0$  до  $2\pi$  точка на плоскости будет описывать некоторую траекторию. Данная траектория будет представлять собой центральную кривую второго порядка (произвольно ориентированный эллипс).

Из-за погрешностей измерения интенсивностей, траектория реальных зафиксированных интенсивностей имеет вид, представленный на рисунке 3. Далее аппроксимируем траекторию эллипсом.

После аппроксимации эллипсом, исходная траектория преобразуется к круговой через ряд трансформаций с использованием параметров аппроксимирующего эллипса. Затем по круговой траектории вычисляются фазовые сдвиги. Определив углы фазового сдвига их можно подставить в соответствующие формулы расшифровки для определения распределения поля разности фаз интерферирующих волновых фронтов.

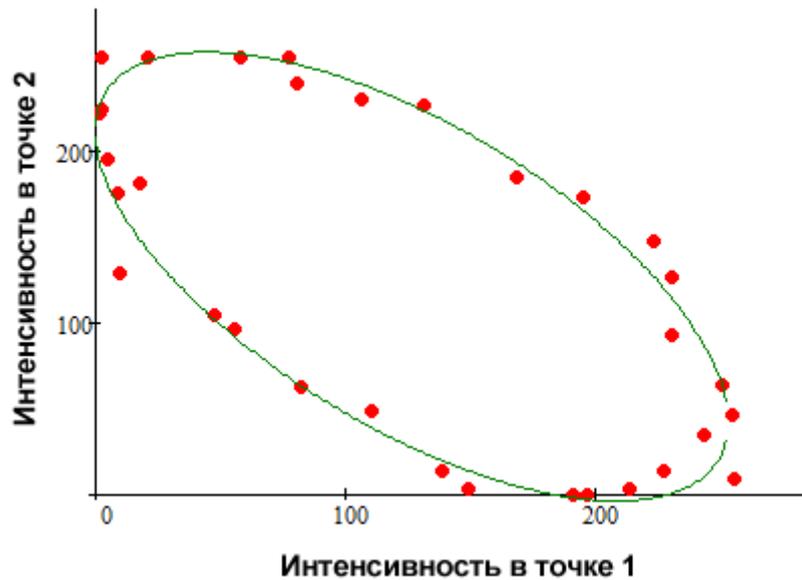


Рисунок 3 — Траектория интерференционных сигналов

Использование данного алгоритма позволяет уменьшить требования к точности установки вносимых фазовых сдвигов. Поскольку фазовый сдвиг вычисляется непосредственно по значениям интенсивностей, можно использовать системы с априорно неизвестными вносимыми фазовыми сдвигами.

Недостатком двухточечного алгоритма определения фазовых сдвигов является тот факт, что для вычисления требуется регистрация большого количества интерференционных картин, что на практике не всегда является возможным.

**В четвертой главе** предлагается алгоритм расшифровки, не требующий априорного знания о величине вносимых фазовых сдвигов.

Сущность алгоритма заключается в приведении траектории регистрируемых интенсивностей интерференционных картин с произвольно заданными фазовыми сдвигами к траектории интенсивностей, для которых фазовые сдвиги известны точно.

Пусть имеем три интерференционные картины с фазовыми сдвигами  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  — рисунок 4.

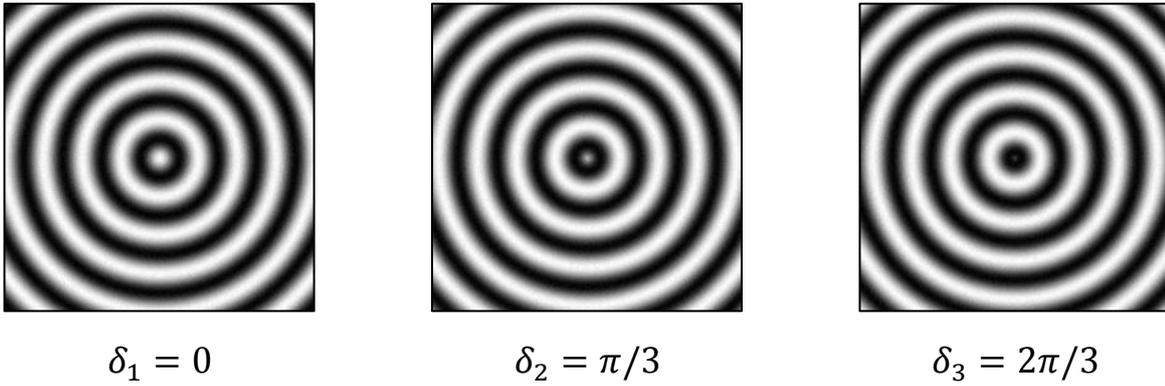


Рисунок 4 — Интерференционные картины при различных фазовых сдвигах

На первом этапе алгоритма для каждой точки интерференционной картины формируются векторы интенсивностей. Эти векторы содержат значения интенсивности в конкретной точке интерференционной картины при различных фазовых сдвигах.

Затем, для каждого сформированного вектора интенсивностей вычисляем ортогональный к нему вектор. Вычисленные ортогональные векторы будут иметь такую же размерность, как и векторы интенсивностей, т.е. содержат три компоненты. На рисунке 5 показана траектория ортогональных векторов в пространстве интенсивностей. Здесь координаты каждой точки есть элементы соответствующего ортогонального вектора. Форма и расположение облака точек зависит от фазовых сдвигов.

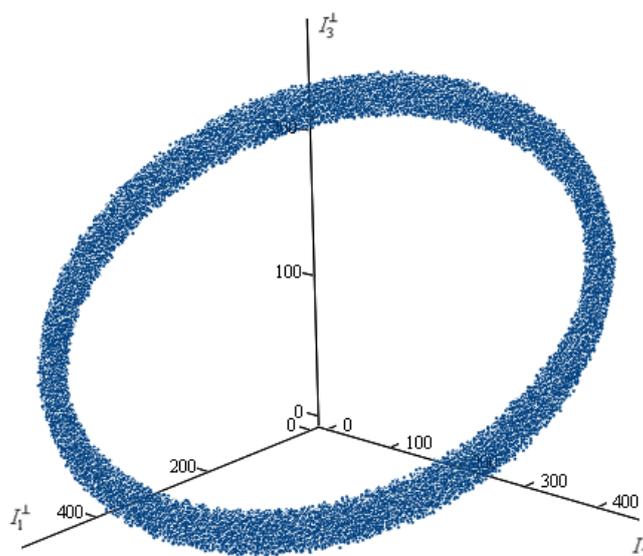


Рисунок 5 — Траектория ортогональных векторов в пространстве интенсивностей

На следующем шаге облако точек аппроксимируется эллипсом. Далее эллипс вписывается в цилиндр. Зная направляющую цилиндра, в который вписан эллипс, траекторию интенсивностей можно преобразовать к круговой траектории. Для этого каждая точка траектории интенсивностей проецируется по направляющей цилиндра на плоскость, параллельную основанию цилиндра — рисунок 6.

После преобразования к круговой траектории искомую разность фаз интерферирующих волновых фронтов можно найти с использованием известной формулы расшифровки (4) при значениях фазовых сдвигов  $\delta_1 = 0, \delta_2 = 2\pi/3, \delta_3 = 4\pi/3$ .

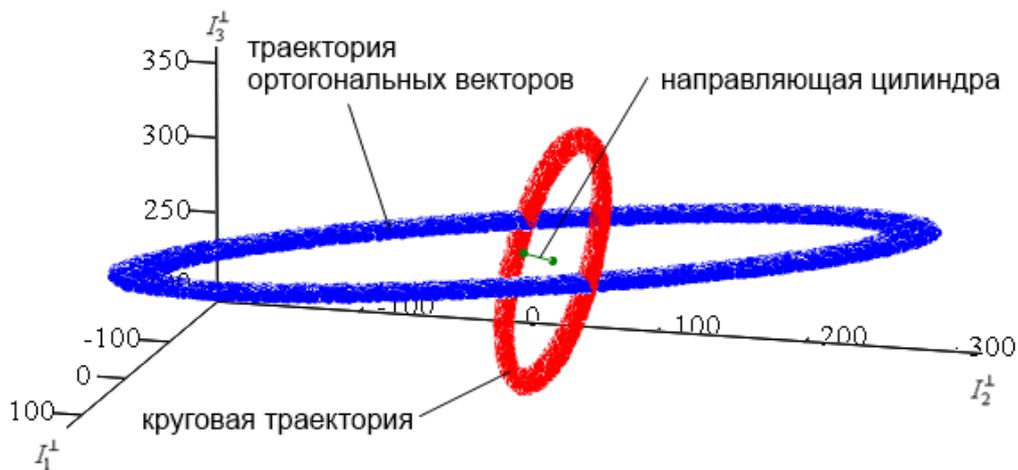


Рисунок 6 — Преобразование к круговой траектории (проецирование по направляющей цилиндра)

Алгоритм позволяет вычислить фазу по трем интерференционным картинам с произвольными фазовыми сдвигами. Погрешность алгоритма сопоставима с погрешностью алгоритмов расшифровки, требующих точно известные значения фазовых сдвигов. Таким образом, для расшифровки могут быть использованы произвольные фазовые сдвиги, которые могут быть внесены вибрациями установки в процессе измерений.

**В пятой главе** приводится описание разработанной интерференционной системы для регистрации экспериментальных интерференционных картин и исследование предлагаемых алгоритмов расшифровки интерференционных картин.

Общий вид интерференционной системы показан на рисунке 7.

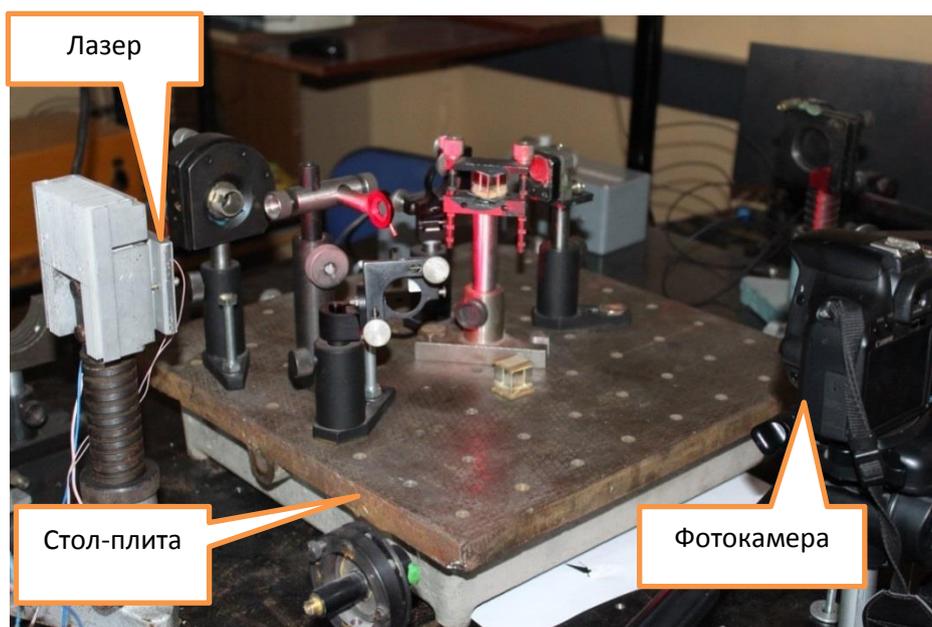


Рисунок 7 — Общий вид интерференционной системы

Интерференционная система состоит из чугунного стола-плиты размером  $40 \times 40 \times 10$  см весом 73 кг. Стол служит для подавления вибраций и предусматривает жесткое механическое крепление элементов. Стойки для крепления позволяют зафиксировать элементы системы в нужном положении.

В качестве источника когерентного излучения используется полупроводниковый лазер RLD65PZB5 с длиной волны 658 нм и мощностью 5 мВт, стабилизированный по току и температуре. Система стабилизации лазера выполнена на базе контроллера ATX-Mega 128.

Для внесения фазового сдвига опорное зеркало было приклеено к пьезокерамическому актюатору пакетного типа П-3. Чувствительность актюатора не менее 3 нм/В, а его размер  $15 \times 4.2$  мм. Пьезокерамические актюаторы преобразовывают электрические сигналы (напряжения или заряда) в механическое перемещение или силу. Управление таким пьезокерамическим актюатором осуществлялось контроллером на базе ATX-Mega 128.

Регистрация интерферграмм производилась зеркальной фотокамерой Canon 500D. Размер матрицы фотокамеры —  $22.3 \times 14.9$  мм (15.5 мегапикселей), максимальное разрешение —  $4768 \times$

3174, чувствительность — 100-3200 ISO. Фотокамера устанавливалась рядом со столом на штативе таким образом, чтобы интерференционная картина полностью входила на матрицу фотокамеры. Значения выдержки и чувствительности подбирались опытным путем для получения максимального контраста интерференционных картин.

На рисунке 8 представлены экспериментальные интерференционные картины с фазовыми сдвигами  $\delta_1 = \pi/2$ ,  $\delta_2 = \pi$ ,  $\delta_3 = 0$ , заданными в ходе проведения эксперимента. Для получения интерферограмм использовался сферический объект.

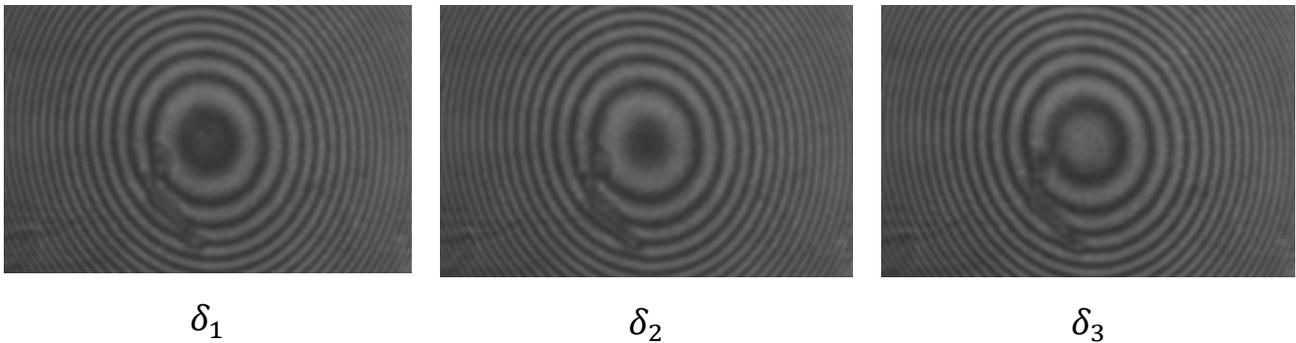


Рисунок 8 — Экспериментальные интерференционные картины

Результаты расшифровки представлены на рисунке 9. Слева — по алгоритму (4), справа — по алгоритму без априорной информации о фазовых сдвигах. На рисунке 10 приведены их графики для отдельной строки.

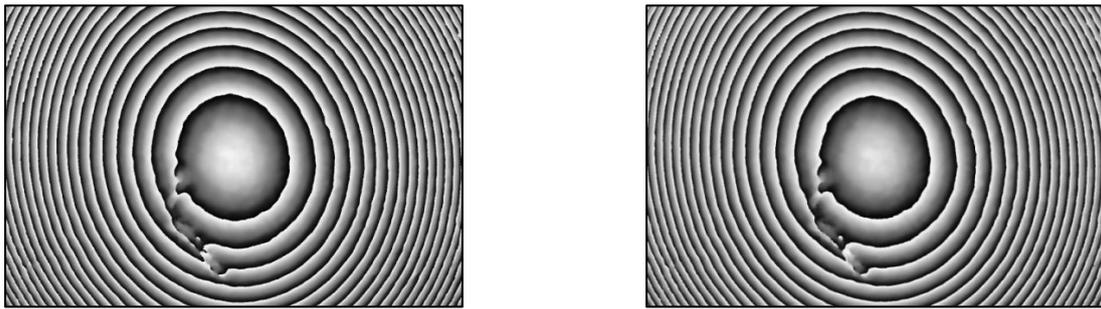


Рисунок 9 — Расшифровка экспериментальных интерференционных картин (слева - по трехточечному алгоритму, справа – по алгоритму без априорной информации о фазовых сдвигах)

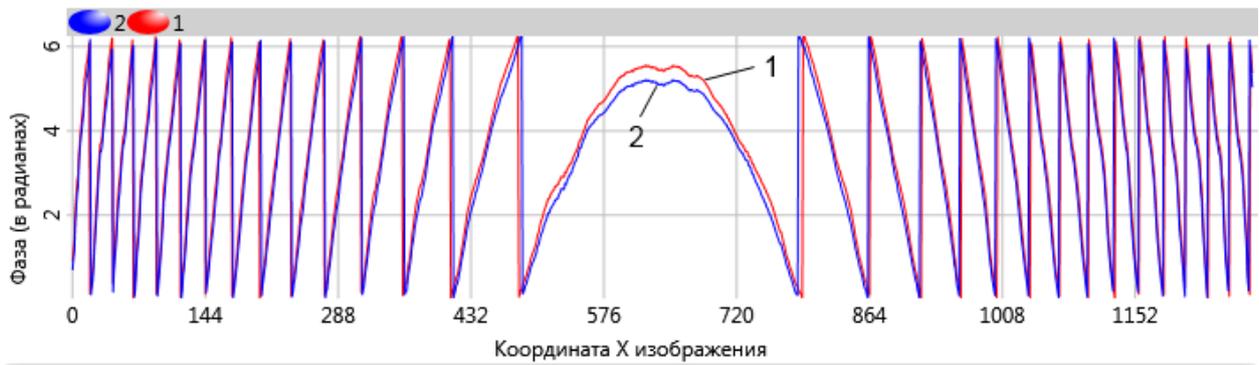


Рисунок 10 — Графики фазы для отдельной строки (1 – расшифровка по трехточечному алгоритму, 2 – расшифровка по алгоритму без априорной информации о фазовых сдвигах)

На рисунке 11 показаны графики развернутой фазы для отдельной строки. На данном масштабе графики полностью совпадают, поэтому более информативным будет соответствующий график их разности, представленный далее на рисунке 12.

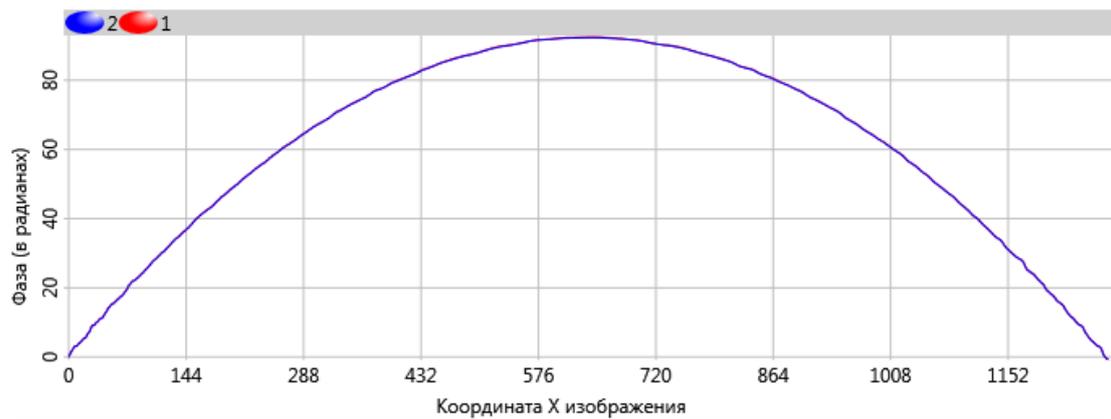


Рисунок 11 — Графики развернутой фазы для отдельной строки

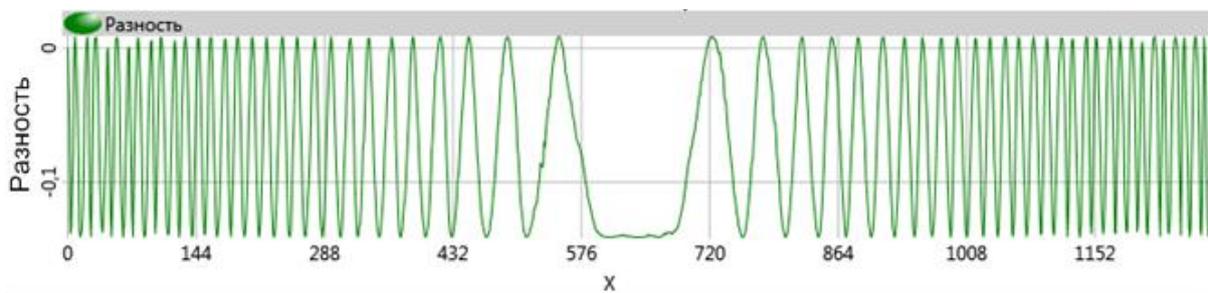


Рисунок 12 — Разность между развернутой фазой, вычисленной по классическому алгоритму и алгоритму в отсутствии априорной информации о фазовых сдвигах

Абсолютная погрешность предлагаемого алгоритма составляет 0.2 радиан, относительная погрешность — 3%. Величина этой погрешности

сопоставима с погрешностью обычных традиционных алгоритмов расшифровки интерференционных картин.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Проведен обзор алгоритмов расшифровки интерференционных картин с пошаговым фазовым сдвигом.
2. Проведено теоретическое исследование существующих алгоритмов расшифровки интерференционных картин на основе метода пошагового фазового сдвига. Проведен анализ погрешностей метода пошагового фазового сдвига.
3. Разработан универсальный алгоритм расшифровки интерференционных картин на основе метода пошагового фазового сдвига. Алгоритм позволяет синтезировать формулы расшифровки для произвольного числа интерференционных картин с известными фазовыми сдвигами, не прибегая к решению системы тригонометрических уравнений.
4. Разработан двухточечный алгоритм определения фазовых сдвигов для серии интерференционных картин, регистрируемых в процессе измерений на основе метода пошагового фазового сдвига. Алгоритм основан на анализе траектории интенсивностей в двух произвольных точках интерференционной картины. Погрешность алгоритма составляет сотые доли радиан. Это превышает характеристики известных алгоритмов расшифровки. Однако для точного вычисления фазовых сдвигов алгоритм требует регистрации большого количества интерференционных картин.
5. Разработан новый алгоритм расшифровки интерференционных картин на основе метода пошагового фазового сдвига, не требующий знания априорной информации о фазовых сдвигах. С использованием данного алгоритма возможно восстановление фазы всего лишь по трем интерференционным картинкам с произвольными фазовыми сдвигами, которые могут быть внесены в процессе измерений вибрациями. Среднеквадратическая ошибка алгоритма составляет десятые доли радиан. Таким образом, погрешность алгоритма

сопоставима с погрешностью традиционных алгоритмов расшифровки при точно известных фазовых сдвигах.

6. Разработано программное обеспечение, реализующее как алгоритмы расшифровки интерференционных картин, так и предназначенное для предварительной обработки интерференционных картин. С использованием данного программного обеспечения проводились все модельные и натурные эксперименты.

7. Разработана и реализована интерференционная измерительная система для регистрации и расшифровки интерференционных картин.

8. Проведены экспериментальные исследования разработанных алгоритмов расшифровки интерференционных картин.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Издания из Перечня ВАК ведущих рецензируемых научных изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. Гужов, В.И. Универсальный алгоритм расшифровки [Текст] / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Д.С. Хайдуков, А.Р. Вагизов // Научный вестник НГТУ. — 2010. — №4(41). — С. 51-58.

2. Гужов, В.И. Устранение ошибок фазового сдвига в интерферометрии [Текст] / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Д.С. Хайдуков, А.Р. Вагизов // Автометрия. — 2011. — Т. 47, №1. — С. 96-101.

3. Гужов, В.И. Новый метод калибровки фазовых сдвигов [Текст] / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Д.С. Хайдуков, Р.А. Кузнецов // Научный вестник НГТУ. — 2013. — №1(50). — С. 185-189.

4. Guzhov, V.I. Generic algorithm of phase reconstruction in phase-shifting interferometry [Text] / V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, R.A. Kuznetsov, D.S. Haydukov // Optical Engineering, 2013. — Vol. 52 (3). — P. 030501-1 – 030501-2.

В других изданиях:

5. Хайдуков, Д.С. Высокоточный алгоритм расшифровки интерференционных картин. Программная реализация [Текст] / Хайдуков Д.С. // Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG. — 2012. — 61 с.
6. Гужов, В.И. Уменьшение погрешности определения фазовых разностей при анализе интерферограмм методом пошагового фазового сдвига [Текст] / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Р.А. Кузнецов, Д.С. Хайдуков // Автоматика и программная инженерия. — 2012. — №2 (2). — С. 47-53.
7. Гужов, В.И. Определение значений фазовых сдвигов по интерференционным картинам в фазосдвигающей интерферометрии [Текст] / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Р.А. Кузнецов, Д.С. Хайдуков // Автоматика и программная инженерия. — 2013. — №1(3). — С. 10-15.
8. Гужов, В.И. Алгоритмы расшифровки интерференционных картин методом пошагового фазового сдвига [Текст] / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Р.А. Кузнецов, Д.С. Хайдуков // Автоматика и программная инженерия. — 2012. — №2(2). — С. 55-59.

В сборниках российских и международных конференций:

9. Хайдуков, Д.С. Устранение погрешности установки фазового сдвига в интерференционных измерительных системах [Текст] / Д.С. Хайдуков // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской конференции молодых ученых в 4-х частях, 3-5 декабря 2010 г. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. — Часть 2. — С. 295.
10. Хайдуков, Д.С. Высокоточные алгоритмы расшифровки интерференционных картин в измерительных системах с пошаговым фазовым сдвигом [Текст] / Д.С. Хайдуков // Системный анализ и информационные технологии, школа молодых ученых, 12-16 сентября 2011 г. — Новосибирск: Изд-во «Кант», 2011. — С. 123-125.
11. Guzhov, V.I. Decoding algorithm for interference patterns in phase shifting interferometry without a priori shift knowledge [Text] / V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, D.S. Haydukov, R.A. Kuznetzov // Proceedings of IFOST 2012. The 7-th

International Forum on Strategic Technology, September 17-21, 2012. — Tomsk: TPU Press, 2012. — Vol. 1. — P. 674-677.

12. Guzhov, V.I. Method of an Assessment of Reliability of High-Precision Measurements [Text] / V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, D.S. Haydukov, R.A. Kuznetsov // Proceedings of APEIE 2012. 11-th international Conference on actual problem electronics instrument engineering. — 2012. — Vol. I — P. 105-106.

13. Гужов, В.И. Оценка достоверности оптических измерений [Текст] / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Д.С. Хайдуков, Р.А. Кузнецов // Материалы XI международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», 2-4 октября 2012 г. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. — Т.3. — С. 146-149.

14. Хайдуков, Д.С. Алгоритм расшифровки интерференционных картин, не требующий априорного знания фазовых сдвигов в фазо-сдвигающей интерферометрии [Текст] / Д.С. Хайдуков // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской конференции молодых ученых в 7-х частях, 29 ноября - 2 декабря 2012 г. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. — Часть 2. — С. 42.

15. Haydukov, D.S. Analysis Algorithm for Interference Patterns with Random Phase Shifts [Text] / D.S. Haydukov, V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh // Proceedings of International Summerschool Computer Science (07.07.2014 – 13.07.2014). — Chemnitz (Germany), 2014. — С. 23-27.

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
тел./факс: (383) 346-08-57  
Формат 60 X 84/16. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз.  
Заказ №231. Подписано в печать 28.01.2015 г.