

На правах рукописи

Кузнецов Роман Александрович

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НА
ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

Специальность:

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы
(в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

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: доктор технических наук
Гибин Игорь Сергеевич,
Институт автоматики и электрометрии
СО РАН, главный научный сотрудник

кандидат технических наук
Сысоев Евгений Владимирович,
Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения СО РАН,
ведущий научный сотрудник лаборатории
оптических измерительных систем

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»

Защита состоится «19» ноября 2013г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.173.05 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «___» октября 2013г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.т.н., профессор

Юркевич В.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Любое производство сталкивается с необходимостью контроля качества выпускаемой продукции. Вопрос соответствия произведённого изделия заданным количественным или качественным показателям определяет не только дальнейшую пригодность этого изделия. От него может зависеть срок службы и безопасность использования данного изделия. Современное развитие информационно-измерительных систем выводит промышленный контроль изделий на новый уровень, делая его более точным, доступным, быстрым и дешёвым.

Актуальность темы исследования. Методы неразрушающего контроля активно применяются в высокоточных отраслях промышленности. Неразрушающий контроль позволяет определять соответствие различных агрегатов качественным и количественным показателям, не причиняя им ущерба в процессе измерений. Здесь широкое распространение получили оптические методы контроля. Методы голографической интерферометрии являются одними из наиболее значимых методов для контроля напряженно-деформированного состояния объектов. Однако развитие этих методов ограничивается необходимостью применения для регистрации голограмм промежуточных фотоносителей. Использование голографических пластин и плёнок связано со сложными химическими процессами. Поэтому измерительные системы на основе этих методов используются в основном в лабораторных условиях.

Цифровая голографическая интерферометрия позволяет полностью избавиться от промежуточных фотоносителей, заменяя их цифровыми матрицами. Процесс расшифровки цифровых голографических интерферограмм выполняется при помощи компьютерной техники, что позволяет, во-первых, получать и сохранять результаты в более удобном для человека виде, а, во-вторых, позволяет использовать ранее недоступные методы обработки и анализа голографических интерферограмм. Однако разрешение современных цифровых матриц существенно меньше, чем разрешение голографических фотопластин, что вызывает необходимость разрабатывать новые алгоритмы анализа, эффективно работающие в условиях низкого разрешения.

Таким образом, исследование и разработка новых методов анализа цифровых голографических интерферограмм и создание информационно-измерительных систем неразрушающего контроля на их основе является актуальной задачей при промышленном производстве высокоточных изделий.

Степень разработанности. Цифровая голографическая интерферометрия – современная область исследования, сформировавшаяся из оптической голографической интерферометрии. Качество цифровых средств регистрации и возможности вычислительной техники увеличиваются, а их стоимость уменьшается с каждым годом. Это открывает новые перспективы в разработке голографических измерительных систем. Цифровой голографией сейчас занимаются ведущие институты и коммерческие организации Германии, Японии, США, Китая.

Цель работы. Целью диссертационной работы является исследование и улучшение методов анализа цифровых голографических интерферограмм для неразрушающего контроля диффузно отражающих объектов в промышленном производстве и разработка измерительной системы на основе этих методов.

Задачи исследования. В ходе исследования предполагается решение следующих задач:

1. Теоретически исследовать существующие методы анализа цифровых голографических интерферограмм;
2. Разработать новые методы восстановления фазовых фронтов, работающие в условиях низкого разрешения цифровых голографических интерферограмм;
3. Выполнить компьютерное моделирование процесса восстановления фазовых волновых фронтов из цифровых голографических интерферограмм;
4. Разработать программное обеспечение для измерения полей смещения;
5. Разработать измерительную систему и экспериментально исследовать метод цифровой голографической интерферометрии на реальных объектах.

Научная новизна. Наиболее значимые научные результаты работы:

1. Разработан новый метод восстановления цифровых голографических интерферограмм с перекрывающимися дифракционными порядками, отличающийся от ранее известных взвешиванием фрагментов голограммы и обеспечивающий высокое качество подавления нулевого порядка дифракции;
2. Разработан новый метод для устранения спекл-шумов в цифровых голографических интерферограммах, отличающийся конкретизацией априорной информации при использовании фильтра Калмана и позволяющий работать в условиях интенсивных спекл-шумов;
3. Исследованы метрологические характеристики и влияющие на них параметры измерительной системы неразрушающего контроля, основанной на методе цифровой голографической интерферометрии.

Методы исследования. Теоретическая часть работы основана на методах цифровой обработки сигналов, методов фильтрации и математического моделирования голографических процессов.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся:

1. Новый метод восстановления цифровых голографических интерферограмм с перекрывающимися дифракционными порядками. Метод основан на ранее известном фильтре для устранения нулевого порядка дифракции. В метод внесена фрагментарная обработка и взвешивание фрагментов голограммы перед голографическим восстановлением;
2. Новый метод для устранения спекл-шумов в цифровых голографических интерферограммах. В методе используется фильтр Калмана, конкретизированный априорной информацией о функции восстановленной фазы;
3. Результаты модельных и натуральных экспериментов, подтверждающие теоретические исследования;
4. Общая и структурная схемы разработанной системы неразрушающего контроля.

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-ом международном форуме по стратегическим технологиям IFOST 2012, российско-индийской конференции SIMHAR 2011, школе молодых учёных САИТ-2011, 11-ой международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», международной научно-практической конференции «Инновационные информационные технологии», летней школе по информационно-коммуникационным технологиям IBSWorkshop 2013.

Практическая значимость работы. Практическая значимость результатов работы обуславливается, в первую очередь, созданием действующего образца программно-аппаратного комплекса для измерения напряженно-деформированного состояния диффузных объектов методами цифровой голографической интерферометрии. При разработке программно-аппаратного комплекса использовались широко распространенные цифровые матрицы низкого разрешения, что позволило существенно сократить стоимость системы неразрушающего контроля. Разработанная система может быть использована в условиях промышленного производства, что имеет важное практическое значение в различных областях приборостроения, авиастроения, машиностроения и оборонной промышленности.

Разработано программное обеспечение, пригодное как для формирования полей смещения методами цифровой голографической интерферометрии, так и для цифрового голографического восстановления трехмерных объектов в реальном времени. Программное обеспечение реализует несколько алгоритмов восстановления, а также имеет широкий спектр настроек и механизм фокусировки на объекте исследования. Было получено свидетельство о регистрации программы «Численный расчёт цифровой голографической интерферометрии» в Фонде Алгоритмов и Программ СОРАН № PR13020 от 03.06.2013.

Исследования выполнялись в рамках грантов мэрии г. Новосибирска «Разработка цифровой голографической системы для измерения деформаций» (руководитель проекта, 2012 г.), «Разработка цифрового голографического микроскопа для высокоточных измерений 3-D профиля» (исполнитель, 2013 г.), программы стратегического развития НГТУ, НИР шифр С2-7 «Цифровая голографическая интерферометрия» по проекту 2.3.1 «Решение комплексных проблем по направлению «Информационные и цифровые технологии и системы» (исполнитель, 2013 г.).

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

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 11 научных работ, в том числе 3 статьи в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, 2 статьи в научных журналах и изданиях, не вошедших в данный перечень, и 6 статей в сборниках трудов российских и международных научно-практических конференций.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в выборе методов и средств решения задач диссертационного исследования, их решении, анализе полученных результатов, непосредственном проведении модельных и натурных научных экспериментов.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 117 страницах машинописного текста. Состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка источников, включающего 76 наименований, и двух приложений. Основное содержание диссертации изложено на 106 страницах, включая 44 рисунка и одну таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проводится аналитический обзор оптических методов неразрушающего контроля, рассматривается развитие и тенденции голографической интерферометрии как целевого метода. В конце главы приводятся выводы о перспективности использования цифровой голографической интерферометрии как метода неразрушающего контроля.

По характеру воздействия на объект различают разрушающий и неразрушающий контроль. При неразрушающем контроле изделия сохраняют свои качества и свойства, несмотря на то, что на них было оказано определенное воздействие, т.е. такие изделия можно в дальнейшем использовать. По ГОСТ 18353-79 выделяется 9 видов неразрушающего контроля: 1) магнитный, 2) электрический, 3) вихретоковый, 4) радиоволновой, 5) тепловой, 6) оптический, 7) радиационный, 8) акустический, 9) проникающими веществами.

При помощи оптических методов неразрушающего контроля можно оценивать поверхностные нарушения объектов (пустоты, расслоения, поры, трещины, инородные включения для оптически прозрачных материалов), геометрические параметры (шероховатость, толщину пленок и др.), физико-химические свойства (внутренние напряжения, структуру материала).

Оптические методы для высокоточных измерений и неразрушающего контроля широко рассматриваются в работах И.П. Гурова, В.П. Рябухо, Ю.И. Островского, W. Osten, G. Pedrini, U. Schnars, W. Jueptner, H.J. Tiziani, U.P. Kumar, F. Chen, W. Haddad и ряда других авторов.

Лазерная интерферометрия является одним из самых распространенных методов для высокоточных измерений и неразрушающего контроля. Основной идеей данного метода является то, что сформированный интерференционный рисунок можно соотнести с геометрией измеряемой поверхности, руководствуясь величинами длины волны, коэффициентом преломления, направлениями освещения и наблюдения. Голографическая интерферометрия была впервые обнаружена в 1964. При помощи этого метода обнаруживали микровибрации, измеряли статические деформации различных структур, обнаруживали дефекты склеивания. С развитием вычислительной техники и записывающего оборудования считывание и обработка голографической интерферограммы стали электронными. Так современные цифровые

голографические интерференционные измерительные системы обеспечивают получение и обработку интерферограмм в реальном времени.

В настоящее время цифровая голографическая интерферометрия находит применение в областях неразрушающего контроля, измерении смещений и деформации, определении механических и термических свойств материалов, таких как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент термального расширения. Достоинствами этого метода являются микрометровая точность, высокая скорость работы, бесконтактность, неразрушающее воздействие на объект исследования, а также возможность работы с диффузно рассеивающими объектами. К недостаткам метода можно отнести недостаточную разрешающую способность цифровых матриц, ограничения на угол падения опорного пучка и геометрию измерительной установки, образование графических артефактов при цифровом восстановлении. Однако при формировании полей смещения цифровая голографическая интерферометрия имеет одно ключевое преимущество. Для определения разности фаз между обычным и деформированным состоянием объекта достаточно всего двух восстановленных цифровых голограмм. Это существенно упрощает процесс измерения, избавляет от необходимости использования фазовых сдвигов и дополнительных голограмм для восстановления разности фаз.

Во второй главе исследуются существующие методы анализа цифровых голографических интерферограмм, вводится математическая модель процесса цифрового голографического восстановления фазовых полей, после чего рассматриваются вычислительные методы, позволяющие представить эту модель численно. Далее рассматривается ряд методов для подавления нулевого порядка дифракции, возникающего в ходе восстановления цифровых голограмм, после чего рассматривается математическая модель цифровой голографической интерферометрии в приложении к получению полей смещения твердых тел и неразрушающему контролю.

Голографический процесс состоит из двух частей: записи и восстановления. Для записи голограммы используется светочувствительная среда. Луч лазера делится на два пучка. Первый пучок попадает на светочувствительную среду без изменений и называется опорной волной, а второй отражается от объекта и называется объектной волной.

Математически амплитуда объектной волны может быть записана как

$$U_0(x, y) = E_0(x, y) \exp[i\varphi_0(x, y)], \quad (1)$$

где E_0 – амплитуда, а φ_0 – фаза объектной волны.

Аналогично для опорной волны можно записать

$$U_r(x, y) = E_r(x, y) \exp[i\varphi_r(x, y)], \quad (2)$$

где E_r – амплитуда, а φ_r – фаза опорной волны.

Когда объектная и опорная волна интерферируют на поверхности светочувствительной среды, сформированная голограмма может быть представлена как

$$U_h(x, y) = E_0^2(x, y) + E_r^2(x, y) + U_0(x, y)U_r^*(x, y) + U_0^*(x, y)U_r(x, y), \quad (3)$$

где * обозначает комплексно-сопряженную величину.

Первое и второе слагаемое в (3) описывают постоянную составляющую, находящуюся в нулевом порядке дифракции. Третье слагаемое с точностью до известного множителя представляет собой копию исходного оптического поля – мнимое изображение объекта, находящееся в первом порядке дифракции. Последний член в (3) образует еще одно изображение объекта, которое называется действительным изображением (или парным изображением) и находится в минус первом порядке дифракции.

В цифровой голографии при записи роль фоточувствительной среды выполняет цифровая матрица. В процессе восстановления эта голограмма численно восстанавливается при помощи виртуальной опорной волны, которая вычисляется математически и по характеристикам совпадает с реальной опорной волной, использованной при записи.

Для цифрового голографического восстановления можно воспользоваться интегралом Френеля-Кирхгофа, который записывается как

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_h(x, y) U_r(x, y) \frac{\exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} D\right)}{D} dx dy, \quad (4)$$

где $U_h(x, y)$ – цифровая голограмма, $U_r(x, y)$ – функция, описывающая опорную волну, λ – длина волны, d – расстояние между плоскостью голограммы и плоскостью восстановления, ξ' и η' – координаты в плоскости восстановления,

$$D = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2}.$$

Результирующая интенсивность и фаза оптического поля соответствуют модулю и фазе комплексного числа, представляющего комплексную амплитуду света (5).

$$I(\xi', \eta') = |\Gamma(\xi', \eta')|^2, \quad \varphi(\xi', \eta') = \arctan \frac{\text{Im}[\Gamma(\xi', \eta')]}{\text{Re}[\Gamma(\xi', \eta')]} \quad (5)$$

Для численного расчёта интеграла Френеля-Кирхгофа широко применяется метод, известный как метод преобразования Френеля, который можно математически записать как

$$\begin{aligned} \Gamma(\xi, \eta) = & \frac{i}{\lambda d} \exp\left[-i \frac{2\pi d}{\lambda}\right] \exp\left[-i\pi\lambda d(v^2 + \mu^2)\right] \times \\ & \times \mathfrak{F}^{-1} \left\{ U_h(x, y) U_r^*(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi(x^2 + y^2)}{\lambda d}\right] \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где \mathfrak{F}^{-1} – обратное преобразование Фурье, $v = \frac{\xi}{\lambda d}$, $\mu = \frac{\eta}{\lambda d}$.

Для вычисления преобразования Фурье в (6) удобно использовать алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Существует другой подход к численному восстановлению цифровых голограмм, основанный на теореме свёртки. Выражение (4) можно рассмотреть как интеграл Дюамеля. Тогда численное восстановление цифровой голограммы можно будет представить как

$$\Gamma(\xi, \eta) = \mathfrak{F}^{-1} \left(\mathfrak{F} \left\{ U_h(x, y) U_r^*(x, y) \right\} \cdot \mathfrak{F} \left\{ \frac{i \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} D\right)}{\lambda D} \right\} \right), \quad (7)$$

где $D = \sqrt{d^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}$.

Согласно формуле (3) первое и второе слагаемое формируют постоянную составляющую, расположенную в нулевом порядке дифракции восстановленного оптического поля. Во внеосевой цифровой голографии мнимое изображение, действительное изображение и постоянная составляющая оказываются пространственно разнесены. Однако если рассматривать яркость

каждой из частей в изображении, то яркость постоянной составляющей будет на порядок выше остальных. Следовательно, при цифровом восстановлении в процессе нормализации значений большая часть диапазона будет приходиться на постоянную составляющую, что не обеспечит необходимого контраста для выделения остальных составляющих.

Для того чтобы удалить постоянную составляющую, можно обработать голограмму частотным фильтром, эквивалентным средней интенсивности голограммы (8).

$$U_h'(k\Delta x, l\Delta y) = U_h(k\Delta x, l\Delta y) - \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} U_h(k\Delta x, l\Delta y). \quad (8)$$

Проблемой данного метода является то, что восстановленное изображение также теряет интенсивность, поскольку фильтр применяется на голограмму целиком.

Принципиально другой подход предполагает использование фазовых сдвигов, где регистрируется несколько голограмм с разным известным сдвигом фазы опорного пучка. Восстановленное изображение может быть рассчитано как

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{1+i}{4E_r} [I_0(\xi, \eta) - I_{\pi/2}(\xi, \eta) + i(I_{\pi}(\xi, \eta) - I_{\pi/2}(\xi, \eta))], \quad (9)$$

где E_r – амплитуда опорного пучка, I_0 , $I_{\pi/2}$, I_{π} – интенсивности, полученные из голограмм, сделанных при фазовых сдвигах 0 , $\pi/2$, π соответственно.

Данный метод требует записи трех голограмм и специального оборудования в составе измерительной установке для реализации фазового сдвига.

Метод голографической интерферометрии основан на измерении различий в оптических разностях хода света, вызванных деформацией твердых тел или изменением коэффициента преломления в прозрачных средах. В основе метода лежит интерференция двух световых полей, представляющих два разных состояния объекта (до и после деформации). В результате интерференции этих полей образуется устойчивая интерференционная картина, содержащая информацию об изменениях, произошедших с поверхностью объекта между записями. В цифровой голографической интерферометрии формируется цифровая голограмма для каждого из состояний объекта.

Поле смещения объекта в заданной точке можно вычислить как

$$d(x, y) = \Delta\varphi(x, y) \frac{\lambda}{4\pi}, \quad (10)$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз между двумя состояниями объекта.

Для вычисления фаз по цифровым голограммам необходимо использовать рассмотренную ранее формулу (5).

В силу периодичности функции разности фаз кратные по 2π значения будут неотличимы друг от друга. Это явление называют фазовой неоднозначностью, а алгоритмы ее устранения называют алгоритмами развёртывания фазы. Получив полную разность фаз, можно вычислить значение поля смещения в каждой из точек восстановленного изображения, пользуясь формулой (10).

В третьей главе рассматривается моделирование численного восстановления цифровых голограмм, а также моделирование методов цифровой голографической интерферометрии. В главе также рассматривается новый метод восстановления цифровых голографических интерферограмм с перекрывающимися дифракционными порядками и новый метод для устранения спекл-шумов, возникающих при цифровом голографическом восстановлении.

Существует несколько подходов для получения искусственных цифровых голограмм. Первый метод называют прямым. Объект, на основе которого формируют голограмму (рис. 1а), разбивается на множество точечных источников отраженного света каждый со своей интенсивностью и фазой. Согласно принципу Гюйгенса дифракционное поле объекта есть суперпозиция дифракционных полей от каждого из точечных источников в плоскости голограммы. В результате образуется интерференционная картина (рис. 1б). Второй метод основан на модификации метода преобразования Френеля для голографического восстановления.

Для моделирования восстановления при помощи преобразования Френеля воспользуемся формулой (6). При использовании параметров восстановления, совпадающих с параметрами записи, получим восстановленную голограмму (рис. 1в). Можно видеть мнимое изображение (слева), постоянную составляющую (по центру) и расфокусированное действительное изображение (справа). Для моделирования восстановления при помощи метода свёртки воспользуемся формулой (7).

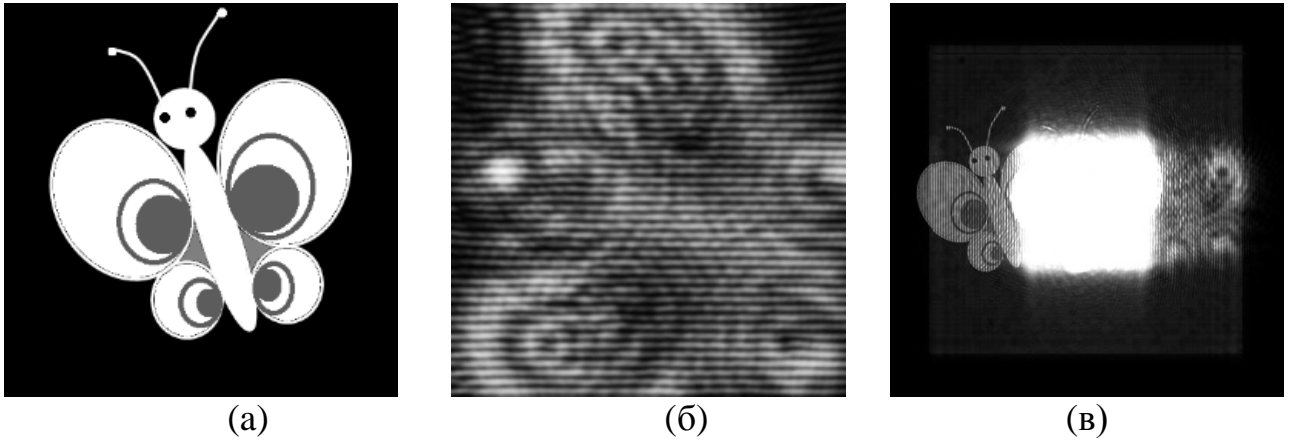


Рисунок 1 – Изображение для генерации цифровой голограммы (а), голограмма, полученная по этому изображению (б), и восстановление этой голограммы (в).

Рассмотрим улучшение метода подавления постоянной составляющей на основе частотного фильтра, описанного выражением (8). Основная сложность применения данного метода заключается в том, что интенсивность постоянной составляющей может на порядки превышать интенсивности остальных частей восстановленного изображения. В ходе исследований получен алгоритм, который формирует фильтр адаптивно в зависимости от места в голограмме, где он приложен. В основе нового метода лежит фрагментирование голограммы и взвешивание полученных фрагментов.

Возьмём на голограмме область величиной $M \times M$ пикселей с центром в пикселе, для которого вычисляется фильтр, и взвесим каждый пиксель внутри области коэффициентом $W_{k,l}$, где (k,l) – координаты пикселя внутри области. Характер функции взвешивания определим экспериментально, исходя из параметров измерительной системы, величин объектов исследования и размеров голограммы.

Тогда адаптивный частотный фильтр для голограммы может быть вычислен как

$$U'_h(m,n) = U_h(m,n) - \frac{\sum_{k=m-\frac{M}{2}}^{m+\frac{M}{2}} \sum_{l=n-\frac{M}{2}}^{n+\frac{M}{2}} U_h(k,l)w(k,l)}{M^2}, \quad (11)$$

где U_h – исходная голограмма, (m,n) – координаты пикселя в голограмме, $w_{k,l}$ – нормализованный в области фильтра вес пикселя.

Результаты применения предложенного фильтра приведены на рисунке 2.

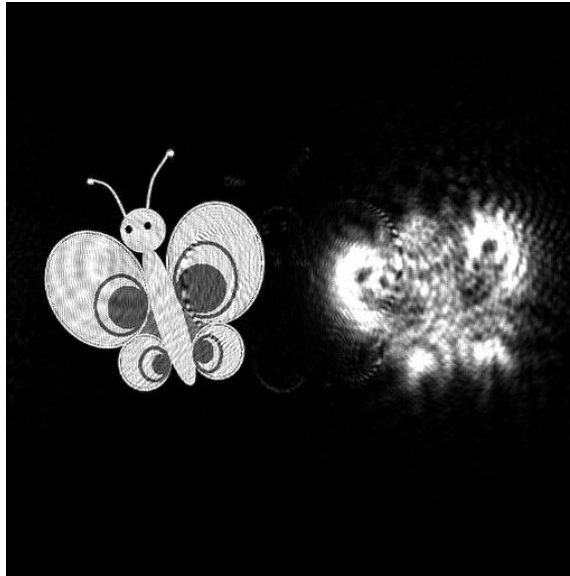


Рисунок 2 – Улучшенное подавление постоянной составляющей.

Для моделирования методов цифровой голографической интерферометрии рассмотрим следующий виртуальный эксперимент. Имеем плоскую прямоугольную пластинку, закрепленную одной стороной на вращающейся оси. Сформируем первую голограмму этой пластинки в каком-либо из положений, затем повернём пластинку вокруг оси на некоторый малый угол α и сформируем вторую голограмму. Поворот пластинки в этом случае будет являться моделью смещения, в сечении представляющей собой линейную функцию. Получив две голограммы, восстановим их при помощи одного из методов, например, метода свёртки, и вычислим разность фаз. Разность фаз по одному из сечений представлена на рисунке 3.

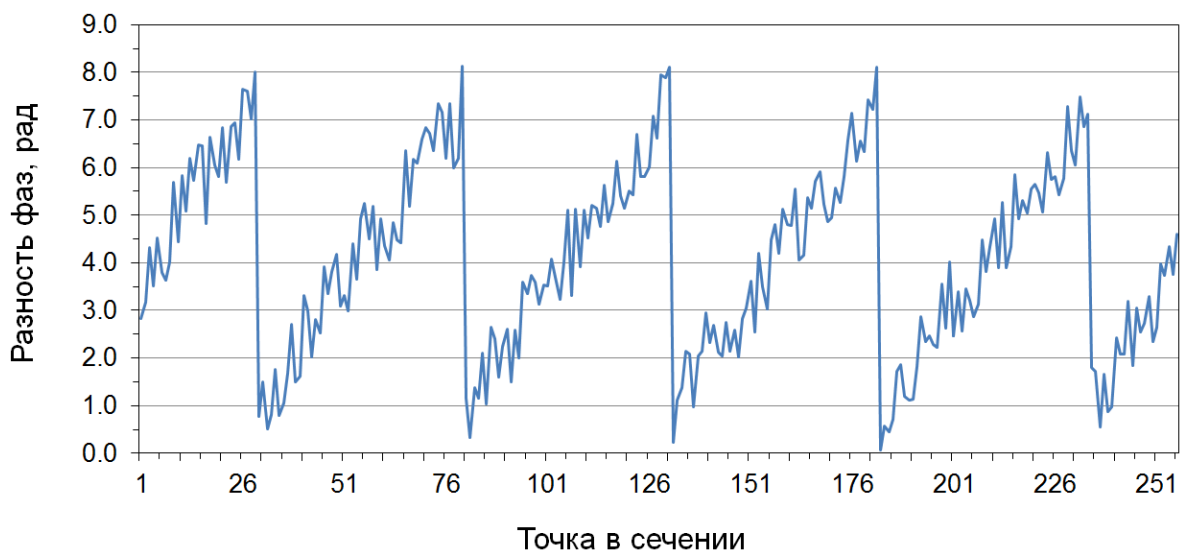


Рисунок 3 – Разность фаз по одному из сечений.

Места резких обрывов графика показывают, где происходит разрыв разности фаз и скачок на $\pm 2\pi$. Кроме того, видно, что сама разность фаз зашумлена. При моделировании вносился случайный шум величиной 5-20%. Алгоритмы развёртывания фазы чувствительны к шумам и могут давать ложные результаты при шумах высокой интенсивности. При шумах величиной до 50% развёртывание фазы происходит корректно, при шумах 50-70% происходит не более 20% ошибок обнаружения фазовых переходов (от общего числа фазовых переходов), при шумах более 80% выделить фазовые переходы становится практически невозможно. Спекл-шумы, возникающие в процессе цифрового голографического восстановления в силу ограниченности апертуры цифровой матрицы, могут давать в пике значения в 100% и более от величины исходного сигнала. Выполнив развёртывание разности, можно определить физическую величину смещения по формуле (10).

Для устранения шумов можно использовать сглаживающий фильтр. Однако пилообразный характер функции разности фаз сильно сужает круг допустимых вариантов. При фильтрации места фазовых переходов на $\pm 2\pi$ не должны быть сглажены, иначе алгоритм развёртывания фазы может пропустить фазовый переход. Следовательно, фильтр должен содержать априорную информацию о пилообразном характере функции разности фаз. Фильтр Калмана позволяет задавать априорную информацию о характере системы, связях между элементами системы и на основании этого получать более точную оценку сигнала.

В фильтре Калмана пилообразный характер функции разности фаз заложим в матрицу перехода между состояниями. Тогда для фильтрации одномерной функции свёрнутой по 2π разности фаз определим следующий фильтр Калмана:

$$\left\{ \begin{array}{l} x'_k = \left(c_1 \cdot \frac{x_{k-1} \bmod 2\pi}{2\pi} + c_2 \right) x_{k-1} \\ P'_k = \left(c_1 \cdot \frac{x_{k-1} \bmod 2\pi}{2\pi} + c_2 \right)^2 P_{k-1} + Q \\ x_k = x'_k + \frac{P'_k}{P'_k + R} (y_k - x'_k) \\ P_k = \frac{P'_k R}{P'_k + R} \end{array} \right. , \quad (12)$$

где x'_k – предсказанное значение функции разности фаз, *mod* – операция вещественного остатка от деления, c_1 и c_2 – матрицы настроечных

коэффициентов, x_{k-1} – значение функции разности фаз в предыдущий момент времени, P'_k – предсказание ошибки ковариации, x_k – обновление оценки значения функции разности фаз, P_k – обновление ошибки ковариации, Q – ковариация шума процесса, P_{k-1} – ошибка ковариации в предыдущий момент времени, R – ковариация шума измерения, y_k – измеренное значение функции разности фаз.

Рассмотрим разность фаз, полученную методом цифровой голографической интерферометрии (рис. 4а). Помимо истинных фазовых переходов есть несколько резких скачков разности фаз, которые алгоритм развёртывания мог бы принять за фазовый переход. Полученную разность фаз можно обработать предложенным фильтром Калмана и получить более качественный результат (рис. 4б).



Рисунок 4 – Разность фаз по центральному сечению (а) и после обработки предложенным фильтром Калмана (б).

Предложенный вариант фильтра Калмана можно использовать и для двумерного случая. Для этого одномерный фильтр Калмана сначала применяется для каждой строки изображения, затем для каждого столбца.

В четвертой главе проводится исследование параметров измерительной системы, рассматривается процесс разработки измерительной системы и ее испытания для получения цифровых голографических интерферограмм и измерения поля смещения реальных объектов.

Цифровое голографическое восстановление может быть корректно выполнено, если выполняется ряд условий. Для формирования внеосевой голограммы необходимо отклонить опорный пучок на определённый угол. Максимальная величина этого угла при заданной длине волны когерентного освещения λ и величине пикселя цифровой матрицы Δx составит

$$\theta = 2 \arcsin \frac{\lambda}{2\Delta x} = 2 \arcsin \frac{0.000628 \text{ мм}}{2 \cdot 0.0043 \text{ мм}} = 8.375^\circ. \quad (13)$$

Возьмём угол отклонения опорного пучка 3° , тогда $\Delta x = 0.012 \text{ мм}$. Согласно теореме Найквиста-Котельникова разрешающая способность регистрирующей голограммы среды должна быть минимум в 2 раза выше, следовательно, разрешающая способность должна быть

$$R \geq \frac{1}{2 \cdot 0.012 \text{ мм}} \geq 42 \text{ лин / мм}. \quad (14)$$

При физическом размере матрицы фотоаппарата $22.3 \times 14.9 \text{ мм}$ получим минимально допустимое разрешение 937×626 точек. Таким образом, цифровые голограммы с меньшим разрешением не могут быть корректно восстановлены.

Существуют также ограничения на расстояние записи голограммы при использовании восстановления методом преобразования Френеля. При максимально допустимом разрешении 4096×4096 получим

$$d \geq \frac{3N\Delta x^2}{\lambda} \geq \frac{3 \cdot 4096 \cdot (0.0043 \text{ мм})^2}{0.000628 \text{ мм}} \geq 361 \text{ мм}. \quad (15)$$

Существует расстояние, на котором преобразование Френеля перестает быть справедливым. Это расстояние совпадает с дальней зоной дифракции

Фраунгофера. Для одномерного случая и минимально допустимого разрешения 937 x 626 получим

$$\frac{\pi \cdot \Delta x^2 \cdot (N/2)^2}{\lambda d} \ll \frac{\pi \cdot (0.0043 \text{ мм})^2 \cdot (626/2)^2}{0.000628 \text{ мм} \cdot d} \ll \frac{9057 \text{ мм}}{d} \ll 1. \quad (16)$$

Исходя из выражения (16), расстояние записи d должно составлять десятки метров, чтобы преобразование Френеля потеряло справедливость.

Таким образом, в наших экспериментах выберем следующие параметры, удовлетворяющие вышеописанным ограничениям: угол отклонения опорного пучка возьмём равным 3° , расстояние записи голограммы – 40см. Для обеспечения наибольшей точности измерений будем формировать цифровые голограммы в разрешении 2048 x 2048 и в максимально допустимом разрешении 4096 x 4046 пикселей.

На основе вышерассмотренных параметров разработаем измерительную систему неразрушающего контроля. Измерительная система состоит из оптической подсистемы, средства регистрации голограмм, компьютера и программного обеспечения. В измерительные системы такого вида часто входит устройство управления, позволяющее задавать фазовые сдвиги опорного пучка когерентного света. Благодаря использованию метода цифровой голографической интерферометрии, позволяющего восстанавливать фазовые поля объекта из единственной голограммы, и разработанным методам анализа цифровых голографических интерферограмм устройство управления исключается из схемы разработанной измерительной системы. Общая схема системы приведена на рисунке 5.

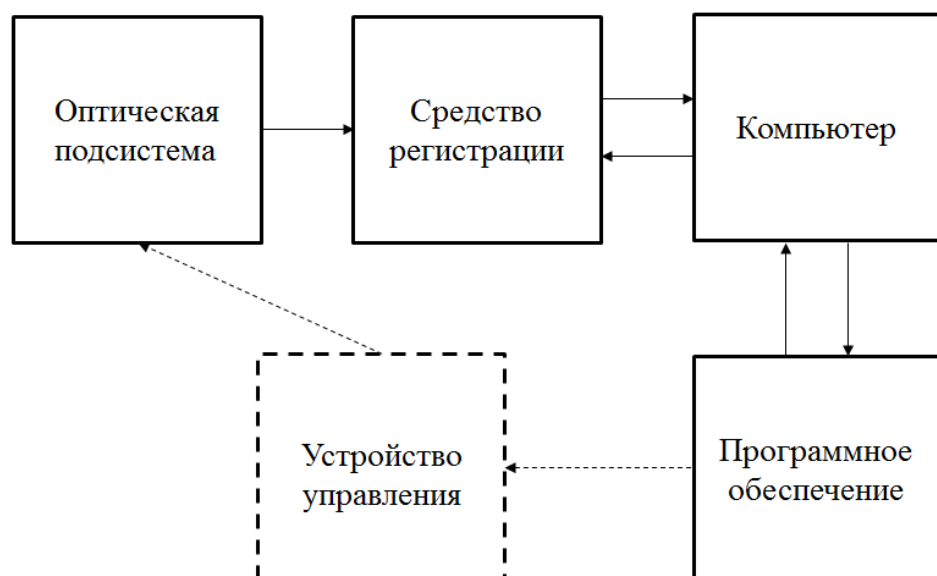


Рисунок 5 – Общая схема системы неразрушающего контроля.

В основе схемы для проведения голографических экспериментов лежит интерферометр, в котором луч света разделяется на два пучка, которые впоследствии сводятся в одной точке. В результате интерференции образуется голограмма, которая регистрируется цифровым способом при помощи камеры и передается на компьютер для последующей обработки. В случае цифровой голографической интерферометрии регистрируется две голограммы: первая – в исходном состоянии объекта, вторая – после применения нагрузки, вызывающей деформацию объекта.

Для экспериментальной установки была выбрана камера Canon Eos 650D с максимальным разрешением 5184 x 3456 и физической величиной матрицы 22.3 x 14.9мм (физическая величина пикселя в матрице составляет 0.0043мм). Использовался красный гелио-неоновый лазер с длиной волны 628нм, мощностью до 60мВт и длиной когерентности 15-20см. В лабораторных условиях обработку цифровых голограмм осуществлял компьютер Asus UL20FT с процессором Celeron U3400 1060МГц и 2Гб оперативной памяти.

Структурная схема измерительной установки приведена на рисунке 6, а общий вид измерительной установки приведен на рисунке 7.

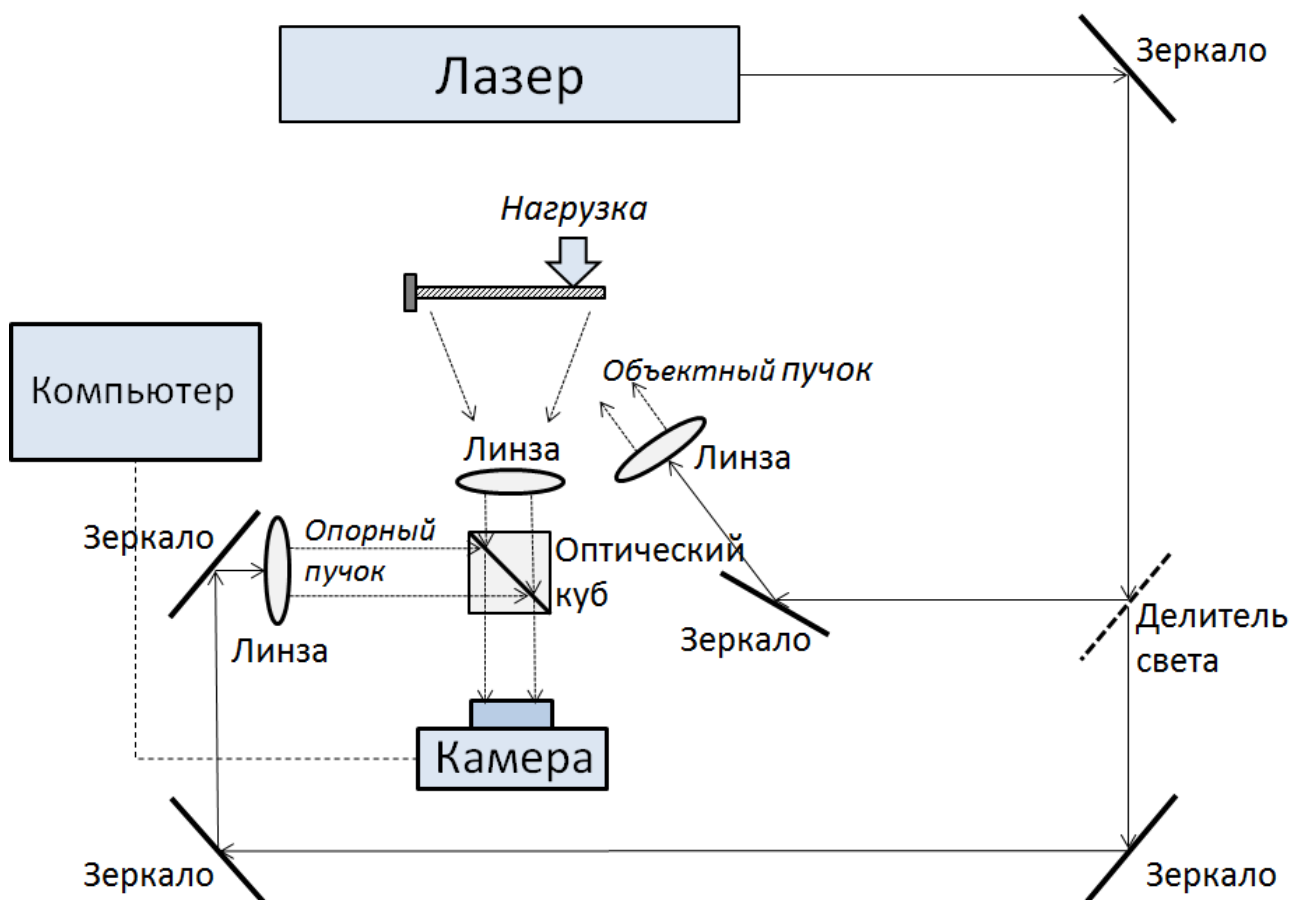


Рисунок 6 – Структурная схема измерительной установки.

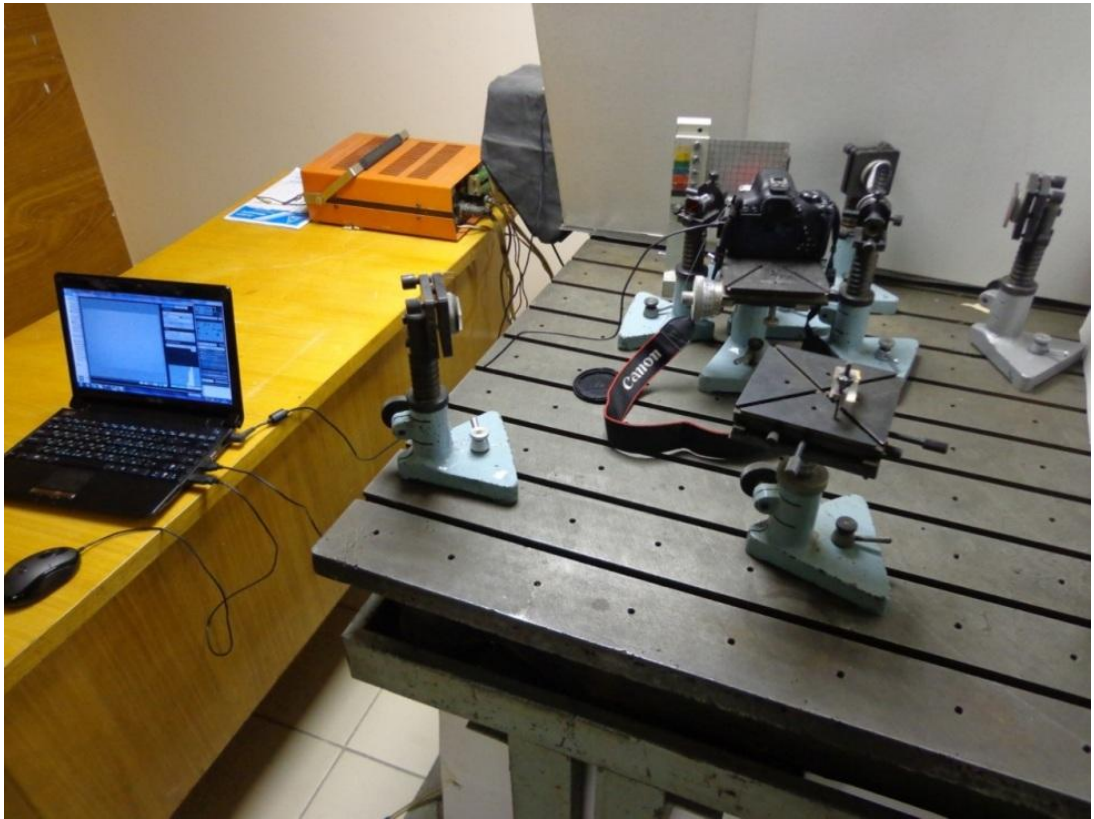


Рисунок 7 – Общий вид измерительной установки.

Рассмотрим цифровое голографическое восстановление реального объекта. В качестве объекта записи выберем легко узнаваемую керамическую фигурку, приведённую на рисунке 8а.

Поместим данную фигурку на место объекта исследования в измерительной установке и запишем голограмму. Восстановим данную голограмму и получим изображение, приведённое на рисунке 8б.



(а)



(б)

Рисунок 8 – Объект для записи в цифровую голограмму (а) и восстановленное изображение этого объекта (б).

Для исследования практической применимости методов цифровой голографической интерферометрии воспользуемся специальной пластинкой. Сзади пластинки расположено устройство нагружения, позволяющее задавать смещение в микрометровом диапазоне. Благодаря этому прибору мы можем оценить, насколько должна деформироваться пластинка и имеем представление о форме поля смещения. На основе этой оценки мы можем производить сравнение полученных экспериментальных полей смещения с заранее известными. Запишем в голограмму линейную часть функции смещения пластинки, что при формировании разности фаз даст вертикальные полосы.

Запишем и восстановим две цифровые голограммы: в исходном состоянии и после смещения 5мкм. Воспользуемся приёмом усреднения ошибки по нескольким измерениям (было записано и восстановлено 10 цифровых голограмм при одинаковой величине смещения, результаты восстановления усреднены). В итоге была получена разность фаз, изображённая на рисунке 9а. Затем применим предложенный алгоритм подавления шумов на основе фильтра Калмана с априорной информацией о форме функции фазы. Полученный результат можно видеть на рисунке 9б.

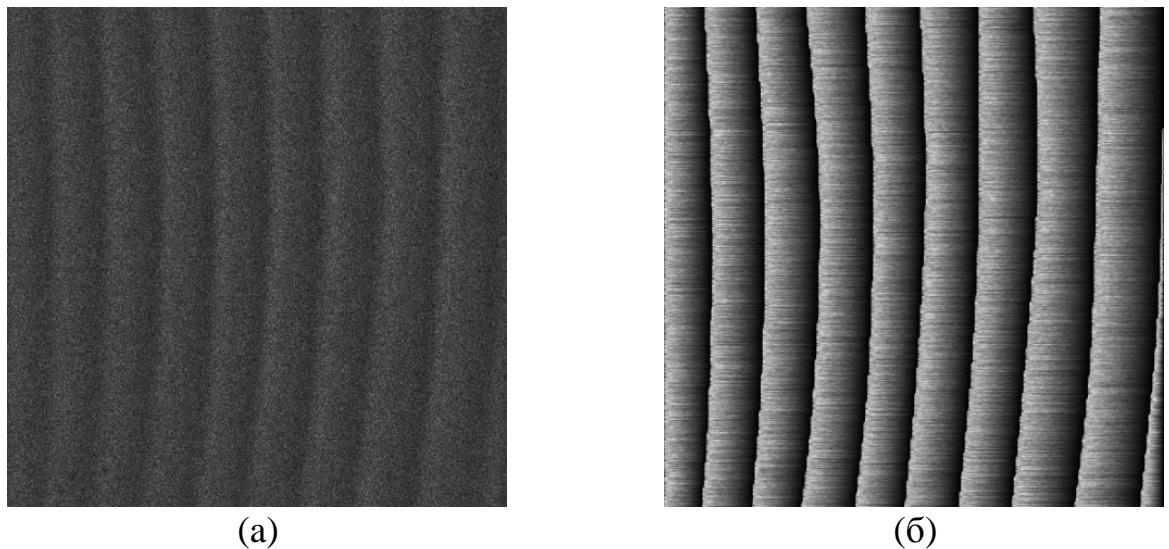


Рисунок 9 – Разность фаз после усреднения ошибки (а), после обработки предложенным алгоритмом подавления шумов (б).

При помощи формулы (10) можно рассчитать величину поля смещения в каждой точке двумерного массива полученной разности фаз. В нашем случае был записан участок пластинки 50мм x 50мм. На этом участке смещение имеет практически линейный характер, поэтому будем рассматривать пластинку в сечении. По записанным цифровым голограммам было восстановлено смещение в -5мкм. Знак «минус» объясняется направлением, в котором деформировалась пластинка, будем рассматривать модуль этой величины.

Рассмотрим графики экспериментально полученного смещения и заранее известного смещения, определённого спецификацией устройства нагружения (рис. 10).

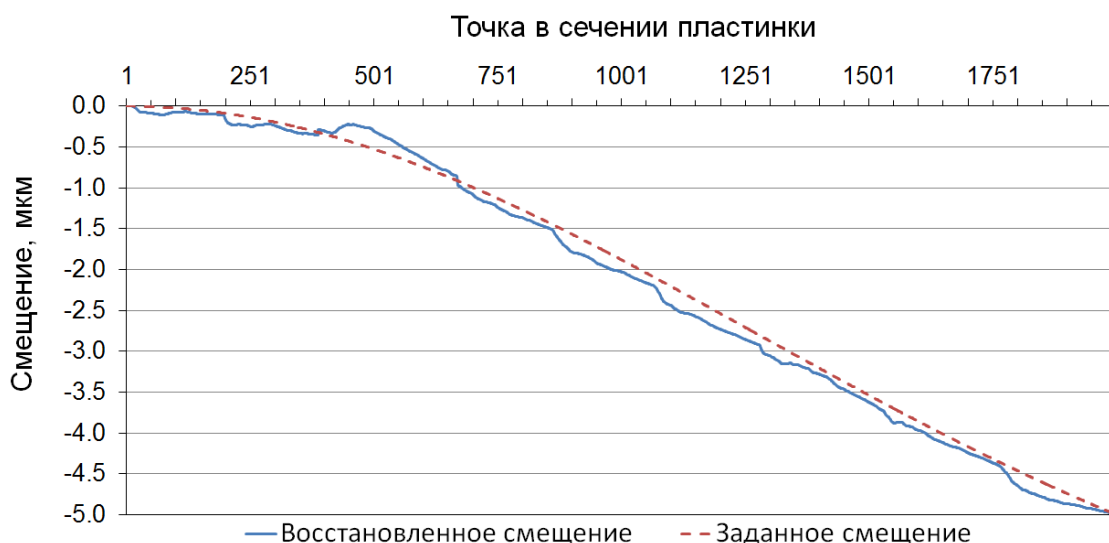


Рисунок 10 – Отклонение восстановленного смещения от изначально заданного.

Видно, что полученное смещение близко к изначально заданному смещению на всем протяжении графика. Обе кривые смещения имеют схожий вид отклонения от прямолинейной траектории. Отклонение кривых смещения говорит о том, что был восстановлен участок деформированной поверхности, выходящий из зоны прямолинейности. Рассмотрим график абсолютного отклонения экспериментальной кривой смещения от заранее известной кривой смещения, приведённый на рисунке 11.

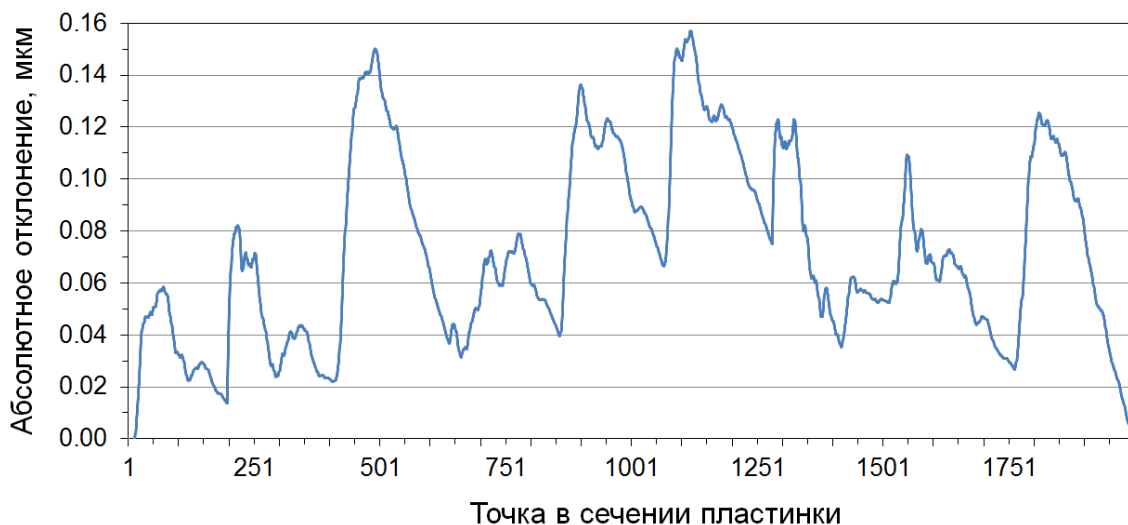


Рисунок 11 – График абсолютного отклонения экспериментальной кривой смещения от изначально заданной.

Максимальная абсолютная погрешность составила порядка 0.157мкм, средняя относительная погрешность – 9.91%. Проведя серию экспериментов с различными величинами смещения, были получены результаты, приведенные в таблице 1.

Таблица – Точностные показатели разработанной системы неразрушающего контроля при разных смещениях

№,п/п	Смещение, мкм	Макс. абсолютная погрешность, мкм	Средняя относительная погрешность, %
1	5	0.157	9.91
2	10	0.276	12.11
3	15	0.245	11.63
4	20	0.298	12.34
5	25	0.317	13.17
6	30	0.325	13.83
7	35	0.321	13.25
8	40	0.332	13.78
9	45	0.322	13.30
10	50	0.319	13.21

Таким образом, на смещении в 50 мкм максимальная абсолютная погрешность составила порядка 0.319мкм, а средняя относительная погрешность – 13.21%.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

В ходе данной диссертационной работы были получены следующие результаты:

1. Проведено теоретическое исследование методов анализа цифровых голографических интерферограмм. Показано, что существует два основных способа цифрового голографического восстановления: преобразование Френеля и метод свёртки. Для успешного применения методов цифровой голографической интерферометрии необходимы алгоритмы для устранения нулевого порядка дифракции и алгоритмы развёртывания фазы;

2. Выполнено компьютерное моделирование цифрового голографического восстановления и цифровой голографической интерферометрии. Было обнаружено, что алгоритм устранения постоянной составляющей методом частотной фильтрации не даёт приемлемого результата, а полученная методами цифровой голографической интерферометрии разность

фаз может быть сильно зашумлена, что мешает корректно выполняться алгоритму развёртывания фазы. Компьютерное моделирование подтвердило теоретическую микрометровую точность методов цифровой голографической интерферометрии;

3. Разработан новый метод восстановления цифровых голографических интерферограмм с перекрывающимися дифракционными порядками. Метод отличается от ранее известных взвешиванием фрагментов голограммы и обеспечивает высокое качество подавления нулевого порядка дифракции. Данный метод позволяет практически полностью устранить нулевой порядок дифракции и не оказывает негативного влияния на восстановленное изображение;

4. Разработан новый метод для устранения спекл-шумов, возникающих при цифровом голографическом восстановлении. Метод отличается от ранее известных конкретизацией априорной информации при использовании фильтра Калмана и позволяет работать в условиях интенсивных спекл-шумов;

5. Разработано программное обеспечение, реализующее оба метода цифрового голографического восстановления и методы цифровой голографической интерферометрии. Данное программное обеспечение можно использовать для измерения полей смещения как реальных объектов, так и виртуальных при компьютерном моделировании. При помощи данного программного обеспечения проводились все модельные и натурные эксперименты;

6. Проведены экспериментальные исследования методов цифровой голографической интерферометрии в применении к неразрушающему контролю гладких диффузно отражающих непрозрачных объектов. В качестве главного объекта исследования выступала дюралевая пластинка с устройством нагружения, позволяющим задавать смещение в микрометровом диапазоне. Это позволило оценить качество и степень достоверности реализованных алгоритмов. Серия натурных экспериментов подтвердила результаты моделирования и показала работоспособность предложенных решений в реальных условиях;

7. Разработан и реализован действующий образец программно-аппаратного комплекса для измерения полей смещения, который бесконтактным неразрушающим способом позволил измерить смещение пластинки в диапазоне до 50мкм, построить трёхмерную модель поля смещения и добиться максимальной абсолютной погрешности 0.157-0.319мкм и средней относительной погрешности порядка 10-13%;

8. Для действующего образца программно-аппаратного комплекса получены следующие характеристики: максимальная величина отклонения

опорного пучка – 8.375° , минимальное разрешение цифровой голограммы – 42 лин/мм, расстояние записи голограммы от 0.361м до 10м.

В приложениях приведены фрагменты разработанных программ численного расчёта цифровой голографической интерферометрии, акт о внедрении результатов диссертационной работы, копия свидетельства о регистрации программы в Фонде Алгоритмов и Программ СОРАН № PR13020.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук:

1) Гужов, В.И. Решение проблемы фазовой неоднозначности методом целочисленной интерферометрии / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Р.А. Кузнецов, А.Р. Вагизов // Автометрия. – 2013. – Т. 49, №2. – С. 85-91.

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

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

В научных журналах и изданиях, не вошедших в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук:

4) Гужов, В.И. Алгоритмы расшифровки интерференционных картин методом пошагового фазового сдвига / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Р.А. Кузнецов, Д.С. Хайдуков // Автоматика и программная инженерия. – 2013. – № 2(2). – С. 55-59.

5) Гужов, В.И. Уменьшение погрешности определения фазовых разностей при анализе интерферограмм методом пошагового фазового сдвига / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Р.А. Кузнецов, Д.С. Хайдуков // Автоматика и программная инженерия. – 2013. – №2 (2). – С. 47-54.

В сборниках трудов российских и международных научно-практических конференций:

б) Кузнецов, Р.А. Особенности голографического восстановления трехмерных объектов / Р.А. Кузнецов, Т.А. Герасимова // Сборник школы

молодых ученых «САИТ-2011», 12-16 сентября, 2011, Новосибирск, Россия. – 2011. – С. 87-90.

7) Kuznetsov, R.A. Noise reduction in digital holographic interferometry by means of the Kalman filter / R.A. Kuznetsov // Proceedings of International Summerworkshop IBSWorkshop, July 17-19, 2013, Chemnitz Technical University. – 2013. – P. 19-21.

8) Guzhov, V.I. The Elimination of the Phase Ambiguity in Projective Methods / V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, A.R. Vagizov, R.A. Kuznetsov // PROCEEDINGS RFBR and DST Sponsored «The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics» 10-13 September, 2011. Additional volume. – 2011. – P. 70-73.

9) Guzhov, V.I. Decoding algorithm for interference patterns in phase shifting interferometry without a priori shift knowledge / V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, D.S. Haydukov, R.A. Kuznetsov // Proceedings of IFOST 2012. The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST-2012, September 17-21, Tomsk Polytechnic University. – 2012. – Vol. 1. – P. 674-676.

10) Гужов, В.И. Оценка достоверности оптических измерений / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Д.С. Хайдуков, Р.А. Кузнецов // Материалы XI международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Том III. – 2012. – С. 146-149.

11) Гужов, В.И. Аналитическое решение интерференционной задачи / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Р.А. Кузнецов, П.А. Бердников // Материалы международной НПК «Инновационные информационные технологии». Т.2., Чехия, Прага, – М: МГИЭМ, НИУ ВШЭ. – 2013. – С. 195-200.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Формат 60 X 84 1/16, объём _____ п.л. тираж 100 экз.
Заказ № _____ подписано в печать _____.____.2013 г.
тел./факс (383) 346-08-57