


На правах рукописи



Ильиных Сергей Петрович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
С ПОШАГОВЫМ ФАЗОВЫМ СДВИГОМ**

Специальность 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2021

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

Научный консультант – **Гужов Владимир Иванович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет (НГТУ)»

Официальные оппоненты: **Герасимов Сергей Иванович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный уни-
верситет путей сообщения (СГУПС)»
г. Новосибирск

Демкин Владимир Петрович
доктор физико-математических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Национальный исследователь-
ский Томский государственный университет
(НИ ТГУ)» г. Томск

Шандаров Станислав Михайлович
доктор физико-математических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Томский государственный универ-
ситет систем управления и радиоэлектроники
(ТУСУР)» г. Томск

Ведущая организация: ФГБУ науки «Конструкторско-технологический
институт научного приборостроения Сибир-
ского отделения Российской академии
наук (КТИ НП СО РАН)» г. Новосибирск

Защита диссертации состоится «__» _____ 2021 г. в ___ часов ___ минут на
заседании диссертационного совета Д 003.005.02 при Федеральном государствен-
ном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии СО
РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Дата рассылки автореферата диссертации «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Ильичев Л.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации представлены результаты исследований, направленные на повышение точности измерений оптико-электронных измерительных систем с пошаговым фазовым сдвигом в видимом оптическом диапазоне.

Предложен обобщенный метод расшифровки интерференционных картин, основанный на векторном представлении основного уравнения двухлучевой интерференции. Метод с одной стороны позволяет избежать решения трансцендентных системы уравнений, а с другой стороны позволяет проводить анализ всех общеизвестных алгоритмов расшифровки интерференционных картин с единых позиций.

Предложен траекторный метод анализа интерференционных картин, получаемых методом фазовых сдвигов, который позволяет объективно оценивать их качество. В классическом подходе при неизвестной форме измеряемого волнового фронта по одной интерференционной картине невозможно объективно разделить полезную и шумовую составляющие.

Предложены методы преобразования траектории интерференционных сигналов, которые позволяют выполнять их расшифровку при произвольных величинах фазовых сдвигов.

Предложен метод повышения пространственного разрешения на основе субпиксельного сканирования.

Предложены устойчивые многочастотные методы устранения фазовой неоднозначности, которые не требуют анализа окрестности измеряемой точки.

Актуальность темы исследования. Наибольшее применение при построении интерференционных систем в последние годы получили методы расшифровки интерференционных картин на основе пошагового фазового сдвига. Это вызвано простотой задания значений фазового сдвига, несложными алгоритмами и высокой точностью расшифровки. При этом существующие схемы интерферометров легко модифицируются. Благодаря своим достоинствам метод применяется не только при анализе оптических интерференционных картин, но и в смежных областях техники, например, при измерениях, основанных на структурированном излучении,

при измерениях в СВЧ диапазоне и т.п. Однако данный метод имеет существенные недостатки. Погрешность измерений зависит от точности внесения фазовых сдвигов, изменения амплитуды интерференционной картины могут зависеть от величины сдвига, влияния нелинейности интенсивности при регистрации.

Таким образом, разработка и исследование новых методов и алгоритмов расшифровки интерференционных картин в оптико-электронных измерительных системах позволит устранить указанные недостатки и значительно расширить область их применения.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время сформировалось два основных направления разработки интерференционных измерительных систем:

- первое направление основано на совершенствовании алгоритмов анализа и расшифровки цифровых интерференционных картин с целью повышения точности и снижения чувствительности к дестабилизирующим факторам: фоновой засветки, неточности задания фазовых сдвигов и нелинейности профиля интерференционных полос;

- второе направление, получившее широкое распространение, связано с повышением пространственного (латерального) разрешения оптических измерительных интерференционных систем. Наиболее часто для этой цели используются методы апертурного синтеза, которые приводят к необходимости решения систем уравнений большой размерности. Поэтому особое внимание уделяется разработке эффективных методов решения таких систем уравнений.

Решение этих задач при создании высокоточных оптико-электронных систем позволит повысить надежность контроля напряженно-деформируемого состояния механизмов, определения параметров различных объектов, в том числе, биологических, и откроет новые функциональные возможности их применения, благодаря реализации преимуществ бесконтактных методов измерений.

Целью диссертации является повышение точности и пространственного разрешения оптико-электронных систем с пошаговым фазовым сдвигом.

В ходе исследования решались следующие **задачи**:

1. Разработка и исследование обобщенного метода анализа интерференционных сигналов в оптико-электронных измерительных системах с пошаговым фазовым сдвигом.
2. Разработка и исследование оптимальных по количеству фазовых шагов алгоритмов анализа интерференционных сигналов в оптико-электронных измерительных системах с пошаговым фазовым сдвигом.
3. Теоретическое обоснование, разработка и исследование методов траекторного анализа интерференционных сигналов.
4. Разработка алгоритмов определения полной фазы, не требующих нахождения фазовых переходов в локальной окрестности поля интенсивности интерференционных картин.
5. Разработка и экспериментальное апробирование метода повышения пространственного разрешения интерференционных измерительных систем на основе субпиксельного сканирования.
6. Разработка программно-алгоритмического комплексов, реализующих предлагаемые алгоритмы расшифровки и анализа цифровых интерференционных картин.
7. Разработка и экспериментальное исследование высокопроизводительных оптико-электронных измерительных систем высокого разрешения, реализующих предлагаемые методы и алгоритмы расшифровки интерференционных картин.

Научная новизна. 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, а также выступлениями на российских и международных конференциях.

Практическая значимость работы:

1) Разработанные методы оценки фазы интерференционных сигналов обладают более высокой чувствительностью и повышенным пространственным разрешением по сравнению с известными аналогами.

2) Разработанные методы синтеза выражений для расшифровки минимизируют количество фазовых сдвигов, что позволяет снизить время измерений.

3) Предлагаемые в работе принципы повышения пространственного разрешения оптико-электронных систем подтверждены экспериментально.

4) Разработанные измерительные системы применены для решения ряда прикладных задач исследования напряженно-деформируемого состояния различных объектов.

Методология и методы исследования. При выполнении работы применялось компьютерное моделирование методов оптической интерферометрии. Методы и алгоритмы анализа и расшифровки интерференционных картин основаны

на математическом аппарате аналитической и дифференциальной геометрии, цифровой обработки изображений. Результаты натуральных и компьютерных экспериментов обрабатывались с привлечением методов математической статистики.

Тема и содержание диссертационной работы, соответствуют паспорту научной специальности 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».

На защиту выносятся следующие положения:

1. Обобщенный метод определения разности фаз интерферирующих пучков, основанный на алгебраическом подходе к решению трансцендентных систем

уравнений, позволяет получать формулы расшифровки с произвольными величинами вносимых фазовых сдвигов.

2. Применение метода фазовых измерений на основе суммирования результатов двух алгоритмов расшифровки с одинаковыми по модулю и противоположными по знаку реакциями на нелинейность профиля интерференционных полос позволяет минимизировать погрешность вычисления фазы.

3. Формирование цифровой голограммы путем субпиксельного сканирования цифровых голограмм с низким разрешением позволяет повысить ее пространственное разрешение до 1000÷2000 линий на миллиметр.

4. Преобразование эллиптической траектории интерференционных сигналов оптико-электронных измерительных систем к круговому виду позволяет производить расшифровку интерференционных картин с неизвестными и случайными фазовыми сдвигами.

5. Оценивание разности фаз пространственных интерференционных сигналов на основе анализа их траектории в двух и более точках интерференционной картины после их усреднения позволяет снизить относительную погрешность до уровня 10^{-2} .

6. Устранение фазовой неоднозначности на основе модулярной арифметики с использованием интерференционных картин, полученных на длинах волн 488 нм и 633 нм, позволяет расширить диапазон однозначности интерференционных измерений до 5064 нм.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно или под его руководством и при его непосредственном участии. В совместных работах вклад соискателя состоял в обосновании целей, постановке задач и разработке методик исследований, постановке экспериментов, обсуждении их результатов и формировании общих выводов. Использование результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с коллегами, которым автор выражает благодарность за сотрудничество.

Достоверность и апробация результатов. Достоверность 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: Всесоюзный симпозиум «Применение лазеров», Куйбышев, 1990г., 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 7th 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 summerschool computer science : proc. of summerschool, Germany, Chemnitz, 7–13 Juli 2014, V междунар. науч.-практ. конф., Махачкала, 2014, International 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.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы в научно-исследовательских работах ряда научных предприятий и в

учебном процессе вуза, о чём свидетельствуют соответствующие акты о внедрении и справки о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано **54** печатные работы, в том числе 25 научных статей в журналах из перечня ВАК для докторских диссертаций и индексируемых в Web-of-Science и Scopus. Получены: патент РФ на полезную модель и **2** свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 264 наименования. Общий объем работы 320 страниц, включая 142 рисунка, 33 таблицы и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор направлений научных исследований. Сформулирована цель работы и поставлены задачи, решение которых должно обеспечить ее достижение.

В первой главе рассмотрены общие вопросы взаимодействия световых волновых фронтов с прозрачными и отражающими объектами. Показано, что результатом измерения оптико-электронными методами различных физических величин является оптическая разность хода, которая формирует фазовое изображение. Для прозрачных объектов эта зависимость описывает изменение оптической разности хода $\Delta(x, y)$ при прохождении через объект $\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta(x, y)$, а для отражающих объектов эта зависимость пропорциональна высоте рельефа $h(x, y)$ поверхности объекта $\phi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} h(x, y)$. Здесь учитывается двукратный ход отраженного пучка. Интенсивность оптического сигнала при интерференционных измерениях определяется как

$$I = A + B \cos(\phi) = A + B \cos(\phi_p - \phi_r), \quad (1)$$

где A - средняя яркость, B - амплитуда, а $\phi = \phi_p - \phi_r$ - разность фаз между объектным и опорным пучками интерферометра, соответственно.

Наибольшее применение при построении интерференционных измерительных систем в последние годы получили методы расшифровки на основе пошагового фазового сдвига. Это вызвано простотой внесения отдельных значений фазового сдвига, достаточно быстрыми алгоритмами и высокой точностью расшифровки. Расшифровка интерференционных картин с различными фазовыми сдвигами осуществляется путем решения системы трансцендентных (тригонометрических) уравнений

$$\begin{cases} I_1 = A + B \cos(\phi + \delta_1) \\ \vdots \\ I_n = A + B \cos(\phi + \delta_n) \end{cases}, \quad (2)$$

здесь δ - вносимый фазовый сдвиг в опорном плече интерферометра.

Недостатком метода является сложность решения системы уравнений (2) при произвольных значениях фазовых сдвигов. Предложен обобщенный способ построения формул расшифровки, основанный на алгебраическом подходе к решению трансцендентных систем уравнений. В этом способе система уравнений (2) представляется в векторном виде

$$\vec{I} = A \cdot \vec{R} + B \cdot \cos \phi \cdot \vec{C} - B \cdot \sin \phi \cdot \vec{S}, \quad (3)$$

где $\vec{C} = (\cos \delta_0, \dots, \cos \delta_{m-1})^T$, $\vec{S} = (\sin \delta_0, \dots, \sin \delta_{m-1})^T$ – набор значений синусов и косинусов, рассчитанных по известным величинам вносимых фазовым шагам δ , \vec{R} - единичный вектор.

Решение системы уравнений (3) имеет вид

$$\phi = \arctg \left(-\frac{\vec{I} \cdot \vec{C}^\perp}{\vec{I} \cdot \vec{S}^\perp} \right), \quad (4)$$

$$\phi = \arctg \left(-\frac{\vec{I}^\perp \cdot \vec{S}}{\vec{I}^\perp \cdot \vec{C}} \right), \quad (5)$$

где \vec{C}^\perp и \vec{S}^\perp - векторы ортогональные векторам \vec{C} и \vec{S} , соответственно.

Получены структурные матрицы формул расшифровки. Матрица имеет кососимметричный вид и удовлетворяет следующим условиям: $\vec{S}^\perp = \mathbf{M}\vec{S}$, $\vec{C}^\perp = \mathbf{M}\vec{C}$ и

$\mathbf{M}\vec{R} = \vec{0}$. Кроме того, сумма элементов матрицы по строке и по столбцу должна быть равно нулю. Например, структурная матрица, удовлетворяющая данным условиям, имеет вид

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \vdots & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \vdots & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & -1 & \vdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \vdots & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Матрица содержит минимальное количество ненулевых элементов.

Получаемые из системы уравнений (3) формулы расшифровки позволяют рассчитывать фазу интерференционных полос при произвольных значениях фазовых сдвигов. Отметим, что выражение (4) вычислять эффективнее, чем выражение (5), поскольку ортогональные вектора \vec{S}^\perp и \vec{C}^\perp требуется определять только один раз, в то время как вектор \vec{I}^\perp необходимо определять в каждой точке интерференционной картины. На основе обобщенной формулы (2) выполнен анализ 25 существующих формул расшифровки с различным количеством фазовых сдвигов. Показано, что существующие алгоритмы расшифровки, в том числе полученные методами МНК, Фурье и Carré, являются следствием обобщенного алгоритма расшифровки. Разработаны способы синтеза новых формул расшифровки путем выбора значений, числа фазовых сдвигов и формирования соответствующих структурных матриц.

Показана возможность применения концепции метода фазовых сдвигов для анализа одной интерференционной картины. В этом случае используются виртуальные фазовые сдвиги, которые образуются разностью фаз в смежных точках интерференционной картины

$$\operatorname{tg} \phi(x, y) = \frac{I''(x, y)}{I'(x, y)\phi'(x, y)} - \frac{\phi''(x, y)}{\phi'^2(x, y)} \equiv \frac{1}{\phi'} \frac{\partial}{\partial s} \ln \left(\frac{I'(x, y)}{\phi'(x, y)} \right), \quad (7)$$

здесь $(\cdot)' \equiv \partial / \partial s$ – пространственная производная $\phi'(x, y) = f[I'(kx, ky) / I'(x, y)]$, взятая в направлении максимального градиента интерференционных полос; k – масштабный множитель.

Важной задачей является выбор оптимального шага дифференцирования. При малых шагах дифференцирования повышается точность вычисления производных, но при этом наблюдается сильная зависимость от уровня шумов. При больших шагах дифференцирования преобладающей становится алгоритмическая погрешность вычисления производных интенсивности интерференционных полос. Методом компьютерного моделирования выполнено исследование влияния шага дифференцирования на точность вычисления первой и второй производных интенсивности интерференционных полос. Синтезированы двумерные интерференционные картины в полосах конечной ширины при 2% аддитивном шуме. Расчёт производился для области нулевой фазы, где соотношение сигнал/шум имеет минимальное значение. Шаг дифференцирования варьировался от 1 до 21 отсчета. Установлено, что при 150 отсчетах на одну интерференционную полосу оптимальным является шаг дифференцирования равный 9 отсчетам. Это соответствует 1/30 ширины интерференционной полосы.

Во второй главе выполнена оценка погрешностей измерения фазы при расшифровке интерференционных картин. Предложены способы устранения влияния нелинейности профиля интерференционных полос на результаты расшифровки интерференционных картин. Предложен метод повышения латерального (пространственного) разрешения изображений, получаемых в когерентно-оптических измерительных системах. Выполнен комплексный анализ погрешностей алгоритмов расшифровки. Классификация основных источников погрешности при измерении разности фаз в методах пошагового фазового сдвига приведена на рис. 1.



Рисунок 1 – Классификация источников погрешности определения фазы

Методом компьютерного моделирования исследована зависимость алгоритмов от влияния погрешности, обусловленной неправильным заданием фазовых сдвигов. Указанные параметры варьировались в пределах 1-20%. Анализ метода фазовых сдвигов показал, что качество расшифровки во многом зависит от выполнения условия постоянства средней интенсивности и контраста интерференционных полос. Для повышения качества расшифровки на основе обобщенной формулы расшифровки (4) разработаны методы определения амплитуд опорного и объектного пучков интерферометра непосредственно по данным измерений.

Это позволяет производить оценку мгновенных амплитуд опорного и объектного пучков интерферометра и строить эффективные алгоритмы коррекции интерференционных картин. Выполнена оценка эффективности предлагаемых методов

коррекции амплитуд. С этой целью суммировались противофазные интерференционные картины до и после коррекции амплитуд. Отклонение суммы интенсивностей интерференционных картин от их среднего значения до коррекции составило – 31.1%, а после коррекции – 0.02%. Это свидетельствует о том, что в результате коррекции гипотеза о постоянстве средней яркости и амплитуды интерференционных полос выполняется удовлетворительно.

Выполнено исследование известных формул расшифровки на устойчивость к искажению профиля интерференционных полос из-за нелинейности устройств ввода интерференционных картин в компьютер. Это так называемое гамма-искажение

$$\tilde{I} = [A + B \cos(\phi + \delta_1)]^\gamma, \quad (8)$$

здесь γ - коэффициент гамма-искажения.

Найдена оптимальная по числу фазовых сдвигов формула расшифровки, устойчивая к нелинейности профиля интерференционных полос. Формула расшифровки состоит из двух звеньев (9) и (10), имеющих одинаковую по модулю и противоположную по знаку реакцию на нелинейность профиля интерференционных полос.

$$\phi = \arctg \left[\frac{N}{D} \right] = \arctg \left[\frac{I_2 - I_4 - I_6 + I_8}{-I_2 - I_4 + I_6 + I_8} \right], \quad \delta_i = (i-1) \frac{\pi}{4}, \quad i = 1 \dots 8; \quad (9)$$

$$\phi = \arctg \left[\frac{N_1}{D_1} \right] = \arctg \left[\frac{\sqrt{2}(I_1 - I_5)}{\sqrt{2}(-I_3 + I_7)} \right], \quad (10)$$

$$\phi = \arctg \left[\frac{N + N_1}{D + D_1} \right] = \arctg \left[\frac{\sqrt{2}(I_1 - I_5) + I_2 - I_4 - I_6 + I_8}{\sqrt{2}(-I_3 + I_7) - I_2 - I_4 + I_6 + I_8} \right]. \quad (11)$$

На рис. 2 показаны траектории, которые образуются значениями числителей и знаменателей формул расшифровки (9) – (11). Коэффициент гамма принят равным 3.5.

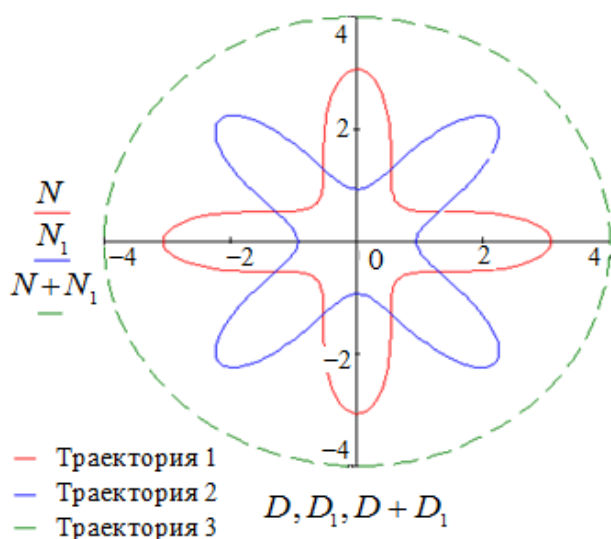


Рисунок 2 – Траектории, образуемые формулами расшифровки:

(9) – траектория 1;

(10) – траектория 2;

(11) – траектория 3 (сумма траекторий)

Из рис. 2 следует, что формулы расшифровки (9) и (10) имеют одинаковую по модулю и противоположную по знаку реакцию на нелинейность фазы, а их сумма позволяет компенсировать указанную нелинейность.

Выполнено сравнение результатов расшифровки для трех-, одиннадцатиточечного и предлагаемого (10) алгоритмов. Относительная погрешность фазы для трех-, одиннадцатиточечного и предлагаемого (10) алгоритмов составила: 0.52%, 0.12% и 0.02%. При длине волны лазера 633нм это соответствует погрешности измерения рельефа $\lambda/200$, $\lambda/800$ и $\lambda/5000$.

Для контроля прецизионных объектов требуются оптические измерительные системы с высоким пространственным разрешением. Предложен двухмерный алгоритм повышения пространственной разрешающей способности цифровых голограмм, основанного на «субпиксельном» сканировании. В результате сканирования получается набор значений интенсивности изображений с низким разрешением, которые сдвинуты относительно друг друга на некоторую величину, меньшую размера интегрирующей апертуры. На рис. 3 показана схема формирования высокоразрешающего растра размером 2×4 из двухэлементного низкоразрешающего изображения.

I1(1)		I1(2)				I2(1)		I2(1)		
a11	a12	a13	a14			a11	a12	a13	a14	0
a21	a22	a23	a24			a21	a22	a23	a24	0
I3(1)		I3(2)				I4(1)		I4(2)		
a11	a12	a13	a14			a11	a12	a13	a14	
a21	a22	a23	a24			a21	a22	a23	a24	0
0	0	0	0			0	0	0	0	0

Рисунок 3 – Схема формирования низкоразрешающих изображений путем смещения двухэлементного фотоприемника: $I_1(1)$ и $I_1(2)$ – исходное несмещенное изображение; $I_2(1)$ и $I_2(2)$ – изображение смещенное на половину размера интегрирующих апертур $I_1(1)$ и $I_1(2)$ в направлении координатной оси x ; $I_3(1)$ и $I_3(2)$ – в направлении координатной оси y , а $I_4(1)$ и $I_4(2)$ – изображение смещенное как по координатной оси x , так и по координатной оси y соответственно.

Элементы синтезируемого высокоразрешающего растра $a_{ij} \equiv x_k$ можно описать системой уравнений

$$A \cdot x = I \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{8 \times 8} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix}_{1 \times 8} = \begin{bmatrix} I_1(1) \\ I_2(1) \\ I_1(2) \\ I_2(2) \\ I_3(1) \\ I_4(1) \\ I_3(2) \\ I_4(2) \end{bmatrix}_{1 \times 8} \quad (12)$$

Размерность системы равна числу элементов синтезируемого высокоразрешающего растра. Так, при формате изображения 1000×1000 и увеличении разрешения в два раза по каждому из направлений, размерность системы уравнений будет равна $N = 4 \times 10^{12}$. Найдено блочное представление системы уравнений (12), что позволяет строить высокоразрешающее изображение по отдельным независимым сечениям. На рис. 4 показана последовательность синтеза высокоразрешающего растра для увеличения пространственного разрешения цифровой голограммы в два раза в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно.

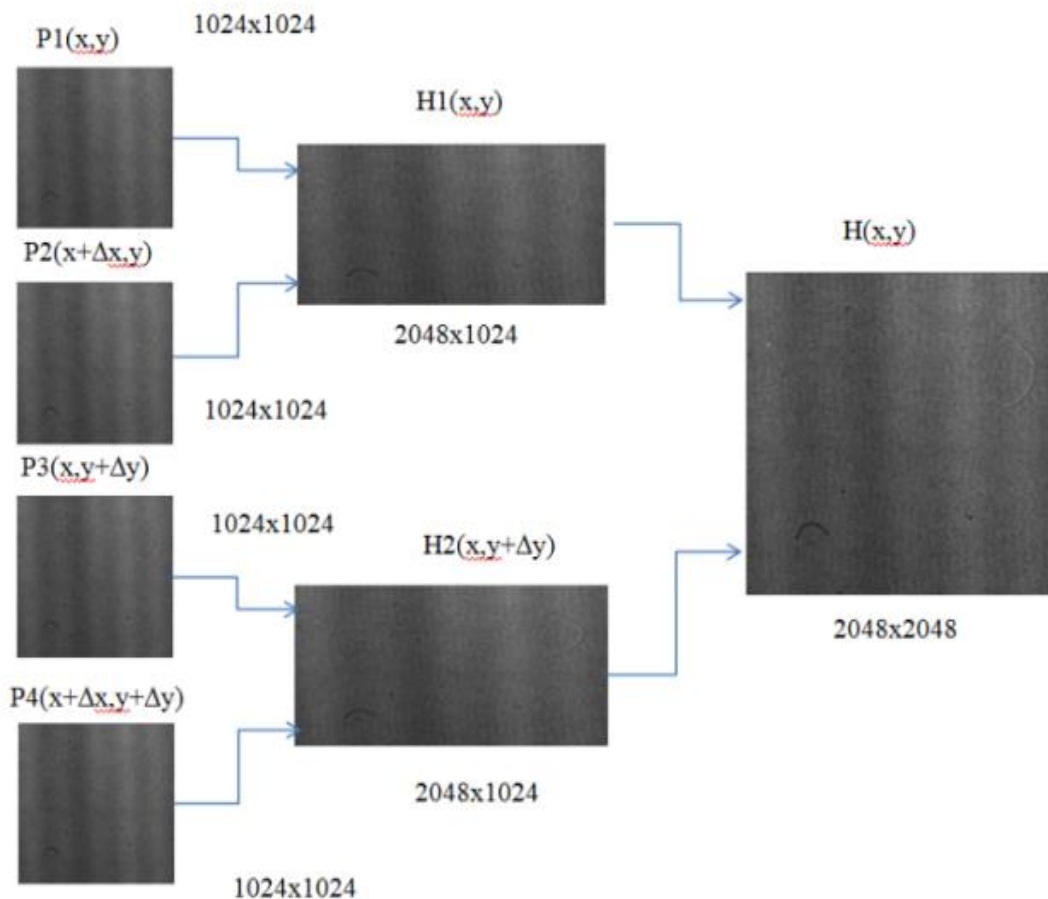


Рисунок 4 – Последовательность синтеза высокоразрешающего растра

На рис. 5 показаны восстановленные изображения из цифровых голограмм размером 1024x1024 элементов и синтезированного высокоразрешающего растра 2048x2048.

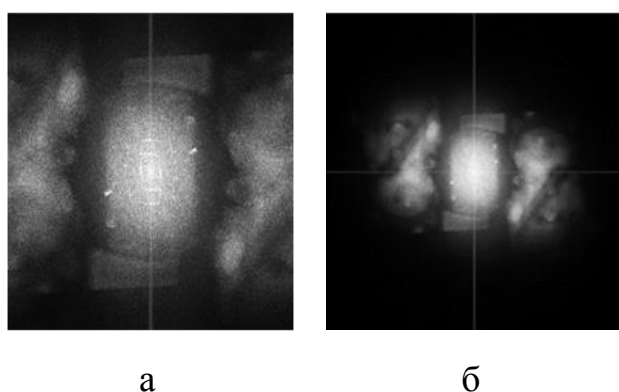


Рисунок 5 – Результат восстановления изображений из цифровых голограмм: (а) - восстановленное изображение из низкоразрешающей голограммы, (б) - восстановленное изображение из синтезированной высокоразрешающей голограммы

Из рис. 5 видно, что низкоразрешающая голограмма (слева) не позволяет восстановить полный размер изображения объекта, а синтезированная высокоразрешающая голограмма (справа) восстанавливает изображение объекта полностью. Объем

информации в таких голограммах может достигать гигапиксельной величины, поэтому для повышения скорости обработки цифровых интерференционных картин большого размера применялись современные методы параллельных вычислений по технологии GPGPU (CUDA), что позволило синтезировать цифровые изображения с высоким разрешением в режиме реального времени.

В третьей главе предложен новый подход к анализу интерференционных сигналов, получаемых в оптико-электронных интерференционных измерительных системах, основанный на анализе их траектории в пространстве интерференционных сигналов. Так, при трех интерференционных картинах траектория образуется пересечением квадратичной поверхности $f_1(\vec{I})$ с плоскостью $f_2(\vec{I})$

$$\begin{cases} f_1(\vec{I}) = \vec{I}^T \mathbf{A} \vec{I} = 0 \\ f_2(\vec{I}) = (\vec{a} \cdot \vec{I}) + d = 0 \end{cases} \quad (13)$$

где \mathbf{A} - матрица квадратичной формы, вектор \vec{a} и d - коэффициенты уравнения общего вида плоскости, оператор $(* \cdot *)$ - скалярное произведение векторов.

В случае, когда фазовые сдвиги удовлетворяют условию: $\delta = 0, \pm \frac{2\pi}{3}$ и при равенстве амплитуд интерференционных полос: $B_1 = B_2 = B_3 = B$, получаем, $f_1(\vec{I}) = 0$ - уравнение сферы радиусом $3B/2$ с центром в точке $\vec{I}_0 = [A_1 \ A_2 \ A_3]^T$ и $f_2(\vec{I}) = 0$ - уравнение плоскости, нормаль которой совпадает с вектором \vec{I}_0

$$\begin{cases} f_1(\vec{I}) = (I_1 - A_1)^2 + (I_2 - A_2)^2 + (I_3 - A_3)^2 = 0 \\ f_2(\vec{I}) = (\vec{a} \cdot \vec{I}) + d = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Траектория образуется пересечением сферы $f_1(\vec{I})$ плоскостью $f_2(\vec{I})$. Установлено, что в общем случае траектория представляет собой n -мерную плоскую кривую - гиперэллипс. На рис. 6,а-д показаны средние сечения интерференционных картин с фазовыми сдвигами $\delta_1 = -\frac{2\pi}{3}$, $\delta_2 = 0$, $\delta_3 = \frac{2\pi}{3}$ с линейным (первый столбец – синие линии) и с нелинейным распределением фазы (красные линии), а

также их траектории в пространстве интенсивностей с линейным (рис.б,г) и с нелинейным распределением фазы (рис.б,д). Здесь вектора \vec{R}_1 - годограф, а \vec{R}_2 - фазор траектории. Из рисунка б следует, что профиль интерференционных полос определяет только положение точек на траектории кривой, сама траектория инвариантна к профилю интерференционных полос. Это позволяет одинаковым образом выполнять анализ интерференционных картин как с простым, так и со сложным распределением фазы интерференционных полос. Отметим, что при невыполнении условия равенства амплитуд интерференционных полос, например, при наличии шумов или неточном задании фазовых сдвигов траектория кривой будет отличаться от эллиптической и не будет принадлежать плоскости, нормаль к которой $\vec{N}_b = [A \ B \ C]^T$ определяется коэффициентами ее уравнения: $A = -2\sin(\delta_1 - \delta_2)$, $B = 2\sin(\delta_2)$ и $C = -2\sin(\delta_1)$.

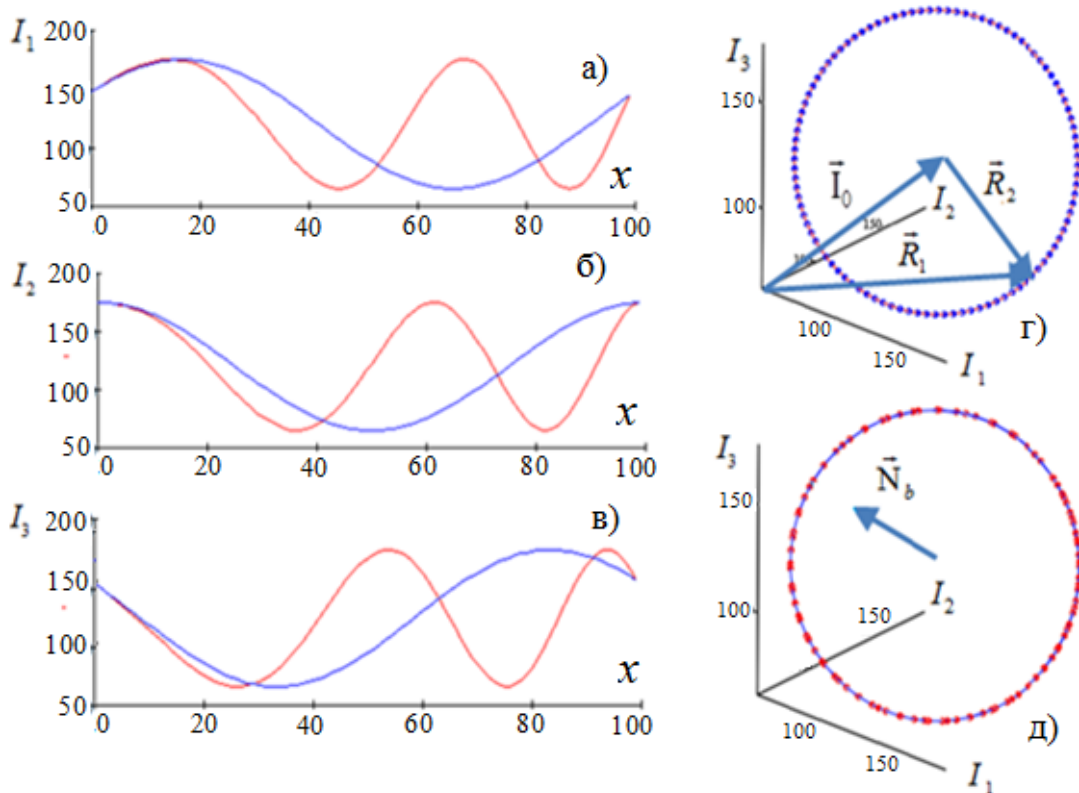


Рисунок 6 – Профили интерференционных полос с различными фазовыми сдвигами и соответствующие им эллиптические траектории

Это позволяет объективно разделить полезную и шумовую составляющую интерференционных сигналов. Отметим также, что при классическом подходе для неизвестной формы измеряемого волнового фронта по одной интерференционной картине различить полезную и шумовую составляющие невозможно.

При высокоточных измерениях необходимо выполнять калибровку фазовых сдвигов. В данной главе разработаны и исследованы новые методы анализа интерференционных картин, не требующие априорного знания вносимых фазовых сдвигов. Методы основаны на преобразовании эллиптической траектории интерференционных сигналов к круговой траектории. Такая траектория соответствует формулам расшифровки с известными фазовыми сдвигами и не требует их определения. С этой целью интенсивности интерференционных картин преобразуются таким образом, чтобы эллиптическая траектория проецировалась на некоторую плоскость в виде круга. Возможны различные способы реализации такого преобразования. Первый способ заключается в преобразовании наклонного сечения некоторого кругового цилиндра в сечение параллельное его основанию. Для этого каждая точка траектории из наклонной плоскости α проецируется вдоль направляющей кругового цилиндра $\vec{L} = \vec{M} - \vec{P}$ на плоскость β , которая параллельна его основанию (рис. 7). При этом эллиптическая траектория преобразуется в круговую. Фазовые сдвиги для данной траектории известны и составляют: $\delta_1 = -2\pi/3$, $\delta_2 = 0$ и $\delta_3 = 2\pi/3$, соответственно. Данные величины фазовых сдвигов обеспечивают максимальное расстояние между углами фазовых сдвигов в диапазоне от 0 до 2π . Это позволяет получить максимальную устойчивость алгоритма расшифровки к шумам интерференционных сигналов \vec{I} в сравнении с другими наборами возможных фазовых сдвигов. На рис. 7 показана геометрическая интерпретация метода (алгоритм I).

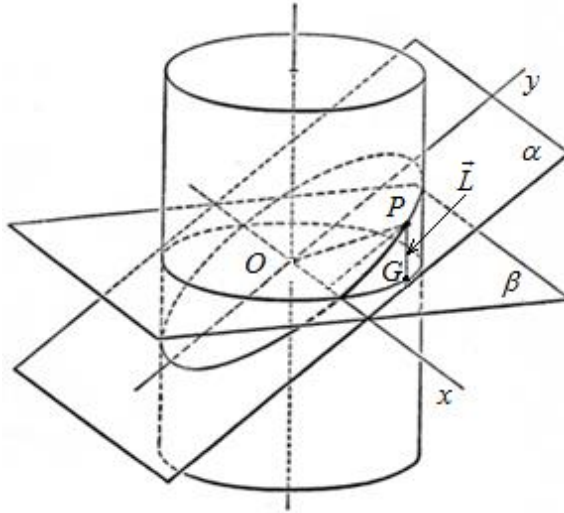


Рисунок 7 – Проецирование плоскости (α), соответствующей эллиптическому сечению, на плоскость основания цилиндра (β)

Метод реализуется путем нахождения проекции эллиптического сечения кругового цилиндра на его основание. С этой целью находится направляющий вектор образующей кругового цилиндра

$$\vec{L} = [\cos(\Omega) \quad \sin(\Omega) \quad b/a]^T, \quad (15)$$

здесь Ω — угол между положительным направлением оси x и главной осью эллиптического сечения, a и b - длина его большой и малой осей соответственно.

Затем каждая принадлежащая траектории точка \vec{P} проецируется вдоль направляющей цилиндра \vec{L} на плоскость, которая параллельна основанию цилиндра, по правилу:

$$\vec{G} = \vec{P} - (\vec{L} \times \vec{P}) \times \vec{L}. \quad (16)$$

В случае малых участков траектории нахождение параметров эллиптической кривой с достаточной точностью затруднительно.

Другой возможностью является нахождение кругового сечения конуса, в который вписано эллиптическое сечение (алгоритм II). Для этого произвольно задаем точку вершины конуса S и ищем точку O , для которой углы между осью конуса и образующими прямого кругового конуса будут равны. Тогда образующие, пересекающие плоскость перпендикулярную оси конуса, образуют след в виде окружности (рис. 8).

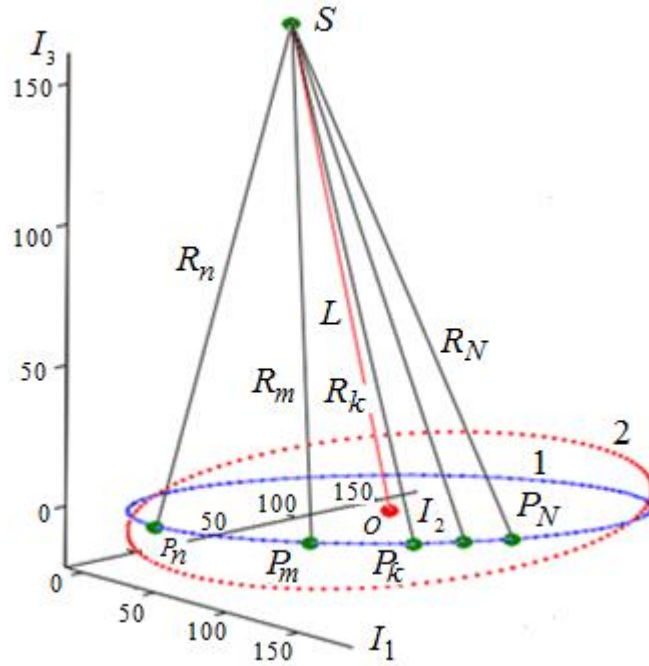


Рисунок 8 – Проецирование плоскости, соответствующей эллиптическому сечению (1), на плоскость основания конуса (2)

Координаты вершины конуса $S(x, y, z)$ в 2D-плоскости естественно выбрать как среднее геометрическое точек $P(x, y)$, а z -координата выбирается равной 3-5 предполагаемому размеру большой оси эллипса. Углы между осью конуса \vec{L} и образующими конуса \vec{R} должны удовлетворять условию:

$$\frac{(\vec{L} \cdot \vec{R}_m)}{|\vec{L}| \cdot |\vec{R}_m|} = \frac{(\vec{L} \cdot \vec{R}_n)}{|\vec{L}| \cdot |\vec{R}_n|} = \dots = \frac{(\vec{L} \cdot \vec{R}_N)}{|\vec{L}| \cdot |\vec{R}_N|}. \quad (17)$$

Выполнено компьютерное моделирование алгоритмов. Синтезировались три интерференционные картины с фазовыми сдвигами $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = \pi/4$ и $\delta_3 = \pi/2$. На них накладывался 5% аддитивный шум. В результате рассмотренных преобразований получаем по три интерференционные картины с известными фазовыми сдвигами $\delta_1 = -2\pi/3$, $\delta_2 = 0$ и $\delta_3 = 2\pi/3$ для каждого из алгоритмов. Среднеквадратическая ошибка вычисления фазы по алгоритму II в сравнении с алгоритмом I уменьшилась с 0.093 до 0.015 радиан. Снижение погрешности обусловлено тем, что в алгоритме II не требуется вычислять параметры эллиптической траектории.

Выполненные исследования алгоритмов преобразования траектории позволили сделать следующие выводы:

1. Данные алгоритмы преобразования траектории интерференционных сигналов к круговому виду не требуют знания действительной величины вносимых фазовых сдвигов, что позволяет производить расшифровку интерференционных картин с неизвестными, в том числе случайными, фазовыми сдвигами;
2. В отличие от классического метода фазовых сдвигов, который требует не менее трех интерференционных картин для расшифровки фазовой информации, здесь достаточно только двух интерференционных картин. Таким образом, как минимум на треть можно уменьшить время необходимое для регистрации интерференционных картин. Это важно при выполнении измерений динамических объектов в режиме реального времени;
3. Алгоритм II является более эффективным в сравнении с алгоритмом I, поскольку исключает необходимость определения коэффициентов уравнения эллиптической траектории.

Усреднение результатов измерений является эффективным способом снижения погрешности. Недостаток такого подхода заключается в необходимости регистрации большого количества дополнительных интерференционных картин в процессе измерения. Это приводит к увеличению времени их регистрации и соответственно к снижению частоты измерений. Так, при использовании для регистрации интерференционных картин высокоскоростной цифровой видеокамеры (FastVideo 500 ООО «Фаствидео», г. Дубна, размер матрицы 600x512 с частотой захвата кадров 500 Гц), реальная частота измерений с учетом числа усредняемых кадров не превышает $5 \div 10$ измерений в секунду. При измерении быстропротекающих динамических процессов, например, при ударно-волновом нагружении в задачах исследования напряженно-деформируемого состояния объектов, такой частоты измерений может оказаться недостаточно. Предложен метод измерения, который позволяет снизить количество регистрируемых интерференционных картин при сохранении его помехоустойчивости. Метод заключается в измерении разности фаз

между двумя произвольно выбираемыми точками интерференционной картины I_A и I_B . При изменении фазовых сдвигов точка с координатами $I = (I_A, I_B)$ будет описывать эллиптическую траекторию

$$\frac{(x_i - x_0)^2}{b_1^2} + \frac{(y_i - y_0)^2}{b_2^2} - 2 \frac{(x_i - x_0)(y_i - y_0)}{b_1 b_2} \cos(\phi_2 - \phi_1) = \sin^2(\phi_2 - \phi_1) \quad (18)$$

или

$$a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + 2a_{13}x + 2a_{23}y + a_{33} = 0,$$

здесь x, y - интенсивности, x_0, y_0 - средние интенсивности, а b_1 и b_2 - амплитуда интерференционных полос в точках А и В, соответственно, $\phi_2 - \phi_1 = \Delta\phi$ - разность фазы между точками А и В интерференционной картины, соответственно.

Разность фаз определяется из коэффициентов уравнения эллипса (19)

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \arccos\left(-\frac{a_{12}}{\sqrt{|a_{11}|}\sqrt{|a_{22}|}}\right). \quad (19)$$

Сканирование интерференционной картины выполнялось следующим образом: одна из точек сохраняет свое положение. Тогда, перемещая другую точку по всей интерференционной картине, получим набор фазовых разностей, которые образуют фазовое изображение. Изменяя положение неподвижной точки, можно получить другие наборы фазовых изображений. Для интерференционных картин размером $M \times N$ можно получить $\frac{M \times N}{2}$ различных фазовых изображений. Выполнено исследование метода путем компьютерного моделирования. Синтезировалось серия из пяти интерференционных картин, на которые накладывался 5% аддитивный шум. Случайным образом выбиралась опорная точка, затем выполнялось сканирование второй точкой по всей поверхности интерференционной картины и рассчитывалось фазовое изображение (разности фаз) по формуле (19). Затем положение опорной точки изменялось и рассчитывалось другое фазовое изображение. После устранения фазовой неоднозначности производилось усреднение фазовых изображений. Данный метод позволяет снизить относительную погрешность определения разности фаз до 10^{-2} при усреднении по 50 фазовым изображениям. Кроме

того, увеличение количества опорных точек приводит к увеличению числа комбинаций их возможных положений, а, следовательно, получению большего количества фазовых изображений, что позволяет более эффективно подавлять шумы при их усреднении. Достоинством данного метода является возможность получения большого количества фазовых изображений без регистрации дополнительных интерференционных картин.

В четвертой главе рассматривается одна из важнейших проблем оптической интерферометрии – устранение $n\pi$ -неоднозначности. Оптические поля регистрируются квадратичными фотоприёмниками. Поэтому фазовое изображение объекта может быть восстановлено только в пределах $\pm\pi$ или $0 \div 2\pi$. Процесс устранения $n\pi$ -неоднозначности называется «развертыванием» фазы. На рис. 9 показан эффект неоднозначности, при котором одной и той же интерференционной картине может соответствовать несколько решений «развернутой» фазы (полной фазы Φ).

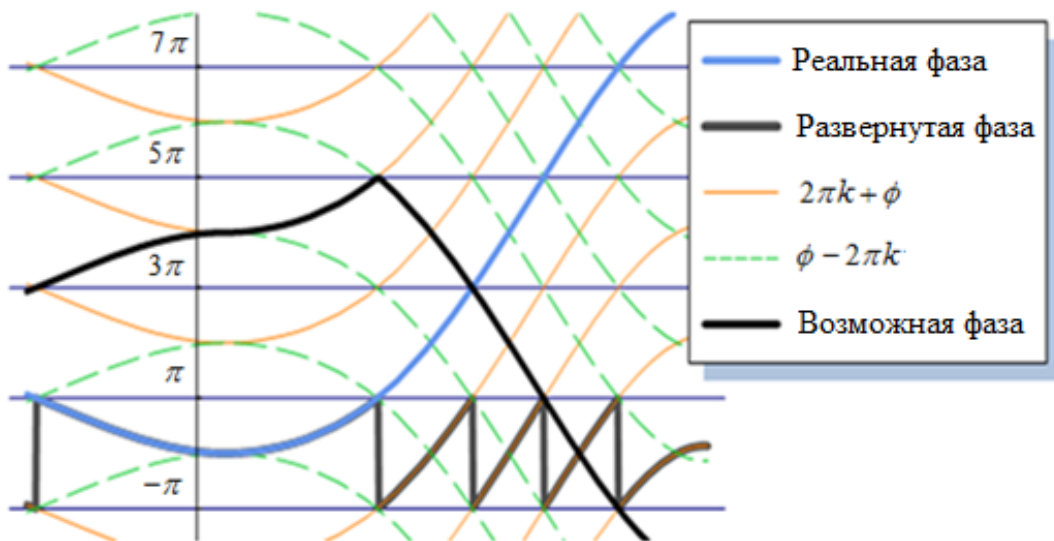


Рисунок 9 – Сетка возможных решений, образованная линиями $\Phi = \phi + 2\pi k$

Показано, что методы разворачивания фазы с одной длиной волны (частотой) полностью не решают поставленную проблему. С их помощью можно восстанавливать волновые фронты только с относительно гладкой поверхностью. Существующие многочастотные методы решения этой проблемы, например, методы, использующие построение эквивалентной длины волны, обладают существенным

недостатком: их погрешность возрастает пропорционально увеличению диапазона однозначного представления фазы.

Основная идея предлагаемого подхода заключается в представлении фазы интерференционных сигналов как целых чисел (вычетов) в системе остаточных классов (СОК), где длина волны лазерного излучения отождествляется с модулем этой системы. Данная задача эквивалентна задаче перевода целых неотрицательных чисел из СОК в позиционную систему счисления.

С этой целью фазы интерференционных полос ϕ_1 и ϕ_2 (рис.10,а) нормируются по длине волны лазерного излучения $\delta_1 = \text{int} \left[\frac{M_1}{2\pi} \phi_1 \right]$ и $\delta_2 = \text{int} \left[\frac{M_2}{2\pi} \phi_2 \right]$ образуя вычеты СОК (рис. 10,б). Здесь для двух длин волн λ_1 и λ_2 : $M_1 = \text{int}[\alpha\lambda_1]$ и $M_2 = \text{int}[\beta\lambda_2]$ - модули СОК, а α и β - масштабирующие множители. Вычеты δ_1 и δ_2 образуют систему сравнений

$$\begin{cases} \delta_1 = \text{mod}(R, M_1) \\ \delta_2 = \text{mod}(R, M_2) \end{cases} \quad (20)$$

здесь R - решение системы сравнений (20).

Так по набору имеющихся значений фаз ϕ_1 и ϕ_2 можно однозначно восстановить абсолютное значение полной фазы Φ , не прибегая к операции «развертывания» фазы. Наибольший диапазон однозначности равный $M_1M_2 - 1$, получается, если M_1 и M_2 являются взаимно простыми числами.

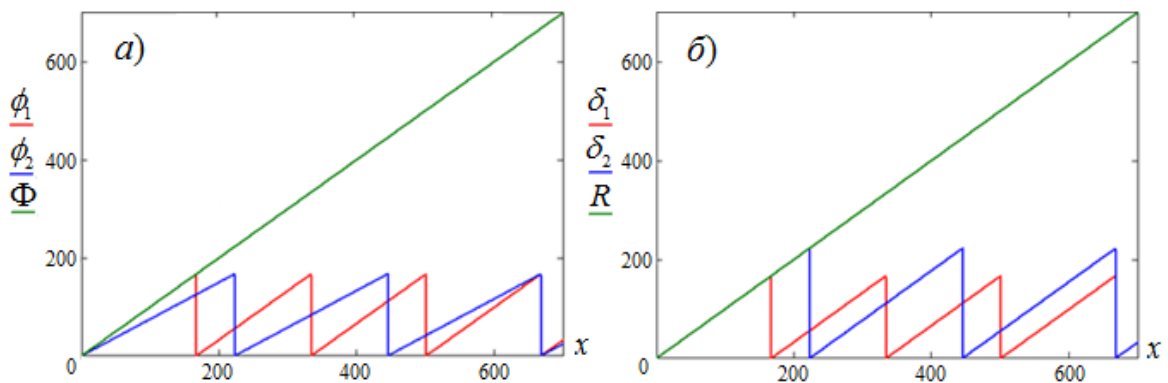


Рисунок 9 – Фазы интерференционных сигналов (а) до и (б) после нормирования

Решения системы сравнений $R(\delta_1, \delta_2)$ можно представить в табличном виде (рис. 11). Тогда решение R системы сравнений находится на пересечении столбца δ_1 со строкой δ_2 таблицы. Показано, что для однозначного восстановления решения системы сравнений достаточно хранить только первую строку и столбец таблицы.

δ_1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
δ_2																	
0		154	121	88	55	22	176	143	110	77	44	11	165	132	99	66	33
1	34		155	122	89	56	23	177	144	111	78	45	12	166	133	100	67
2	68	35		156	123	90	57	24	178	145	112	79	46	13	167	134	101
3	102	69	36		157	124	91	58	179	146	113	80	47	14	168	135	102
4	136	103	70	37		158	125	92	59	25	180	147	114	81	48	15	169
5	170	137	104	71	38		159	126	93	60	26	181	148	115	82	49	170
6	204	171	138	105	72	39		160	127	94	61	27	182	149	116	83	50
7	238	205	172	139	106	73	40		161	128	95	62	28	183	150	117	84
8	272	239	206	173	140	107	74	41		162	129	96	63	29	184	151	118
9	306	273	240	207	141	108	75	42	43		163	130	97	64	30	185	152
10	340	307	274	241	142	109	76	43	44	45		164	131	98	65	31	186

Рисунок 11 – Таблица решений системы сравнений

Установлено, что из-за наличия даже небольших погрешностей при измерении фаз интерференционных полос, рассчитанные по ним индексы выбираемого из таблицы значения «развернутой» фазы будет неверными. Так, ошибки измерения фазы величиной 0.1% и 0.07% для длин волн 488 нм и 633 нм приведут к смещению индексов на единицу. Соответственно выбор из таблицы будет производиться на смежной с действительной диагональю, что приведет к грубой ошибке определяемого значения «развернутой» фазы. Максимальный диапазон однозначности измерений равен произведению оснований системы счисления, в нашем случае, для длин волн $\lambda_1 = 488$ нм и $\lambda_2 = 633$ нм, он равен $\max R = \lambda_1 \lambda_2 - 1 = 308903$ нм. Можно повысить помехоустойчивость метода ограничив диапазон однозначности измерений. Например, при его ограничении до 5 мкм в таблице решения сравнений появляются промежутки между разрешенными диагоналями. На рис. 11 красными стрелками показаны разрешенные диагонали. При выбранных параметрах расстояние между первыми тремя диагоналями составит 54 нм. Тогда допустимая погрешность будет равна половине расстояния между смежными диагоналями, которая равна ± 27 нм. Для длины волны 633 нм это соответствует погрешности в 4.3%,

а для длины волны 488 нм – 5.5% соответственно. Таким образом помехоустойчивость алгоритма улучшается более чем в 10 раз. Разработан высокопроизводительный каскадно-табличный алгоритм реализации данного метода.

Выполнены экспериментальные исследования с целью повышения устойчивости метода к систематическим и случайным погрешностям. С этой целью регистрировалось и расшифровывались две серии интерференционных картин, полученных на двух длинах волн 488 и 633 нм. Установлено, что фазовые изображения с разными длинами волн имеют зоны с равной разностью фаз - изофазные зоны (см. рис. 10,б). При наличии шумов изофазные участки искажаются. Коррекция положения интерференционных полос производилась путем определения границ изофазных зон и заполнения их средними значениями фазы $\Delta\delta$ внутри интервала изофазной зоны. Таким образом, формировались новые фазовые профили Γ_1 и Γ_2 по правилу:

$$\Gamma_1 = \delta_2 + \Delta\delta_j \text{ и } \Gamma_2 = \begin{cases} \delta_1 + \Delta\delta_j, & \text{если } \delta_1 - \Delta\delta_j \geq 0 \\ \delta_1 - \Delta\delta_j + m_2, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (21)$$

Абсолютная погрешность измерения полной разности оптического хода между объектным и опорным пучками данным методом составила $1 \div 3.5$ нм. Среднеквадратическая погрешность не превышает ± 0.25 нм.

В пятой главе продемонстрировано решение ряда научно-прикладных задач с использованием разработанных методов и алгоритмов анализа интерференционных сигналов. Выполнены:

1. Экспериментальное исследование поля смещения плоского объекта методами цифровой голографической интерферометрии. Экспериментально измеренное смещение сравнивалось с теоретической кривой Эйлера-Бернулли. Полное время записи и восстановления голограммы размером 4096×4906 пикселей составляет менее 0.03 сек, что позволяет обеспечить производительность измерений не менее 30 кадров/сек. Достигнутый показатель производительности позволяет выполнять измерения в режиме реального времени при исследовании динамических

объектов. Исследование выполнялось в рамках гранта РФФИ: 14-08-01100А «Цифровая голографическая интерферометрия реального времени для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния динамических объектов», 2014-2016г.г.

2. Методом голографической интерферометрии реального времени измерялось поле прогиба круглой мембраны, жестко закрепленной по краям и нагруженной в центре сосредоточенной силой. Исследовалась мембрана из сплава алюминия Д16Т, диаметром 42 мм и толщиной 0,5 мм. Отличительной особенностью, разработанной цифровой голографической системы, являются малые (менее 1 градуса) углы между объектным и опорным пучками. Это позволяет снизить требования к пространственному разрешению регистрируемых цифровых голограмм. Исследование выполнялось в рамках гранта РФФИ 18-08-00580А «Разработка и исследование методов компьютерной голографической интерферометрии объектов сложной формы», 2018-2019г.г.

3 Исследование напряженно-деформируемого состояния крупногабаритных объектов методом структурированного освещения. Разработана высокоточная измерительная система, реализующая метод структурированного освещения. Система состоит из проектора Sony VPL - VW260ES и камеры CANON EOS 600, управляемых компьютером. Погрешность измерения рельефа не превышает ± 5 мкм при размерах объекта до 5x5 м.

4 Исследование возможности повышения пространственного разрешения интерференционных изображений. Для экспериментальной проверки предложенных принципов синтеза сверхразрешающих изображений разработан макет цифровой системы. Была произведена модификация стандартного оптического микроскопа МБС-10. Модификация заключалась в установке цифровой камеры Canon 650D и автоматизации перемещения предметного столика в двух взаимно ортогональных направлениях в горизонтальной плоскости шаговыми двигателями с дискретностью перемещения 2.5, 2.5/8 и 2.5/16 мкм. Перемещение предметного столика осуществлялось моторизованным двухосным транслятором 8MTF фирмы Викон

Стада. Транслятор управлялся контроллером OSM-42RA по протоколу Modbus. Ввод изображений в компьютер производился цифровой камерой Canon 650D.

Методика исследования заключалась в сканировании аналоговой голограммы, ее оцифровки и синтезе низкоразрешающих растров путем усреднения точек в локальной окрестности 2x2, 4x4, 8x8 соответственно. Затем из низкоразрешающих растров по предлагаемой методике синтезировался высокоразрешающий растр. Результаты экспериментального исследования показали практическую реализуемость предлагаемого метода повышения пространственного разрешения изображений, в том числе цифровых голограмм. Пространственное разрешение для цифровых голограмм, сканированных в режиме 8x8, составило не менее 2000 лин/мм. Исследование выполнялось в рамках гранта РФФИ 16-08-00565А «Разработка методов сверхразрешения в цифровой голографической интерферометрии», 2016,2017 г.г.

4. Для обеспечения работы системы в режиме реального времени под руководством автора разработан комплекс программ обработки данных, которые используют параллельные вычисления на графическом процессоре Nvidia Quadro 6000. Программы зарегистрированы в Фонде алгоритмов и программ Сибирского отделения РАН РФ и имеют открытый доступ для использования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Предложен и исследован обобщенный метод анализа интерференционных сигналов в оптико-электронных измерительных системах с пошаговым фазовым сдвигом. Метод использует алгебраический подход к решению трансцендентных систем уравнений с произвольными величинами вносимых фазовых сдвигов. На основе предложенного метода разработаны:

- новые принципы построения алгоритмов расшифровки интерференционных картин;
- новые алгоритмы определения амплитуды опорного и предметного (объектного) пучков.

2. Предложен и разработан метод фазовых измерений, основанный на суммировании результатов двух алгоритмов расшифровки с одинаковыми по модулю и

противоположными по знаку реакциями на нелинейность профиля интерференционных полос, который позволяет уменьшить относительную погрешность измерения фазы до уровня 10^{-2} .

3. Разработан и экспериментально апробирован метод повышения пространственного разрешения оптико-электронных интерференционных измерительных систем на основе субпиксельного сканирования. Для повышения пространственного разрешения в N раз требуется регистрация N^2 низкоразрешающих цифровых голограмм. Так, например, для повышения пространственного разрешения до $1000 \div 2000$ линий требуется зарегистрировать 64 низкоразрешающих голограммы.

4. Выполнено теоретическое обоснование возможности применения траекторного анализа для расшифровки интерференционных сигналов. Разработаны и исследованы алгоритмы преобразования эллиптической траектории интерференционных сигналов оптико-электронных измерительных систем к круговому виду, которые позволяют производить расшифровку интерференционных картин с неизвестными и случайными фазовыми сдвигами.

5. Метод оценки разности фаз пространственных интерференционных сигналов, который на основе анализа их траектории в двух и более точках интерференционной картины позволяет минимизировать погрешность.

6. Выполнена разработка устойчивых методов устранения фазовой неоднозначности, не требующие нахождения фазовых переходов в локальной окрестности поля яркости интерференционных картин:

- на основе модулярной арифметики разработан помехоустойчивый метод высокоточного определения полной фазы;

- разработан высокопроизводительный каскадно-табличный алгоритм реализации данного метода.

Экспериментально показано, что разработанные методы при использовании интерференционных картин, полученных на длинах волн 488 нм и 633 нм, позволяют расширить диапазон однозначности интерференционных измерений до 5064 нм.

Таким образом, можно констатировать, что цель работы достигнута и все вытекающие из нее задачи решены. На современном этапе развития науки, техники и технологий в России они соответствуют Указу Президента Российской Федерации от 07.07.2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» (в редакции Указа Президента Российской Федерации от 16.12.2015 г. № 623). В диссертации поставлена, обоснована и решена крупная научно-техническая проблема разработки и реализации высокоточных опико-электронных измерительных систем, а также создания аппаратно-программных комплексных измерительных систем, ориентированных на применение в научных экспериментах и в промышленных технологиях, обладающих расширенными функциональными возможностями и высокими точностными характеристиками. Внедрение новых научно обоснованных технических решений, изложенных в диссертации, способно внести значительный вклад в развитие отечественного приборостроения., что отвечает п. 9 действующего «Положения о порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 (с изменениями от 21.04.2016).

В приложении приводятся акты о внедрении и справки о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Ильиных С.П. Псевродинамический анализ интерферограмм / С.П. Ильиных // Науч. Вест. НГТУ. – 2000. – №2. С. – 100-102.
2. Денежкин, Е. Н. Голографический неразрушающий контроль композитных цилиндрических оболочек / Е. Н. Денежкин, С.П. Ильиных, В. А. Хандогин // Оптика и Спектроскопия, 1989. – № 3 (66). – С. 642–647.

Переводная версия:

Denezhkin, E. N. Holographic nondestructive quality control of composite cylindrical shells / Denezhkin, E.N., Il'inykh, S.P., V.A.Khandogin // 1989. – The Soviet journal of nondestructive testing. – 3(66). – P642-647.

3. Гужов В. И. Новый метод анализа интерферограмм с произвольно заданными пошаговыми фазовыми сдвигами / В. И. Гужов, С. П. Ильиных // Автометрия. - 2002. – № 2. – С. 72–79.
4. Хандогин, В. А. Программно-алгоритмический комплекс для расшифровки интерферограмм / В. А. Хандогин С. П. Ильиных, С. Т. Де // Дефектоскопия. – 1989. – № 3. – С. 58–63.
5. Количественная расшифровка интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов. Ч I. Анализ и алгоритмы / А. Н. Гришанов, С. Т. Де, С. П. Ильиных, В. А. Хандогин // Автометрия. – 1989. – № 1. – С. 3-10.

Переводная версия:

Quantitative interpretation of interferograms on basis of phase pseudoshifts. I. Analysis and algorithms / A.N. Grishanov, S.T. De, S.P. Il'inykh, V.A. Khandogin // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 1989. – № 1. – P. – 1-8.

6. Де, С. Т. Количественная расшифровка интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов. Ч II. Реализация алгоритмов / С. Т. Де, С. П. Ильиных, В. А. Хандогин // Автометрия. – 1989. – № 1. – С. 11-19.

Переводная версия:

De, S. T. Quantitative interpretation of interferograms on basis of phase pseudoshifts. II. Implementation of algorithms / S.P. Ilinykh, S.T. De, V.A Khandogin // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 1989. – №1. – P. 11–19.

7. Денежкин, Е. Н. Количественная расшифровка интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов. Ч III. Родственные алгоритмы / Е. Н. Денежкин, С.П. Ильиных, В.А. Хандогин // Автометрия. – 1989. – № 2. – С. 51–56.

Переводная версия:

- Denezhkin, E. N. Quantitative decoding of interferograms on basis of phase pseudo-shifts. III. Related algorithms / E. N. Denezhkin, S.P. Ilinykh, V. A Khandogin // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 1989. – № 2. – P 52–57.
8. Гужов, В. И. Обобщенный алгоритм расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом / В.И. Гужов, С.П. Ильиных // *Автометрия*. - 2002. - № 3. - С. 123–126.
Переводная версия:
Guzhov, V. I. A generalized decoding algorithm for interferograms using phase stepping / V. I. Guzhov, S. P. Il'inykh // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2002. – № 3. – P. 103-106.
9. Гужов В. И. Новый метод анализа интерферограмм с произвольно заданными пошаговыми фазовыми сдвигами / В. И. Гужов, С. П. Ильиных, // *Автометрия*. - 2002. - № 2. - С. 72-79.
Переводная версия:
Guzhov V. I. New interferograms analysis method with arbitrary given step-by-step phase shifts / V. I. Guzhov, S. P. Il'inykh // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2002. – Iss.2. – P. 72–79.
10. Ильиных, С.П. Измерение волновых фронтов в интерферометрах сдвига / С. П. Ильиных, В.И. Гужов, Е. М. Мишина // *Автометрия*. – 2003. – № 2 (3). – С 36-42.
Переводная версия:
Il'inykh, S.P. Wavefront measurement in shifting interferometers / S.P. Ilinykh, V.I. Guzhov, E. M. Mishina // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2003. – Iss. 2 (3). – P. 32–37.
11. Робастный алгоритм расшифровки интерферограмм / С. П. Ильиных, В. И. Гужов, Н. Е. Кафидова, Д. Д. Бочаров // *Автометрия*. – 2005. – № 3 (41). – С. 122–125.
Переводная версия:
Robust interferogram decoding algorithm / V. I. Guzhov, S. P. Ilinykh, N. E. Kafidova, D. D. Bocharov // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2005. – 3 (44) – P. 103–106.

12. Гужов В.И. Коррекция систематических погрешностей при определении полной фазы в целочисленной интерферометрии / В.И.Гужов, С.П., Ильиных, Е.В. Картавых // Автометрия. – 2008. – №6 (44). – С 56-60.

Переводная версия:

Guzhov V. V. Systematic Error Correction in Determining the Total Phase in Integer Interferometry / V.I. Guzhov, S.P. Il'inykh, E.V.Kartavykh // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.-2008., Vol.44No.6.- P. 552-556.

13. Гужов В. И. Устранение ошибок фазовых сдвигов в интерферометрии / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Д.А. Хайдуков, А.Р. Вагизов // Автометрия. – 2011. – № 1 (47). – С. 96–101.

Переводная версия:

Guzhov V. I. Eliminating phase-shift errors in interferometry / V.I. Guzhov, S.P. Il'inykh, D.S. Haydukov, A.R. Vagizov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2011. – №1. – P. 76–80.

14. Гужов В. И. Проекционный метод измерения рельефа объекта / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, А.И. Уберт // Научн. Вест. НГТУ. – 2012. – №1(46) – С. 23–28.

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

Переводная версия:

Guzhov V. I. Solution of the problem of phase ambiguity by integer interferometry / V.I. Guzhov, S.P. Il'inykh, R.A. Kuznetsov, A.R. Vagizov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. - 2013. - Vol. 49, Iss. 2. - P. 178-183.

16. Гужов В.И. Новый метод калибровки фазовых сдвигов / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Д.С. Хайдуков, Р. А. Кузнецов // Науч. Вест. Новосибирского государственного технического университета. - 2013. - № 1. - С. 185-189.

17. Гужов В. И. Новый метод анализа интерферограмм с произвольно заданными пошаговыми фазовыми сдвигами / В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Д.С. Хайдуков, Р.А. Кузнецов // Науч. Вест. НГТУ. - 2013. - №1(50) – С. 185-189.
18. Квазигетеродинный метод интерференционных измерений / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, И.А. Сажин [и др.] // Автометрия. – 2015. – № 3 (51). – С. 80–87.
- Переводная версия:
- Quasiheterodyne method of interference measurements / V. I. Guzhov, S. P. Ilinykh, I. A. Sazhin, [et. al.] // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. - 2015. - Iss. 3 (51). – P. 280-286.
19. Цифровая голографическая интерферометрия реального времени для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния динамических объектов /В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Р. А. Кузнецов, Е. С. Кабак // Омский научный вестник. – 2015. – № 1 (137). – С. 158–162.
20. Быстрый алгоритм синтеза высокоразрешающих растров в цифровой голографии = A quick algorithm of high-resolution raster synthesis for digital holography / В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Д. С. Хайдуков, И. О. Марченко // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2017. – № 2. – С. 83–93.
21. Гужов В. И. Восстановление фазовой информации на основе методов пошагового фазового сдвига при малых углах между интерферирующими пучками / В. И. Гужов, С. П. Ильиных, С. В. Хайбуллин // Автометрия. - 2017. - Т. 53, № 3. - С. 101-106.

Переводная версия

Guzhov V. I. Phase information recovery based on the methods of phase shifting interferometry with small angles between interfering beams / V.I. Guzhov, S.P. Il'inykh, S.V. Khaibullin // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. - 2017. - Vol. 53, iss. 3. - P. 288-293

22. Гужов В. И. Сверхразрешение в цифровой голографии [Электронный ресурс] / В. И. Гужов, И. О. Марченко, Г. А. Поздняков, С. П. Ильиных // Инженерный вестник Дона : электрон. науч. журн.. - 2018. - № 3. - С. 1-16.
23. Гужов В. И. Восстановление изображений из цифровых голограмм, полученных при задании случайных фазовых сдвигов / В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Г. А. Поздняков, Д. С. Хайдуков // Автометрия. - 2019. - № 6. - С. 126-135.

Переводная версия:

V. I. Guzhov, Image reconstruction from digital holograms obtained by specifying random phase shifts / V. I. Guzhov, S. P. Il'inykh, G. A. Pozdnyakov, D. S. Khaidukov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. - 2019. - Vol. 55, iss. 6. - P. 638–646.

24. Гужов В. И. Метод бесконтактного измерения деформаций больших объектов на основе структурированного освещения / В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Е. Е. Трубилина, Д. С. Хайдуков // Автометрия. - 2020. - Т. 56, № 4. - С. 81-88. - DOI: 10.15372/AUT20200409.

Переводная версия:

Guzhov V. I. Method of contactless measurement of large object deformations based on structured illumination / V. I. Guzhov, S. P. Ilinykh, E. E. Trubilina, D. S. Khaidukov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. - 2020. - Vol. 56, iss. 4. - P. 386-392. - DOI: 10.3103/S875669902004007X.

25. Гужов В. И. Определение полей деформаций диффузных объектов методом цифровой голографической интерферометрии с пошаговым фазовым сдвигом / В. И. Гужов, Е. Н. Денежкин, С. П. Ильиных, Г. А. Поздняков, Д. С. Хайдуков // Автометрия. - 2020. – Т. 56, № 6. – С. 61–67. - DOI: 10.15372/AUT20200607.

Переводная версия:

Guzhov V. I. Determination of deformation fields of diffuse objects by phase-shifting digital holographic interferometry / V. I. Guzhov, E.N. Denezhkin, S.P. Ilinykh, G.A. Pozdnyakov, D.S. Khaidukov // Optoelectronics, Instrumentation and Data

Processing. - 2020. - Vol. 56, № 6. - P. 608-612. - DOI: 10.3103/S8756699020060084.

Публикации, входящие в международные базы данных цитирования Web of Science или Scopus:

26. Guzhov V. I. Generic algorithm of phase reconstruction in phase-shifting interferometry / V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, R.A. Kuznetsov, [et al.] // Optical Engineering. – 2013. – Vol. 52, Iss. 3. – Art. 030501(3 p.).
27. Guzhov V. I. Method for increasing the dynamic range of digital images based on modular arithmetic / V. I. Guzhov, S. P. Ilinykh, D. S. Khaidukov // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. – Vol. 1661: International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020), Novosibirsk, 6-8 Apr. 2020. - Art. 012040 (6 p.). - DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012040.
28. Guzhov V. I. Experimental checking the method of the expansion of the dynamic range interference systems / Gushov, V.I., Ilinykh, S.P., Denegkin, E.N., Nechaev, V.G., Bocharov, D.D. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 6262, 2006.
29. Guzhov V. I. Using the Trajectory Analysis for Measuring Nano-Object by the Interference Phase-Shifting Systems / V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, D.S. Haydukov, M.E. Ilyin // Proceedings of IFOST-2008: The Third International Forum on Strategic Technologies, June 23-29, 2008. Novosibirsk, 2008. – P.193–194.
30. Guzhov V. I. New principle of the shaping the nonlinear illumination in optical measuring systems / V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, A.R. Vagizov, R.A. Kuznetsov // Proceedings of IFOST-2011 Vol.2: The 6-th International Forum on Strategic Technologies, August 22-24, 2011, Harbin, China, 2011, P. 652–654.
31. 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 (17-21 Sep., Tomsk) Polytechnic University. – Vol. I, 2012. – P. 674–676.
32. Guzhov V. I. Method of an Assessment of Reliability of High-Precision Measurements / 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. VOLUME I , 2012 – P. 105–106.
 33. Guzhov V. I. Robust method of absolute phase mapping by projection of series sine patterns with different periods / V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, E.S. Kabak, R.A. Kuznetsov // The 8 international forum on strategic technologies (IFOST 2013) : proc., Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar, 2013. – Vol. 1. – P. 405–407.
 34. Guzhov V. I. Robust method analysis interferogram with distortion the profile of fringes / Guzhov, V., Ilinykh, S., Denegkin, E., Haydukov, D., Kabak, E. // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2014) : 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 – Proceedings, P. 75-78/
 35. Guzhov V. I. A new approach to improving the quality of measurements in multi-wave interference systems / V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, E.S. Kabak, P.S. Rizov // International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2015) : proc., Omsk, 21–23 May, 2015. – Omsk: IEEE, 2015. – Art. 7147033. – ISBN 978–1–4799–102-2.
 36. Guzhov V. I. The recovery of the phase information from the digital holograms with small angles of interference / Guzhov, V.I., Ilinykh, S.P.// Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016) 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2016 – Proceedings 1, P. 274-276.

37. Guzhov V. I. Step-by-step method with phase shift is-use changes in the intensity of interfering beams / В. И. Гужов, С. П. Ильиных // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016) : тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. : в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 3, ч. 2. – 2016. – С. 77–79.
38. Guzhov V. I. Eliminating the effect of non-linear distortion of profile fringes for structured illumination method / Guzhov, V.I., Ilinykh, S.P., Emelyanov, V.A., Marchenko, I.O. // Proceedings - 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016, P. 531-534.
39. Guzhov V. I. Determination of complex amplitudes of the reference and subject the wave fields on interference patterns / Guzhov, V.I., Ilinykh, S.P., Emelyanov, V.A., Marchenko, I.O. // Proceedings - 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016, P. 531-534.
40. Guzhov V. I. Decrease in the error at elimination of phase ambiguity by method of equivalent wavelength / V. I. Guzhov, S. P. Ilinykh, G. A. Pozdnyakov // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018) : тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 2. – С. 57-60.
41. Guzhov V. I. Expansion of dynamic range in phase-shifting interferometry / V. I. Guzhov, S. P. Ilinykh, I. O. Marchenko // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018), 2018. – V. 1, Iss. 2. – P. 53-56. - ISBN (NSTU) 978–5–7782-3614–1.
42. Гужов В. И. Measuring system for real-time holographic interferometry with an extended measurement range / V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, G.A. Pozdnyakov // 14 International forum on strategic technology (IFOST 2019) : (Tomsk, 14–17 Oct. 2019) Tomsk : TPU Publ. House, 2019. – P. 375–378.

Прочие публикации

43. Ильиных С. П. Траекторный анализ интерферограмм в методе фазовых шагов. Новые возможности / С. П. Ильиных // Автоматика и программная инженерия, Новосибирск, – 2012. – № 2(2) – С. 9-22.
44. Гужов В. И. Компьютерная интерферометрия : учеб. пособие / В.И. Гужов, С.П. Ильиных. - : Изд-во НГТУ, 2004. - 252 с.
45. 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.
46. Алгоритмы расшифровки интерференционных картин методом пошагового фазового сдвига. / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Р.А. Кузнецов, Д.С. Хайдуков // Автоматика и программная инженерия. – 2012. – № 2(2). – С. 55 – 59.
47. Цифровая голографическая система реального времени = Digital holographic real-time system / В.И. Гужов, С. П. Ильиных, Д.С. Хайдуков, Е.С. Кабак // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. - 2014. – № 4 (78). – С. 97–112.
48. Гужов В. И. Определение интенсивности опорного и объектного пучков при использовании метода пошагового фазового сдвига = Determination of the Intensity of the Reference and Object Beams when Using the Phase-Shift Interferometry / В.И. Гужов, С.П. Ильиных // Автоматика и программная инженерия = Automatics & Software Engineering. - 2017. - № 4 (22). - С. 68–73.
49. Гужов В. И. Спектральный анализ формул расшифровки методом пошагового фазового сдвига = Bilinear Approximation to Increase the Size of a Numerical Sequence in Projection Methods / В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Г. А. Поздняков // Автоматика и программная инженерия = Automatics & Software Engineering. - 2019. - № 4 (30). – С. 51–56.

50. Ильиных С.П. Алгоритмы анализа и расшифровки интерферограмм методом пошагового фазового сдвига / С.П. Ильиных // Модельное исследование методов, алгоритмов и средств индуктивного анализа данных в приоритетных отраслях. (Аспирантура, Бакалавриат, Магистратура) : Учебное пособие. – М.: Русайнс, 2019. – 252с.
51. Guzhov V. Distortion Compensation in Structured Lighting Systems [Electronic resource] / V. Guzhov, S. Ilinykh, E. Trubilina // 1 International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, 10-11 Dec. 2020 г. - Novosibirsk : IEEE, 2020. - P. 277-280. - Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9314670>. - Title from screen - DOI: 10.1109/PIERE51041.2020.9314670.

Патент на полезную модель:

52. Патент № 181750 МКИ G01 B9/021 Цифровое голографическое устройство (Россия) // В.И. Гужов, С.П. Ильиных. Опубл. 26.07.2018.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

53. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 20251661754 Российская Федерация. Расчет голографической интерферометрии с помощью GPU / В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Е. Е. Трубилина ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». – № 20251661754 ; заявл. 15.07.2021 ; опубл 15.07.2021. – 1 С.
54. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 20251661752 Российская Федерация. Расшифровка интерференционных картин со случайным фазовым сдвигом с помощью GPU / В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Е. Е. Трубилина; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». – № 20251661752; заявл. 15.07.2021; опубл 15.07.2021. – 1 С.

