

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
НАУЧНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



Кравченко Максим Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ МЕТОДА
ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО
КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ТЕРМОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЯХ**

Специальность 2.2.6 – «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук
Петр Сергеевич Завьялов

Новосибирск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ.....	10
1.1 Метод цифровой спекл-интерферометрии.....	10
1.2 Разновидности спекл-интерферометров	12
1.2.1 Метод фазовых сдвигов.....	12
1.2.2 Гетеродинирование в спекл-интерферометрии	15
1.2.3 Метод пространственного фазового сдвига	17
1.2.4 Спекл-интерферометрия с использованием импульсного лазера.....	18
1.2.5 Измерение 2D и 3D деформаций методом спекл-интерферометрии.	20
1.3 Использование метода спекл-интерферометрии в разных областях	25
1.4 Промышленные решения на основе метода спекл-интерферометрии.....	30
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	37
ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ФАЗОВОГО СДВИГА И ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ НА ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ.....	39
2.1 Математическое моделирование спекл-интерферометра в режиме непоследовательной трассировки лучей	39
2.2 Разработка стенда на основе метода спекл-интерферометрии	53
2.3 Экспериментальное исследование спекл-интерферометра на основе метода пространственного фазового сдвига.....	58
2.4 Расчет оптической системы с телецентрическим ходом лучей в пространстве изображений	61
2.5 Энергетический расчет спекл-интерферометра	63
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	65

ГЛАВА 3 СОЗДАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА БАЗЕ ТЕРМОВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ.....	67
3.1 Измерительный комплекс для определения деформаций поверхностей на базе термовакуумной камеры.....	67
3.2 Программное обеспечение измерительного комплекса.....	75
3.3 Внесение в Росреестр СИ РФ измерительного комплекса.....	77
3.3.1 Определение погрешности измерений между соседними кадрами.....	79
3.3.2 Определение диапазона измерения между двумя соседними кадрами..	80
3.3.3 Определение суммарного диапазона измерений деформаций, при котором погрешность измерений не превышает 1 мкм.	82
3.4 Расчет влияния параметров среды и допусков на оптические элементы на погрешность измерения спекл-интерферометра.....	83
3.5 Оценка возникающих ложных деформаций при перемещении объекта как твердого целого.....	90
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	94
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА БАЗЕ ТЕРМОВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ МЕТОДОМ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	96
4.1 Испытания на базе термовакуумной камеры.....	96
4.2 Определение погрешности на основе экспериментальных данных.....	103
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ НА ТЕРРИТОРИИ ПРЕДПРИЯТИЯ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ» ИМЕНИ АКАДЕМИКА М. Ф. РЕШЕТНЁВА».....	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

В настоящее время остро стоит задача прецизионного контроля поверхностей рефлекторов космических аппаратов на различных этапах их создания [15]. Такие рефлекторы используются в спутниковых телекоммуникационных системах (Гонец, SES, Молния-3К, Сфера, OneWeb, Starlink и др.), а также в научных космических обсерваториях для проведения космологических исследований. Эти элементы должны сохранять форму с точностью порядка 1 – 10 мкм в условиях космического пространства (высокий вакуум; перепад $\Delta T \approx 300\text{K}$). Для изготовления таких рефлекторов используются специальные материалы с минимальным тепловым расширением, такие как: бериллий («James Webb Space Telescope» [32]), карбид кремния («Herschel Space Observatory»), астраситал («VISTA»), специальный углепластиковый композит («Миллиметрон» [14, 16, 17, 61, 63, 67]) и др.

В процессе изготовления и испытаний рефлекторов влияние факторов космического пространства на их форму зачастую имитируется в термовакуумной камере. Соответственно измерение формы в процессе испытаний должно выполняться либо непосредственно в камере (под воздействием на измерительную аппаратуру тех же экстремальных условий), либо снаружи ее (с выносом измерительной аппаратуры за пределы камеры). Допустимая погрешность таких измерений при этом не должна превышать ± 1 мкм при габаритных размерах объектов до 1,5 м. Поверхность исследуемого объекта может быть шероховатой, а его форма, как плоской, так и трехмерной (параболической, сферической, гиперболической и др.).

Совокупность указанных требований определяет использование оптического бесконтактного метода измерений, при котором измерительная аппаратура располагается вне камеры при нормальных условиях, а для наблюдения объекта используется оптический иллюминатор.

Степень разработанности темы исследования

Среди известных методов для контроля деформаций крупногабаритных объектов стоит выделить экранные оптические методы (метод Гартмана и его модификации) [4, 20]. Они позволяют получить информацию обо всей оптической поверхности исследуемого объекта, дают информацию о величине деформаций, сравнительно просты в реализации, но обладают достаточно низкой точностью измерений (≈ 10 мкм).

Теневые оптические методы (нож Фуко, Ронки, Ричи) оперативны, имеют высокую разрешающую способность (ограничена разрешением матрицы камеры и дифракционными эффектами) [21]. Однако при контроле асферических зеркал возникают сложности, связанные с тем, что единого центра кривизны у такого зеркала нет. Поведение лучей света рядом с центром кривизны параболоида, тем не менее, достаточно просто – они сходятся вдоль каустики конической формы. [8] Из-за этого необходимо измерять разницу фокусных расстояний крайней и центральной зон для получения информации обо всей поверхности зеркала.

Среди современных способов контроля стоит выделить такие методы как: фотограмметрический [41, 58], радиологический [18, 26], спекл-интерферометрия [45], на основе лазерного радара [6], трекеров, трехмерных сканеров, геодезических тахеометров [22]. Они удобны в использовании в стандартных задачах, но их использование очень затруднительно в условиях термовакуумной камеры, а погрешность их измерений может достигать 100 мкм.

В обозначенных условиях наиболее подходящим и эффективным будет метод спекл-интерферометрии, а именно метод цифровой спекл-интерферометрии, благодаря его низкой (± 1 мкм) погрешности измерений и широкой универсальности. Он получил обширное применение при неразрушающем контроле деформаций [25], смещений [1], вибраций [53]. Метод позволяет контролировать объекты с оптически грубой (шероховатой) поверхностью без установки на сам объект каких-либо меток или отражателей. Для решения задачи контроля деформаций на базе термовакуумной камеры данный метод использован в России впервые.

Цель и задачи диссертации

Целью диссертационной работы является создание оптико-электронного измерительного комплекса, обеспечивающего прецизионный контроль деформаций крупногабаритных элементов космических аппаратов в условиях термовакuumных испытаний.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель спекл-интерферометра, провести анализ точности изображений и определить требования к оптической схеме интерферометра.
2. Разработать методику исследования метрологических характеристик спекл-интерферометра.
3. Провести измерения методом цифровой спекл-интерферометрии крупногабаритных объектов (до 1,5 м) асферической формы в условиях термовакuumной камеры с помощью разработанного измерительного комплекса.
4. Провести статистическую обработку экспериментальных данных, интерпретировать результаты измерений и выполнить оценку погрешностей определения деформаций исследуемых поверхностей.

Методы исследований

Результаты исследований, представленные в диссертации, получены путем теоретического анализа, моделирования оптических систем и физических экспериментов с использованием созданных лабораторных стендов и промышленного лазерного технологического оборудования.

Математическое моделирование оптических систем для исследования их характеристик проводилось в среде разработки Zemax OpticStudio.

Научная новизна

В работе впервые:

1. Теоретически и экспериментально исследовано влияние ошибки создания пространственного фазового сдвига на величину погрешности измерений деформаций методом цифровой спекл-интерферометрии.
2. Разработан и экспериментально апробирован метод оценки метрологических характеристик спекл-интерферометра, который заключается в сравнении данных с карты деформаций объекта и показаний эталонного

линейного перемещения этой же точки при совмещении их векторов чувствительности.

3. Выполнены прецизионные (с погрешностью < 1 мкм) измерения деформаций крупногабаритных (до 1,5 м) асферических поверхностей с использованием цифровой спекл-интерферометрии.

4. Предложен способ оценки погрешности измерений деформаций поверхностей объектов в условиях термовакуумной камеры, основанный на статистической обработке экспериментальных данных и предусматривающий определение ошибки единичных измерений по шуму суммарных карт деформаций с последующим расчетом итоговой погрешности как произведения данной ошибки на количество измерений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Применение телецентрических в пространстве изображений объективов (телецентричность не хуже $0,05^\circ$) в оптической схеме спекл-интерферометров с пространственным фазовым сдвигом позволяет уменьшить погрешность до 0,01 мкм на одно измерение.

2. Использование методики анализа метрологических характеристик спекл-интерферометра, заключающейся в сравнении данных с карты деформаций объекта и показаний эталонного датчика линейных перемещений при совмещении их векторов чувствительности, позволяет определить метрологические характеристики: чувствительность ($\pm 0,05$ мкм), диапазон измерений (одиночных до 5 мкм, многократных до 200 мкм) при погрешности ± 1 мкм.

3. Применение измерительного комплекса обеспечивает измерения деформаций асферических поверхностей крупногабаритных (до 1,5 м) объектов, расположенных в условиях термовакуумной камеры, с погрешностью ± 1 мкм.

Достоверность результатов

Достоверность результатов обеспечивается анализом текущего состояния исследуемого метода, выбором современных методик теоретических и экспериментальных исследований, использованием апробированных методов обработки экспериментальных данных и отсутствием противоречий с результатами исследований других авторов.

Научная и практическая значимость работы

Научная значимость результатов работы заключается в результатах исследования спекл-интерферометра с пространственным фазовым сдвигом на предмет точностных характеристик, как на этапе проектирования систем, так и на этапе анализа полученных данных.

Проведено внесение спекл-интерферометра в Государственный реестр средств измерений РФ под номером 81555-21. Разработанный оптико-электронный комплекс позволяет проводить измерения деформаций поверхностей объектов внутри термовакуумной камеры с погрешностью не более 1 мкм. При этом объект может быть размером до 1,5 м, иметь произвольную форму поверхности (плоская, сферическая, асферическая) и быть шероховатым. Разработанная система внедрена в производство и позволяет проводить непрерывные многодневные испытания, что подтверждается актом о внедрении (Приложение А).

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использовались в ходе выполнения КТИ НП СО РАН договора с Акционерным обществом «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва», в рамках которого в производство внедрен измерительный комплекс (Приложение А).

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на следующих международных конференциях: Интерэкспо Гео-Сибирь (г. Новосибирск, 2017, 2020 г.), XXII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнёва «Решетневские чтения» (г. Красноярск, 2018 г.), VIII международной конференции Информационные технологии и нанотехнологии ИТНТ-2022 (г. Самара 2022 г.).

Публикации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 11 научных работах, из них работ, опубликованных согласно перечню ВАК и приравненных к ним рецензируемых научных журналов – 4, работ в других рецензируемых научных изданиях – 7.

Связь с государственными программами и НИР

Большая часть работы выполнена в рамках научно-исследовательских работ КТИ НП СО РАН, в том числе:

«Оптико-информационные технологии и системы прецизионного контроля физических и пространственных характеристик трехмерных объектов» регистрационный номер АААА-А17-117121270018-3 за 2017-2020гг.

Личный вклад

Представленные в работе результаты получены лично автором и при его непосредственном участии при проведении теоретических и экспериментальных исследований. Выполнено компьютерное моделирование работы спекл-интерферометра в среде Zemax OpticStudio, включая модели для оценки погрешностей. Разработана и апробирована методика анализа метрологических характеристик спекл-интерферометра (чувствительность, диапазон измерений, погрешность), при непосредственном участии автора проведено внесение спекл-интерферометра в Государственный реестр средств измерений РФ под номером 81555-21 по разработанной методике. Выполнено проектирование и сборка оптико-электронного измерительного комплекса, включая: разработку оптической схемы спекл-интерферометра, подбор и интеграцию компонентов (лазерных источников, систем регистрации), создание специализированного программного обеспечения для управления измерениями и обработки данных. Выполнены измерения деформаций крупногабаритных (до 1,5 м) оптических поверхностей в условиях термовакуумной камеры, осуществлён статистический анализ полученных данных с оценкой погрешностей измерений, проведён сравнительный анализ результатов спекл-интерферометрических измерений с данными альтернативных методов контроля.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (73 наименования) и одного приложения. Диссертация изложена на 120 страницах печатного текста и содержит 72 рисунка и 7 таблиц.

ГЛАВА 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

В данной обзорной главе диссертационного исследования рассматривается историческое развитие метода спекл-интерферометрии от обработки изображений вручную до самых передовых методов, позволяющих определять сразу все три направления деформации. Проанализировано применение исследуемого метода в разных областях промышленности. Рассматриваются различные объекты в том числе: металлические изделия промышленности, органические материалы, композитные материалы и др. Приводятся промышленные решения на основе метода цифровой спекл-интерферометрии. Обзор имеет задачу показать широкий спектр применения рассматриваемого метода из-за его уникальной точности измерения шероховатых, крупногабаритных объектов без установки на их поверхность дополнительных меток. И потому, несмотря на ряд сложностей и особенностей его использования, он может быть использован для контроля элементов зеркальных систем на базе термовакуумной камеры.

1.1 Метод цифровой спекл-интерферометрии

Исторически интерференционные полосы обрабатывались вручную по фотографическому снимку интерференционной картины. Оператор искал самые яркие и самые темные участки (экстремумы) на каждой из полос, используя при этом денситометр [31, 42]. Позже стали появляться автоматизированные цифровые алгоритмы такого подхода [19, 24, 60]. Так как в этом случае не требуется наличия сложного прецизионного оборудования, эти алгоритмы нашли широкое применение. В данный момент ручная обработка применяется очень ограниченно, поэтому далее по тексту рассматривается только цифровая модификация метода.

В оптической схеме спекл-интерферометра излучение лазера делится на опорное и объектное плечи. Излучение опорного канала направляется

непосредственно на цифровую камеру, а предметное – на объект, который его рассеивает. Регистрируются два изображения – начальное и деформированное состояния объекта. В результате их программного вычитания получается картина интерференционных полос (спекл-интерферограмма), которая расшифровывается и преобразуется в поле перемещений контролируемой поверхности. Так как в таком интерферометре выполняются, по сути, дифференциальные измерения, то удастся исключить влияние факторов, вносящих постоянную величину ошибки, обусловленных, например, влиянием иллиминатора. Поэтому не требуется предварительная калибровка средства измерения, что является несомненным преимуществом метода.

С массовым появлением доступных персональных компьютеров в 80-х годах прошлого века, наряду с совершенствованием технологий получения изображений, развития цифровых камер, подходов к расшифровке и обработке изображений, стали появляться автоматические алгоритмы анализа. Метод преобразования Фурье является одним из наиболее популярных методов анализа и расшифровки интерференционных картин [28–30, 33, 49, 54]. Массовость данного подхода обусловлена возможностью разделения спектральных составляющих опорного и объектного пучков. В области пространственных частот разнесение пиков спектров, соответствующих объектному и опорному пучкам, производится, как правило, наклоном зеркала опорного пучка интерферометра или путем модуляции частоты излучения лазерного диода. Если пространственные частоты спектра, соответствующего объектному пучку, немного отличаются от частот спектра пространственной несущей опорного пучка, то путем цифровой фильтрации их можно разделить [50].

С целью устранения ограничения на разделение спектра Лю и Ронни [40] был предложен модифицированный метод преобразования Фурье. Для этого регистрируется эталонная интерференционная картина с медленно меняющейся фазой. Полоса пропускания фильтра, используемого для разделения спектральных составляющих, настраивается по спектру эталонной интерференционной картины [27]. Kujawinska [37] доказал, что при данном подходе возможно

снижение погрешности измерения отклонения высот рельефа до уровня $\lambda/100$. Аналогично методу Фурье построены синхронные методы [35] и методы пространственного фазового сдвига [37, 66], которые используют большой наклон опорного пучка для формирования интерференционных картин с высокой несущей пространственной частотой. Данный подход применяется для недостаточно стабильных систем и измеряемых объектов.

1.2 Разновидности спекл-интерферометров

Развитие метода спекл-интерферометрии привело к его широкому применению в измерительных задачах. Решалась задача расшифровки и количественной интерпретации полученных спекл-интерферограмм за счет устранения фазовой неоднозначности и восстановления полного, непрерывного фазового фронта интерферограммы (т.е. полного поля деформаций объекта) [3]. Кроме того, сложная, а потому не всегда надежная юстировка, делает метод не всегда применимым для разного рода задач. Это решалось введением в схему спекл-интерферометра дополнительных элементов.

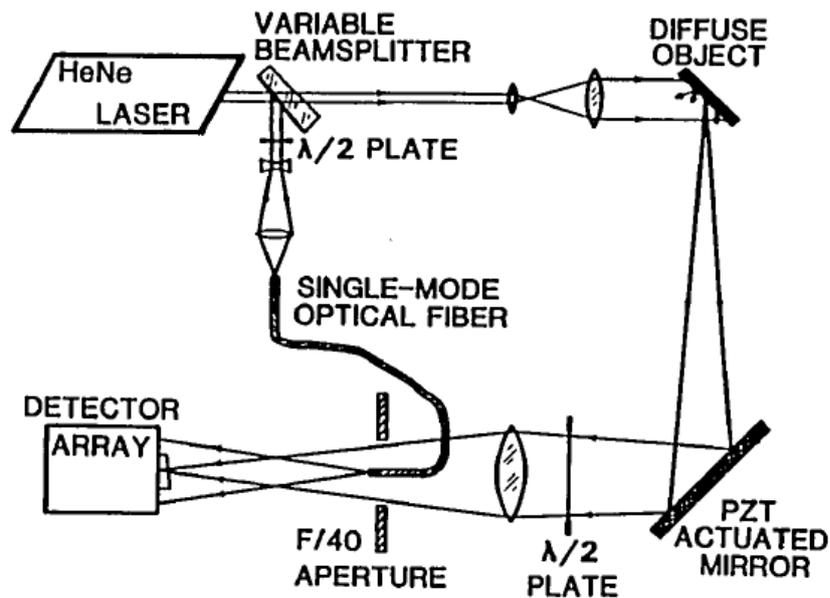
1.2.1 Метод фазовых сдвигов

Одним из таких методов является метод фазовых сдвигов (фазовых шагов) (рисунок 1). Он первоначально был предложен для автоматизации интерференционных измерений на элементной базе современных средств обработки изображений и позволил не только повысить информационную емкость измерений, но в ряде случаев и повысить их точность [48]. Чтобы реализовать в схеме метод фазовых шагов в одно из плеч интерферометра вводится пьезоэлемент или ячейка Поккельса.

Такой способ выгоден тем, что требует минимального количества фазовых шагов и, следовательно, минимального объема памяти, необходимого для ввода и обработки интерференционной картины. С практической же точки зрения он

неудобен тем, что требует точного контроля величины фазового сдвига между шагами, т.е. точной калибровки фазосдвигающего устройства. Кроме того, недостаток информации делает метод весьма чувствительным к шумам в оптическом и электронном трактах, что в итоге снижает точность измерений. Для устранения этих недостатков предложены четырех, пяти и семи шаговые методы [39].

Первоначально метод фазовых шагов был использован в классической интерферометрии. Ступенчатое изменение фазы опорного волнового поля в заданной последовательности проводилось смещением зеркала, прикрепленного к пьезокерамическому элементу, управляемому компьютером. Процесс измерения полностью автоматизирован и занимает доли секунды.



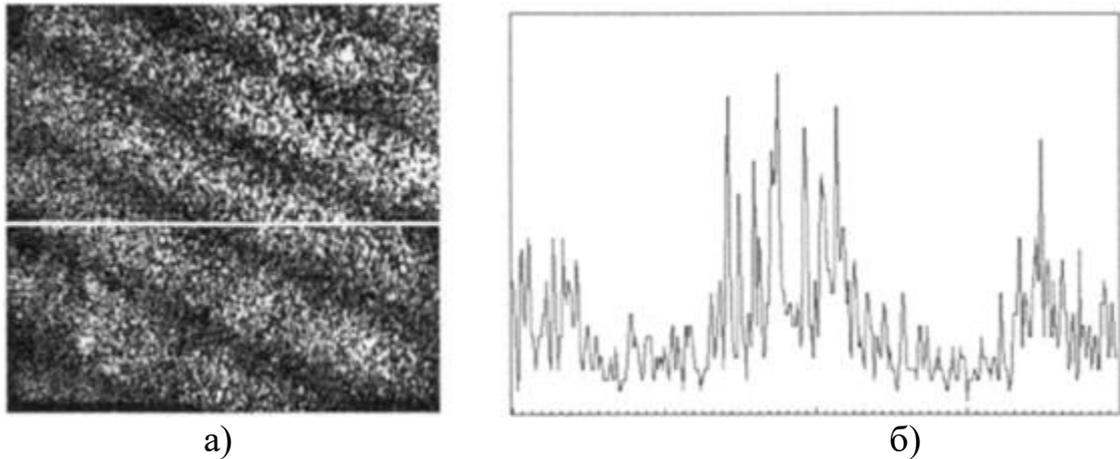
HeNe laser – гелий-неоновый лазер, variable beamsplitter – светоделитель с переменной величиной деления, diffuse object – рассеивающий объект, $\lambda/2$ plate – полуволновая пластина, single-mode optical fiber – одномодовое оптическое волокно, PZT actuated mirror – зеркало с возможностью перемещения пьезоэлементом, F/40 aperture – диафрагма размером F/40, detector array – матрица

Рисунок 1 – Схема спекл-интерферометра, реализующего метод фазовых шагов

В голографической интерферометрии управление фазой интерференционной картины наиболее просто при исследовании объектов в реальном времени, когда ее изменение для восстанавливающего волнового поля осуществляют при помощи подвижного зеркала в опорной ветви интерферометра. В методе двух экспозиций для управления фазой на восстановленном изображении каждую экспозицию производят с отдельным опорным пучком и при восстановлении изменяют фазу в одном из них [55].

Спекл-интерферометрия отличается от голографической, в частности, тем, что интерференционная картина, составляющая микроструктуру изображения, формируется иногда двумя объектными волновыми полями и для реализации метода фазовых шагов следует изменять, как единое целое, фазу одного из них. Другое отличие – существенное увеличение спекл-шума в телевизионном варианте спекл-интерферометрии. Пример такого изображения приведен на рисунке 2 [9]. Полосы хорошо видны на изображении как переходы от темного к светлому. Спеклы, в свою очередь, можно увидеть на графике, как высокочастотные колебания около основного изменения фазы.

Шум от спеклов вносит существенные помехи при определении фазы. Для уменьшения его влияния в процессе обработки интерферограммы на разных стадиях вычисления вводят операции усреднения или фильтрации обрабатываемых данных. Усреднению или фильтрации подвергают разности измеренных интенсивностей до и после деформации объекта, а также вычисленную фазу. Фильтрацию осуществляют с помощью скользящего фильтрующего окна, размер которого выбирают, исходя из уровня шума. Перед фильтрацией могут проводиться также операции исключения дефектных точек, т.е. тех пикселей, в которых по установленным заранее критериям вычисленное значение фазы признано недостоверным. Методика применения метода фазовых шагов в спекл-интерферометрии приведена в [44].



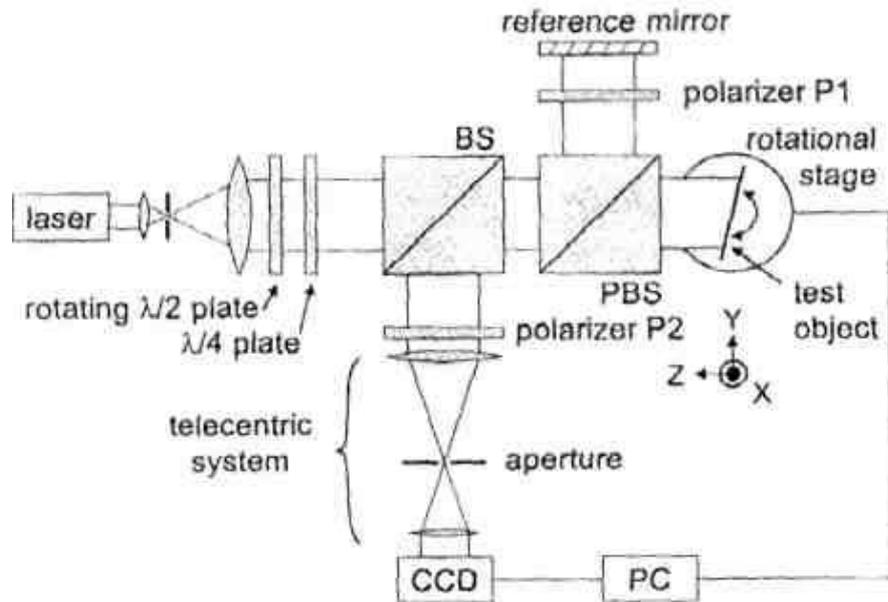
а) спекл-интерферограмма, б) распределение интенсивности по центральной строке
 Рисунок 2 – Изображение с матрицы в цифровом варианте спекл-интерферометрии

Оценка теоретически достижимой точности измерений проведена в работе [51]. Основные источники погрешности измерений: нестабильность состояния объекта и интерферометра в процессе регистрации фазовых шагов; неточное соблюдение величины фазовых шагов; спекл-шум в изображении объекта; шум, обусловленный наложением перекрестных изображений. Каждый из перечисленных источников погрешностей может вносить в измеренную фазу погрешность, имеющую величину от долей до нескольких единиц градусов. В результате для голографической интерферометрии оценка достижимой точности измерений дает величину порядка $1/100$ полосы. Чувствительность метода фазовых шагов является промежуточной между обычной и гетеродинной интерферометрией.

1.2.2 Гетеродинирование в спекл-интерферометрии

Гетеродинирование – это ввод опорной частоты в измерительный сигнал. Для этого используются либо вращающиеся полуволновые пластинки, либо пара акустооптических модуляторов, чтобы вводить двухчастотный входной сигнал в интерферометр. Преимущество наличия опорной частоты в том, что в этом случае можно определить знак деформации.

На рисунке 3 показана схема расположения гетеродинного спекл-интерферометра с временным преобразованием Фурье, который предназначен для измерения нормальных к плоскости объекта деформаций [34].



laser – лазер, rotating $\lambda/2$ plate – поворотная полуволновая пластина, $\lambda/4$ plate – четвертьволновая пластина, BS – светоделитель, PBS – поляризационный светоделитель, reference mirror – опорное зеркало, polarizer P1, polarizer P2 – поляризаторы, test object – тестовый объект, rotational stage – поворотная платформа, telecentric system – телецентрический объектив, aperture – диафрагма, CCD – цифровая матрица, PC – компьютер

Рисунок 3 – Схема спекл-интерферометра с гетеродинированием входного сигнала с помощью вращения фазовой пластинки

При такой схеме линейно поляризованный свет, ориентированный под 0° к азимуту, от гелий-неонового лазера расширяется и пропускается через вращающуюся $\lambda/2$ пластину и фиксированную четвертьволновую пластинку ($\lambda/4$ -пластина), $\lambda/4$ пластина ориентирована под 45° к азимуту. Если $\lambda/2$ -пластина вращается вокруг Z-оси с угловой частотой ω_0 после $\lambda/4$ -пластины выходной сигнал может быть представлен вектором Джонса (формула 1).

$$\vec{E} = \frac{A}{\sqrt{2}} \begin{cases} \exp(i(\omega + 2\omega_0)t) \\ \exp(i(\omega - 2\omega_0)t) \end{cases} \quad (1)$$

где A – амплитуда, ω – частота света, падающего на полуволновую пластину света.

Как видно из уравнения 1, ортогональные компоненты света смещаются по частоте вверх и вниз, соответственно, на $2\omega_0$, в сумме разница составляет $4\omega_0$.

1.2.3 Метод пространственного фазового сдвига

Описанные в подразделах 1.2.1 и 1.2.2 методы хорошо применимы в постоянных во времени системах. Однако, в случае высокой нестабильности объекта, пока не сделаны все действия для выполнения измерений, применение этих методов крайне затруднительно. Для менее устойчивых систем чаще используется метод пространственного фазового сдвига [38, 46], так как вся информация, необходимая для сведения интерферограммы к фазовой картине, регистрируется одномоментно. Опорный пучок наклонен на угол θ по отношению к оптической оси. В плоскости изображения спекл-картина тестируемого объекта модулируется несущей частотой с периодом $PM = \lambda/\sin(\theta)$. Угол θ выбран так, что разность фаз между опорным и предметным пучками изменяется на постоянную величину от одного пикселя камеры к другому. Первая спекл-картина SP_1 объекта в позиции O_1 и вторая SP_2 в позиции O_2 записываются и хранятся в устройстве видеозахвата. С помощью метода трех интерферограмм спекл-картина SP_2 сдвигается на один пиксель влево (цифровой сдвиг кадра) по отношению к SP_1 , затем выполняется вычитание двух картин. Затем берется квадрат модуля, и изображения усредняются. Получается распределение интенсивности I_1 . Вторая интерферограмма с распределением интенсивности I_2 получается аналогично без сдвига на один пиксель. Затем получаем третью интерферограмму с интенсивностью I_3 со смещением на один пиксель вправо.

Три интенсивности распределения представляют собой три, сдвинутых по фазе, полосатых картины, так как пространственная несущая вносит известный

постоянный фазовый сдвиг α между соседними пикселями. Операция усреднения устраняет спекл-шумы.

Для применения этого метода необходимо, чтобы спеклы по-прежнему коррелировали после сдвига изображений на один пиксель. Это означает, что размер спекла должен быть больше, чем размер пикселя, что необходимо учитывать при проектировании и настройке оптической схемы.

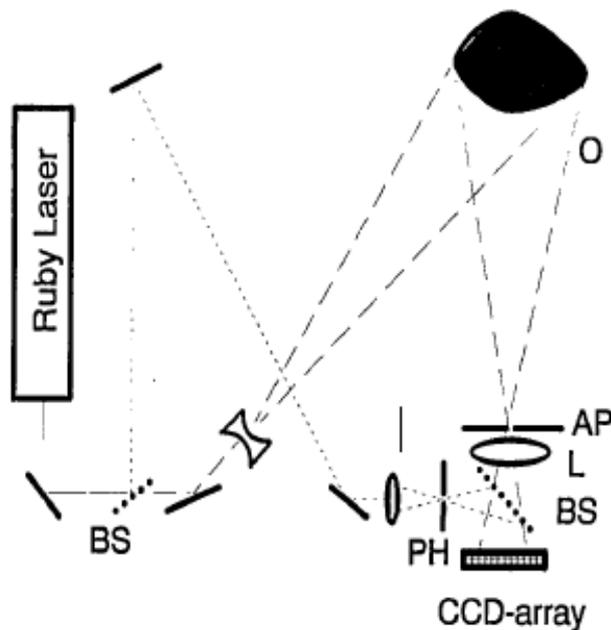
1.2.4 Спекл-интерферометрия с использованием импульсного лазера

В случае объектов большого размера (диаметр более 1 м), которые при этом могут быть нестабильны, например подвержены вибрациям, используют импульсные лазеры (как с одиночным, так и с двойным импульсом). Системы, описанные в работах [45, 52], позволяют получить изображение в течение длины импульса лазера нескольких микросекунд, а затем, используя метод вычитания двух спекл-картин зарегистрированных с помощью ПЗС-камеры, получить корреляционные полосы хорошего контраста.

Описанный выше метод пространственно-фазового сдвига позволяет производить количественный анализ интерференционных полос. Вся информация, необходимая для редуцирования интерферограмм к фазовой картине, записывается одновременно. Поэтому этот метод хорошо подходит для использования в спекл-интерферометрии с применением импульсных лазеров.

Экспериментальная установка с импульсным лазером показана на рисунке 4. Луч рубинового лазера разделяется на объектный и опорный пучки. Объектный пучок расширяется отрицательной линзой и освещает объект. Изображение объекта строится на ПЗС-матрице объективом L. С помощью апертурной диафрагмы AP объектива L можно выбрать оптимальный размер спеклов в плоскости сенсора. Интерференционная картина объектного и опорного пучков регистрируется ПЗС-матрицей. Первое изображение регистрируется с использованием первого импульса, а второе изображение – с

использованием второго импульса лазера. Затем производится вычитание изображений, и получаются корреляционные полосы, которые соответствуют деформации объекта.



Ruby Laser – рубиновый лазер, BS – светоделитель, O – объект, L – объектив, AP – апертурная диафрагма, CCD-array – ПЗС-матрица, PH – точечная диафрагма

Рисунок 4 – Схема ESPI-системы с использованием двухимпульсного рубинового лазера

В эксперименте используется импульсный рубиновый лазер (длина волны 694 нм), который генерирует два импульса большой энергии с интервалом в 100 мкс. Для записи двух изображений, соответствующих двум импульсам лазера, используется ПЗС-матрица с построчным переносом. Поскольку два лазерных импульса, как правило, имеют не одинаковую энергию, то требуется нормализация двух записанных спекл-изображений. Абсолютная величина разницы двух изображений хранится в устройстве видео захвата. На рисунке 5 показан результат вычитания двух спекл-картин вибрирующей пластины.

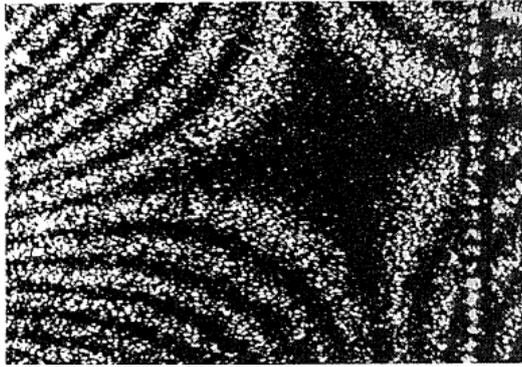


Рисунок 5 – Спекл-интерферограмма вибрирующей пластины, записанная с интервалом импульсов 100 мкс

1.2.5 Измерение 2D и 3D деформаций методом спекл-интерферометрии

Приведенные ранее схемы спекл-интерферометров измеряют только одномерные деформации и позволяют определить только один из трех компонентов вектора деформаций. Связь между фазой $\varphi(x, y)$ и деформацией определяется выражением:

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{u} \cdot \vec{s}, \quad (2)$$

где \vec{u} – искомая деформация (перемещение точки объекта), а \vec{s} – вектор чувствительности, который задается геометрией схемы:

$$\vec{s} = \vec{k}_i - \vec{k}_0, \quad (3)$$

где \vec{k}_i и \vec{k}_0 – единичные векторы освещения и наблюдения, соответственно.

На практике в целом ряде случаев требуется анализ двумерных (2D) и трехмерных (3D) деформаций [36]. Для определения трех составляющих вектора деформации необходимо измерение фазы в направлении трех векторов чувствительности S_1, S_2, S_3 . Эти векторы чувствительности должны быть некопланарными. Самый удобный способ определения вектора деформации \vec{u} разложить все векторы по ортогональному базису на x, y, z компоненты. Ориентация декартовой системы координат может быть произвольной. Например, можно установить точку начала координат на объекте. Если $\vec{s}_1 = (\vec{s}_{1x}, \vec{s}_{1y}, \vec{s}_{1z})$, $\vec{s}_2 = (\vec{s}_{2x}, \vec{s}_{2y}, \vec{s}_{2z})$, $\vec{s}_3 = (\vec{s}_{3x}, \vec{s}_{3y}, \vec{s}_{3z})$ и $\vec{u} = (\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$, то

соотношения между фазами, векторами чувствительности и векторами деформаций можно записать в следующей форме:

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{pmatrix} = \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} s_{1x} & s_{1y} & s_{1z} \\ s_{2x} & s_{2y} & s_{2z} \\ s_{3x} & s_{3y} & s_{3z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Это выражение может быть записано в более компактной форме:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{J} \cdot \vec{u}, \quad (5)$$

где \vec{J} – так называемая матрица чувствительности. Зная $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ и векторы чувствительности s_1, s_2, s_3 , мы можем определить вектор смещения \vec{u} в каждой точке объекта. В виде матрицы получаем:

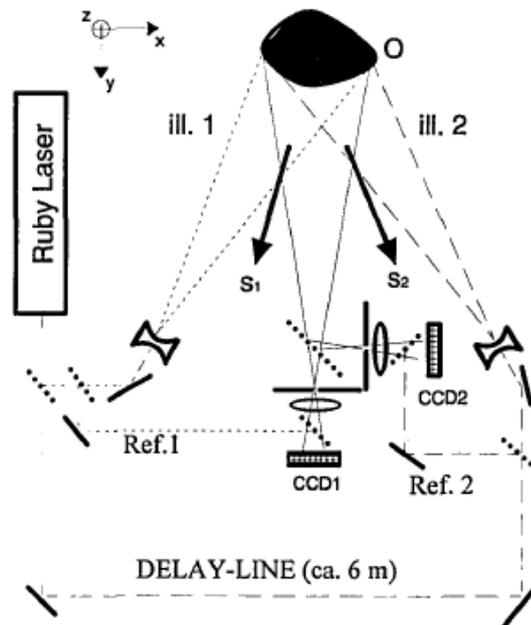
$$\vec{u} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{J}^{-1} \cdot \varphi, \quad (6)$$

где \vec{J}^{-1} – обратная матрица чувствительности. Создавать векторы чувствительности можно, как наблюдая за объектом с разных сторон, так и освещая объект с разных направлений.

Пример освещения объекта с разных направлений представлен в работе [52]. Метод достаточно простой и действенный, но необходимо производить исправление искажений изображений, получаемых с разных направлений наблюдения. На рисунке 6 показана схема только с двумя векторами чувствительности (для удобства), полученными с помощью двух направлений освещения и одного направления наблюдения.

Векторы чувствительности находятся в середине углов между освещением и наблюдением. ПЗС-матрица 1 регистрирует интерференцию между первым опорным пучком (Ref. 1) и первым освещающим пучком (ill. 1) и дает φ_1 карту фаз, которая содержит информацию о деформации вдоль вектора чувствительности s_1 . Таким же образом ПЗС-матрица 2 дает карту фаз φ_2 , которая содержит информацию о деформации вдоль вектора s_2 . Чтобы избежать нежелательных помех, вносится большая фазовая задержка во втором опорном и втором освещающем пучках. Когда используется линия задержки, то имеется дополнительное некогерентное спекл-поле, вызванное освещением объекта. Это поле одинаково для обеих картин, записанных с использованием двух лазерных

импульсов, и исчезает после вычитания спекл-картин. Некогерентное спекл-поле уменьшает количество полезных битов в сигнале, что приводит к некоторому снижению отношения сигнал-шум.



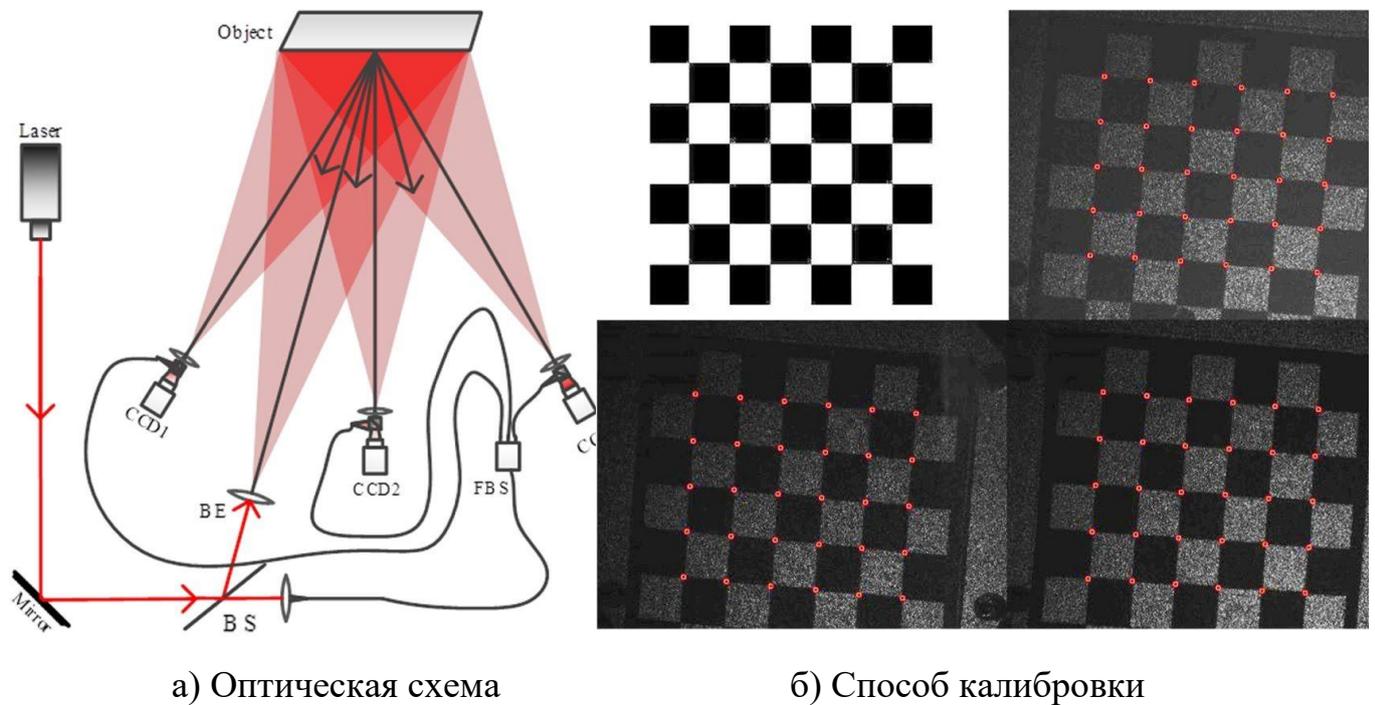
Ruby Laser – рубиновый лазер, O – объект, CCD1 – ПЗС-матрица 1, CCD2 – ПЗС-матрица 2, ill. 1 – освещающий пучок 1, ill. 2 – освещающий пучок 2, Ref.1 – опорный пучок 1, Ref.2 – опорный пучок 2, S_1 – вектор чувствительности 1, S_2 – вектор чувствительности 2, Delay-line – фазовая задержка

Рисунок 6 – Оптическая схема 2D спекл-интерферометра

Wang и др. используют другой подход к измерению трехмерных деформаций с использованием многокамерной пространственной фазовой цифровой интерферометрии спекл-структур, но с использованием одного направления освещения [57]. Предлагаемый способ измерения позволяет определять трехмерные компоненты одновременно без временной задержки. Камеры независимо друг от друга регистрируют три волновых фронта. Расстояние до объекта и увеличение каждого вектора чувствительности при этом отличаются из-за разных положений и направления каждой из камер. В этом случае ключевой задачей становится корреляция этих камер для сопоставления трех спекл-

интерферометров друг с другом. На рисунке 7 представлена предлагаемая оптическая схема и способ калибровки.

Для вычисления разности фаз и, соответственно, величины деформации используется метод преобразования Фурье. Согласованность различных камер достигается с помощью технологии цифровой корреляции изображений. Калибровка всего поля выполняется путем сопоставления изображений в каждой точке сетки. Красные точки сопоставлены на изображениях с разных направлений наблюдения. Программы калибровки и расчета обеспечивают однородность каждого подмножества на измеряемой поверхности.



laser – лазер, mirror – зеркало, BS – светоделитель, BE – объектный луч, object – объект, CCD1, CCD2, CCD3 – камеры 1, 2, 3

Рисунок 7 – Оптическая схема 3D спекл-интерферометра

Альтернативный подход к измерению трехмерных деформаций предложен авторами [7]. Ими предложен новый оптический элемент — квадрилинза, которая использована в составе сдвигового спекл-интерферометра (шерографа) для обеспечения измерений напряженно-деформированных состояний объектов одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Квадрилинза

состоит из четырех одинаковых секторов, вырезанных из исходной круглой линзы и разнесенных друг от друга с образованием зазоров. Квадролинза строит четыре изображения объекта, смещенных относительно оптической оси на расстояние, которое зависит от величины зазоров между секторами (рисунок 8).

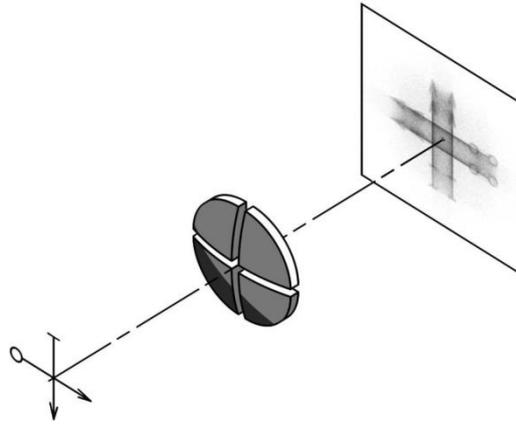


Рисунок 8 – Построение изображения квадролинзой

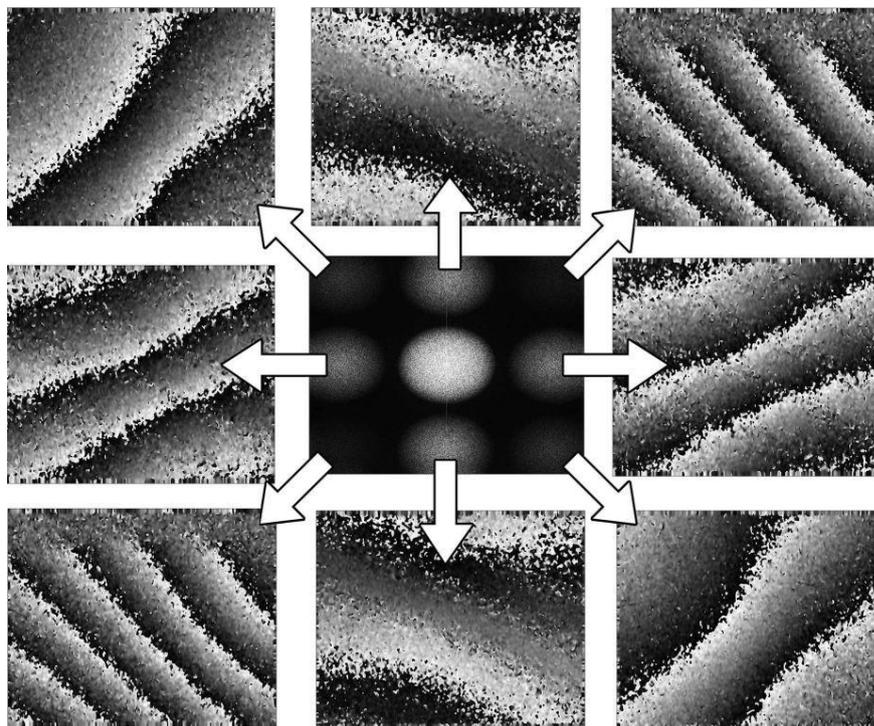


Рисунок 9 – Картины «несшитой» фазы, полученные в результате фильтрации спектра (средний рисунок) в различных направлениях

Восстановление фазы по одной спекл-интерферограмме проводится методом пространственного фазового сдвига на основе преобразования Фурье.

Для повышения контраста интерференционных полос перед секторами квадролинзы устанавливается апертурная диафрагма с четырьмя отверстиями, а для разделения каналов и уменьшения влияния перекрестной интерференции может использоваться поляризационная развязка каналов. Приведены экспериментальные результаты (рисунок 9) использования спекл-интерферометра с квадролинзой по исследованию микродеформации круглой мембраны.

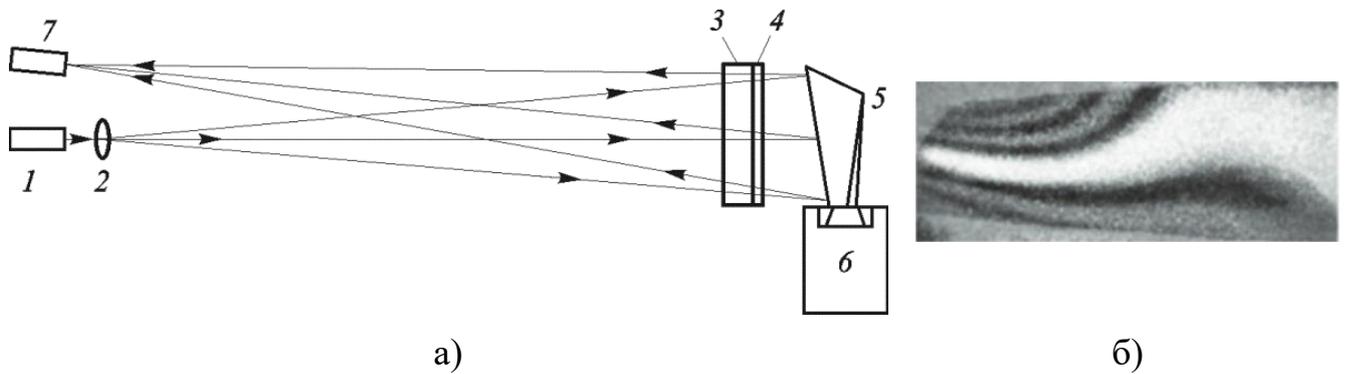
1.3 Использование метода спекл-интерферометрии в разных областях

Спекл-интерферометры, помимо прочего, имеют широкий спектр областей применения. Они получили широкое применение при неразрушающем контроле деформаций [25], смещений [1], вибраций [53] разного рода исследуемых сред, а также, в отличие от стандартных способов интерферометрии, этот метод даёт возможность контролировать объекты с оптически грубой поверхностью (случайно-неоднородной), которой обладает большинство элементов аппаратов в авиакосмической промышленности.

Кроме того, он используется для контроля ключевых частей турбомашин: рабочие колеса и лопатки (рисунок 10). Измерение их прочности с помощью спекл-интерферометра рассматривается в работе [12].

Принцип его работы основан на схеме с разделенными пучками и плоской опорной волной, а в качестве источника излучения используется непрерывный лазер. Для контроля деформаций отдельных лопаток реализована оптическая схема с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной. В результате получена повышенная помехоустойчивость, обеспечивающая возможность проведения исследований колебаний крупногабаритных деталей без использования оптического стола.

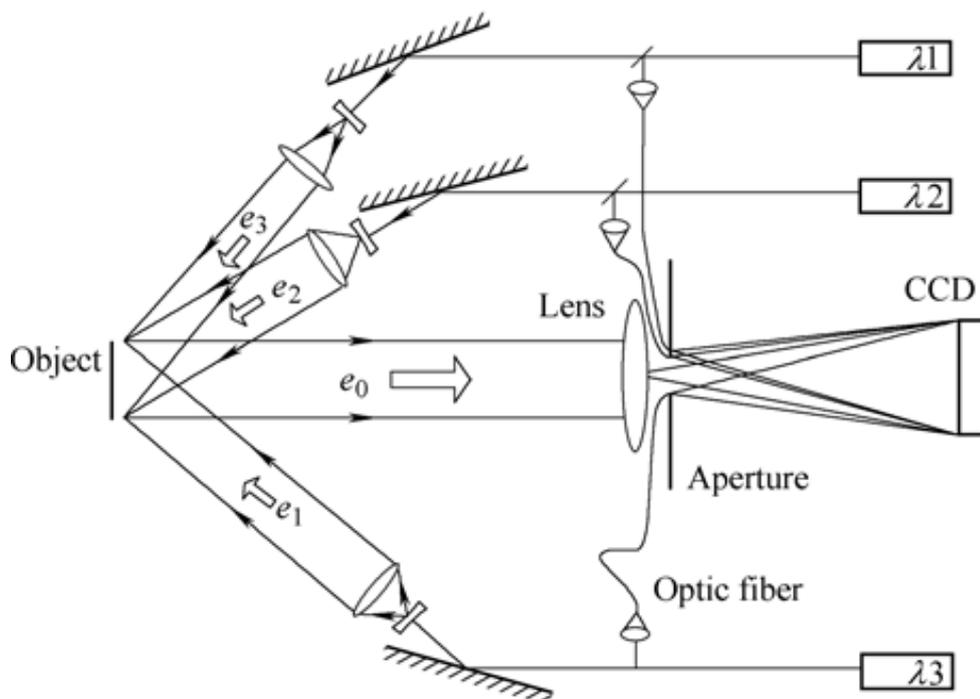
Другой пример применения 3D ESPI — в биомедицинской области. Кость представляет собой механочувствительную ткань, которая адаптирует свою массу, архитектуру и механические свойства к внешней нагрузке (рисунок 11).



а) Схема стенда; б) Картина деформаций лопатки

1 – лазер, 2 – линза, 3 – плоскопараллельная пластина, 4 – полупрозрачное покрытие, 5 – объект измерения, 6 – держатель объекта измерения, 7 – фотоприемная матрица

Рисунок 10 – Использование спекл-интерферометра для контроля ключевых частей турбомашин

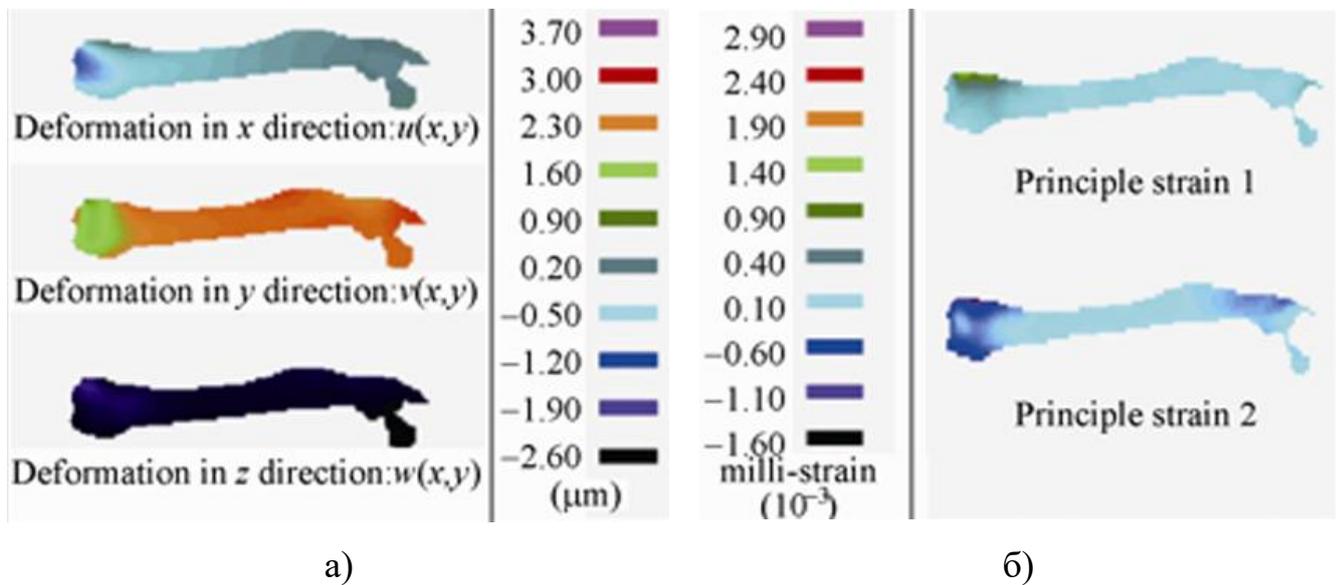


$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – длины волн лазера, e_0 – направление наблюдения, e_1, e_2, e_3 – направления освещения, объект – объект, lens – объектив, aperture – диафрагма, optic fiber – оптическое волокно

Рисунок 11 – Схема установки для измерения трехмерной пространственной фазовой картины

В этой реализации система 3D ESPI используется для изучения смещения и деформации в 3D при приложении нагрузки [59]. Три одномерных направления освещения со сдвигом фазы несущей частоты используются одновременно с трех разных направлений. Применяются три лазера с разными длинами волн, чтобы избежать интерференции между разными направлениями измерения.

Кость фиксирована на одном конце и свободна на другом конце. Механическая нагрузка применяется с помощью пьезоэлектрического нагрузочного устройства, управляемого компьютером. На рисунке 12 показано измеренное трехмерное смещение и расчетная принципиальная деформация при силовой нагрузке 1 Н.



три направления деформации

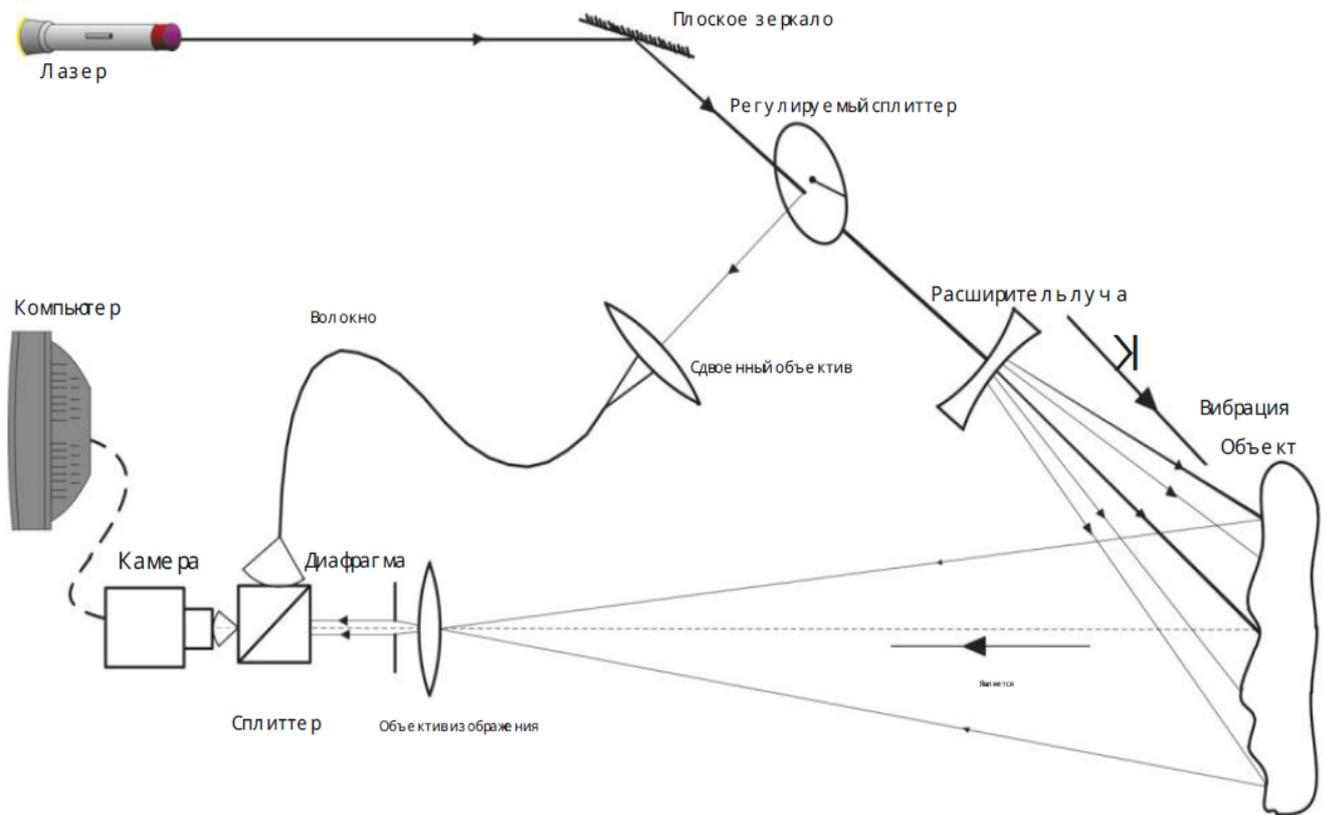
расчитаная деформация

deformation in x direction: $u(x, y)$, deformation in y direction: $v(x, y)$, deformation in z direction: $w(x, y)$ – деформация по x, y, z соответствует $u(x, y)$, $v(x, y)$, $w(x, y)$,
 principle strain 1, principle strain 2 – итоговая деформация

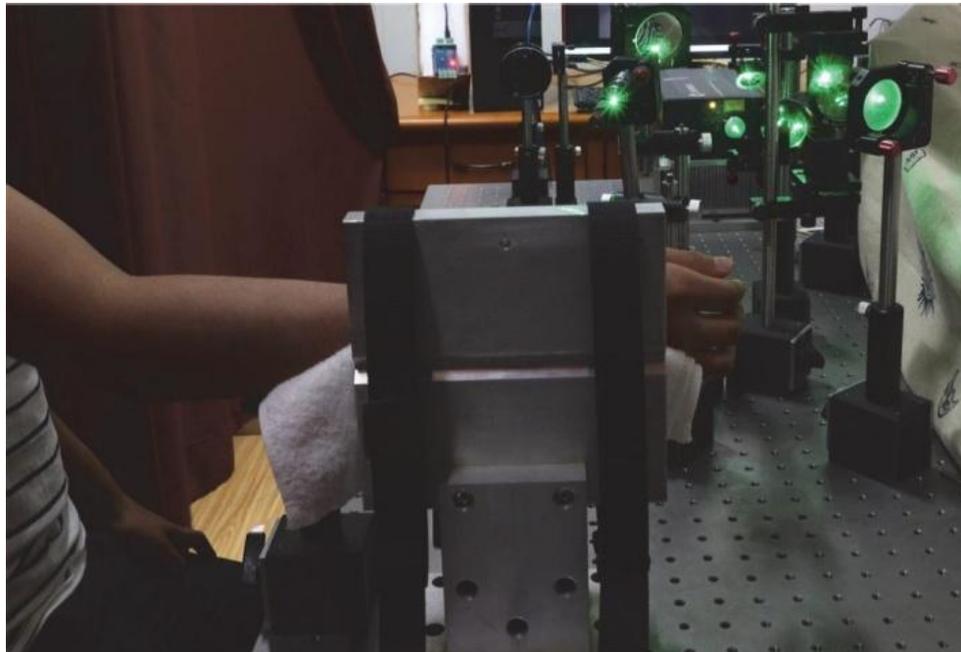
Рисунок 12 – Микроскопические смещения и деформации бедренной поверхности в ответ на усилие величиной 1Н

В работе [65] предлагается способ оценки пульса человека с пространственной несущей для динамического измерения микро/нано

масштабного смещения кожи. На рисунке 13 а представлена оптическая схема, а на рисунке 13 б экспериментальная установка.



а)



б)

а) оптическая схема установки, б) экспериментальная установка

Рисунок 13 – Оптическая установка для обнаружения пульса на запястье

Лазерный пучок делится на два луча, объектный и опорный, с помощью регулируемого делителя. Предметный освещает поверхность вибрирующего объекта через расширитель луча вдоль направления освещения K_i . Рассеянный объектный пучок собирается формирующей линзой вдоль направления наблюдения K_o , а затем формирует изображение на датчике изображения камеры через апертуру. Объектный и опорный лучи совмещаются на детекторе изображений, где формируется спекл-картина, из которой программно получают интерференционные полосы.

Правое запястье добровольца фиксировалось двумя ремнями на задней панели. Мощность лазера составляла менее 0,25 Вт во избежание дискомфорта для человека. Всего в ходе эксперимента было получено и обработано 28800 цифровых спекл-интерферограмм. На основе их получена вибрация пульса в течение времени испытания (3 мин).

Кроме этого, спекл-интерферометрия применялась для выполнения термовакуумных испытаний рефлекторов космических аппаратов [47]. Измерения выполнялись на базе термовакуумной камеры (рисунок 14).



Рисунок 14 – Квалификационная установка ESPI на 2-метровой TVA IABG

Спекл-интерферометр монтируется перед камерой. Луч лазера направляется в камеру через специально изготовленное окно с низким коэффициентом отражения на рабочей длине волны лазера. В процессе испытаний перемещение как динамическое, так и термоупругое должны быть сведены к минимуму. Для этого испытуемый объект устанавливается на жесткую ферменную конструкцию, армированную углеродным волокном, которая, в свою очередь, термически изолирована для поддержания малого изменения его температур во время термоциклирования. Обе меры гарантируют, что отношение движения твердого тела к тепловой деформации испытуемого объекта не превысит предельное значение 20:1.

1.4 Промышленные решения на основе метода спекл-интерферометрии

В данное время на рынке имеется ряд фирм, предлагающих свои системы измерения деформаций на основе корреляционной обработки цифровых изображений.

3D-PulsESPI Система Q-600 [68] предназначена для бесконтактного, трехмерного анализа динамических событий. Она специально разработана для измерения акустических явлений таких, как визг тормозов, вибрации кузова, двигателя автомобилей и других динамических приложений, таких как ударные волны, взрыв тесты и т.д. (рисунок 15).

Использование трех камер и двух импульсных рубиновых лазеров позволяет Q-600 охватить все виды динамических деформаций в течение интервалов времени от нескольких микросекунд с последующей демонстрацией анимации и количественных результатов измерений. Разрешение Q-600 находится в субмикронном диапазоне и не зависит от поля измерений. Система может измерять практически любые поверхности площадью до нескольких квадратных метров.



а)



б)

а) внешний вид всей системы, б) измерительная головка

Рисунок 15 – Система Q-600

3D ESPI Система Q-300 [69] также позволяет измерять трехмерные деформации и напряжения различных изделий с очень высокой чувствительностью. Благодаря беспрецедентной компактности головки датчика, система обладает портативностью и гибкостью настройки для широкого круга задач.

Q-300 лучше всего подходит для разработки и тестирования сложных компонентов и структур в электронике, автомобилестроении, обработке и исследовании материалов. Она идеально подходит для экспериментальной проверки аналитических и численных методов расчета механических изделий и конструкций. Встроенный зум-объектив обеспечивает перенастройку на различные размеры и геометрию объекта. Для анализа небольших участков возможно использование макро-объективов. Параметры систем Q-300, Q-600 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики ESPI-систем фирмы Dantec Dynamics

Технические характеристики	Q-600	Q-300
Чувствительность	0,06 мкм	0,03 – 1 мкм
Диапазон измерений	1 – 10 мкм между кадрами	настраиваемый (10 – 100 мкм в зависимости от направления измерения)
Поле зрения	до 1,5 м ²	до 200×300 мм ² , большие размеры – с использованием внешнего лазера
Рабочее расстояние	настраиваемое, в зависимости от используемых световых волокон (типично 1 – 3 м)	0,3 – 1,5 м
Режимы работы	одноимпульсный и двухимпульсный	автоматический, ручной, 1D, 2D, 2D измерения
Разделение импульсов	2 – 800 мкс	-
Разрешение фотоприемника	1300×1030 пикселей	1380x1035 пикселей
Формат данных	TIFF, ASCII, UFF, Windows metafile	TIFF, ASCII
Лазер	рубиновый лазер, управляемый компьютером, энергия импульса – 1 Дж	лазерный диод 2 × 70 мВт, 785 нм
Управление	Pentium PC	портативный контроллер со встроенной электроникой
Операционная система	Windows 2000, XP	Windows 2000, XP

Системы PulsESPI и ESPI фирмы Carl Zeiss Optotechnik GmbH [56] могут быть выполнены как в импульсном исполнении, так и на основе непрерывного лазера (рисунок 16). Характеристики у систем имеют схожие значения.



Рисунок 16 – Система PulsESPI от Carl Zeiss Optotechnik GmbH

ESPI-система была использована для измерения деформаций рефлектора для частот 20-50 ГГц, диаметром 1,2 м в термовакуумной камере в DLR в Берлине [43]. Импульсная ESPI-система устанавливалась за пределами камеры, измерения проводились через небольшое окно ($D = 200$ мм) в крышке камеры (рисунок 17 а, б).

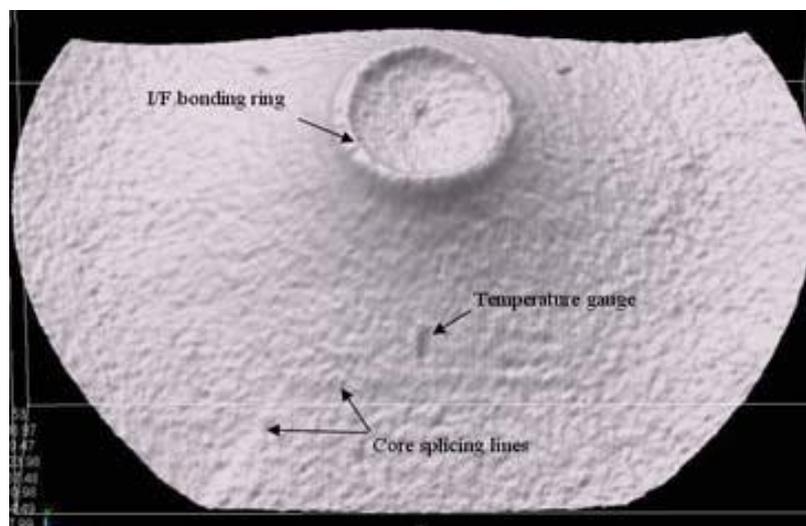
Главной проблемой при измерениях были вибрации, которые создавал вакуумный насос термовакуумной камеры. Во время измерений насос приходилось отключать, чтобы избежать вибраций рефлектора. Зарегистрировано более 1500 последовательных ESPI-изображений в течение двух циклов охлаждения в условиях вакуума в диапазоне температур от $+110$ °С до -110 °С. После обработки данных удалось получить с высоким разрешением картины термоупругих деформаций поверхности рефлектора. Картина деформаций представлена на рисунке 17 в. Погрешность измерений – менее 0,2 мкм. Видно, что крепление рефлектора является основным источником деформаций и вызывает отклонение около 1 мкм на каждый градус Цельсия на внешнем ободе рефлектора. Сама же параболическая антенна остается очень стабильной.



а)



б)



в)

а, б – вид рефлектора, камеры и измерительной системы,
в – результаты измерений

Рисунок 17 – Измерение рефлектора диаметром 1.2 м в термовакuumной камере

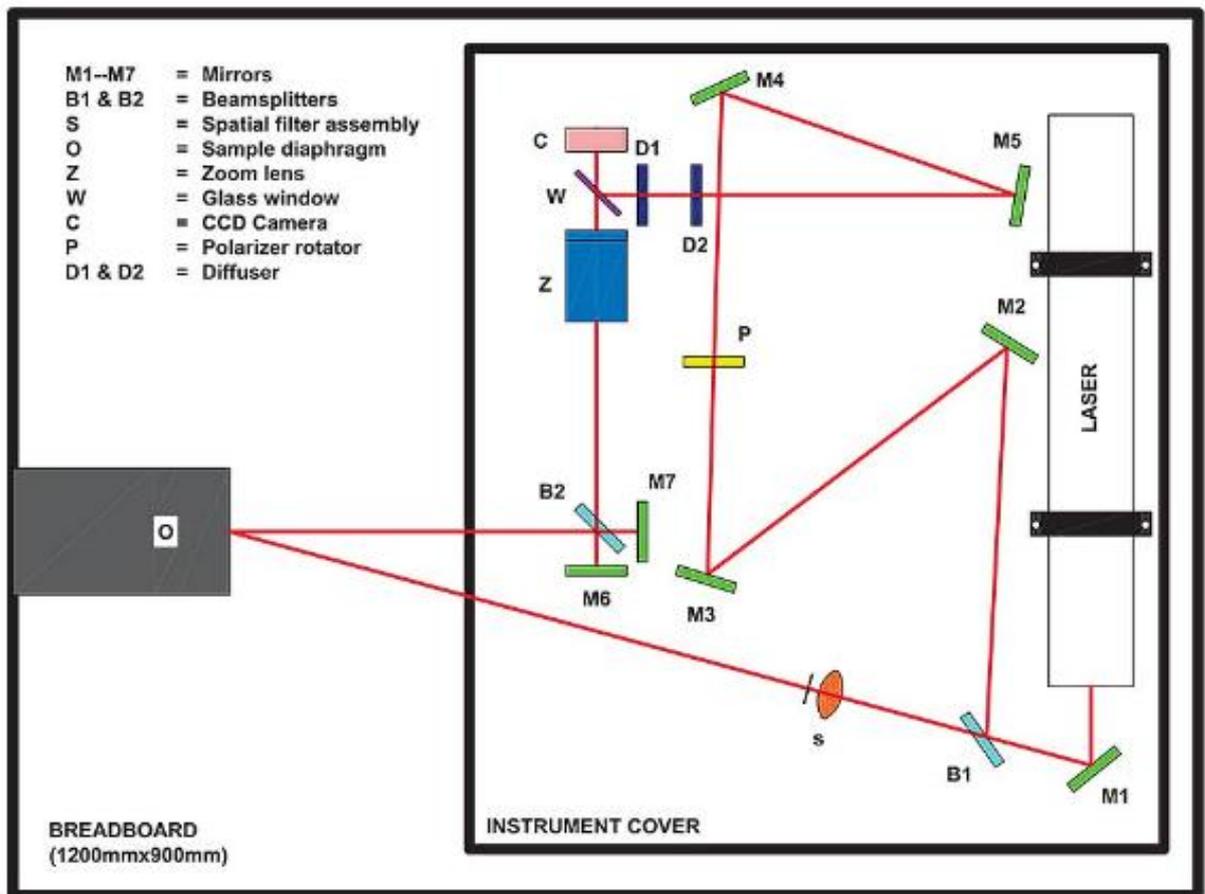
Фирма Holmarc создала спекл-интерферометр с названием модели HO-ED-INT-15 [70]. Он основан на интерференции между диффузно отраженным светом от тестируемого объекта и эталонным лучом (рисунок 18).

Это один из наиболее чувствительных интерферометрических методов, позволяющий измерять субмикронные смещения как в плоскости, так и вне ее. Изображения до и после деформации записываются ПЗС-камерой и анализируются с помощью программного обеспечения для анализа изображений.

Деформация вызывает изменения в узоре полос. Эти изменения можно проанализировать с помощью программного обеспечения, предназначенного для обнаружения деформаций.



а)



б)

а) внешний вид, б) оптическая схема

Рисунок 18 – Спекл-интерферометр HO-ED-INT-15, Holmarc

Поскольку этот интерферометр очень чувствителен к вибрационным шумам, ESPI компании Holmarc поставляется с оптической макетной плитой с виброизоляцией. В качестве источника света используется линейно поляризованный гелий-неоновый лазер с длиной волны 632,8 нм и выходной мощностью 5 мВт. Разделитель луча разделяет лазерный луч на два. Переданный луч равномерно освещает тестируемый объект через узел пространственного фильтра, в то время как отраженный луч падает на ПЗС-матрицу в качестве эталонного луча. Изображение освещаемого тестового объекта фиксируется трансфокатором и ПЗС. Основные технические характеристики представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики спекл-интерферометра HO-ED-INT-15, Holmarc

Техническая характеристика	Значение
Laser	He-Ne 5mW @ 632.8nm.
Beam expander	20X microscope objective with pinhole.
Zoom lens	Nikon
Camera	1/2.5" 5 MPC MOS Color
Software	Holmarc camera application software & image analysis software.
Optical Breadboard.	1200 mm × 900 mm size with vibration isolation support.

В России так же имеются промышленные решения в данной области – спекл-интерферометр ДОН-5ЦЗ [2]. Он используется для регистрации измерения остаточных напряжений путем регистрации полей малых перемещений в исследуемой зоне. Его внешний вид представлен на рисунке 19.



Рисунок 19 – Спекл-интерферометр ДОН-5ЦЗ

Метод основан на упругой нагрузке, возникающей в локальной области исследуемого изделия путем сверления несквозного отверстия малого диаметра и глубины. Точность определения деформации таким методом достигает ± 130 нм, это деформации, вызываемые невысокими остаточными напряжениями. Метод лазерной интерферометрии позволяет получить точные данные по величине, знаку и направлению главных осей напряжений за 10-15 мин.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

В главе 1 проведен обзор и анализ методов цифровой спекл-интерферометрии. Рассмотрено развитие метода цифровой спекл-интерферометрии от ручной обработки интерференционных полос до самых современных 3D систем, выполняющих оперативную обработку картин компьютером. Приведены различные схемы интерферометров, разнообразные области их применения, исследующие всевозможные объекты, обладающие свойством рассеяния лазерного излучения: металлические изделия промышленности, органические материалы, композитные материалы и др. Представлены промышленные решения в области спекл-интерферометрии. Все это говорит о высоком интересе к данному методу, несмотря на особенности его использования и необходимость адаптации к каждой конкретной задаче.

В обзоре показан опыт использования метода спекл-интерферометрии для измерения объектов на базе термовакуумной камеры. Для определения деформаций с погрешностью 1 мкм на объектах размером 1 м и более в таких условиях измерений рассматриваемый подход, а именно метод пространственного фазового сдвига на основе импульсного лазера, оказывается безальтернативным. Такая конфигурация позволяет выполнять мгновенную (менее 1 мс) регистрацию измеряемого объекта и проводить измерения даже в условиях высокого уровня вибраций и высокой подвижности объекта.

Для решения поставленной задачи наиболее применим метод импульсной спекл-интерферометрии, показывающий хорошие результаты измерений в условиях высокой вибрации. Для измерения рефлекторов достаточно одного направления деформации, так как важно изменение формы только в направлении работы рефлектора (соответственно, направления измерения спекл-интерферометра). Выбран метод пространственного фазового сдвига, позволяющий с помощью одного кадра получать информацию о величине фазы.

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ФАЗОВОГО СДВИГА И ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ НА ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ

При использовании метода пространственного фазового сдвига необходимо выполнять контроль точности, с которой он задан. Это связано с тем, что при неверном наклоне опорной волны относительно предметной возникают погрешности в измерении данным методом. В данной главе выполнялось математическое моделирование спекл-интерферометра в режиме непоследовательной трассировки лучей с использованием программного обеспечения Zemax. На основе моделирования разрабатывался лабораторный стенд, на котором полученные при моделировании данные исследуются экспериментально.

2.1 Математическое моделирование спекл-интерферометра в режиме непоследовательной трассировки лучей

Перед непосредственно моделированием определим понятие пространственного фазового сдвига. Суть метода пространственного фазового сдвига заключается в создании строго определенной разности фаз между соседними пикселями посредством наклона опорной волны относительно предметной. Спекл-изображение, получаемое на цифровой матрице, описывается формулой 8:

$$I_{рез1} = I_{предм} + I_{опорн} + 2\sqrt{I_{предм}I_{опорн}} \cos(\varphi - \Delta\varphi) \quad (7)$$

$$I_{рез2} = I_{предм} + I_{опорн} + 2\sqrt{I_{предм}I_{опорн}} \cos(\varphi) \quad (8)$$

$$I_{рез3} = I_{предм} + I_{опорн} + 2\sqrt{I_{предм}I_{опорн}} \cos(\varphi + \Delta\varphi) \quad (9)$$

При этом информацию об изменении формы поверхности объекта несет в себе изменение фазы φ объектной волны. Чтобы ее вычислить из формулы 8 так

же необходимо знать две другие неизвестные: интенсивность опорной $I_{\text{опорн.}}$ и интенсивность предметной $I_{\text{предм.}}$ волн.

Чтобы определить эти три переменные необходимо зарегистрировать еще два изображения, которые будут иметь известный фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ (уравнения 7, 9). В традиционной схеме спекл-интерферометра сдвиг выполняется с помощью пьезоактуатора в опорном плече. В случае подвижного объекта, сделать это невозможно, так как за время внесения сдвига в опорную длину изменится и объектная волна. Чтобы избежать этого, опорная волна $I_{\text{опорн.}}$ проецируется на матрицу под определенным углом (рисунок 20). Тем самым задается период пространственного фазового сдвига, в пределах которого, сдвигая попиксельно зарегистрированное изображение ($I_{\text{рез1}}$), получаем два дополнительных изображения ($I_{\text{рез2}}$, $I_{\text{рез3}}$), которые необходимы для получения спекл-интерферограммы и устранения фазовой неоднородности.

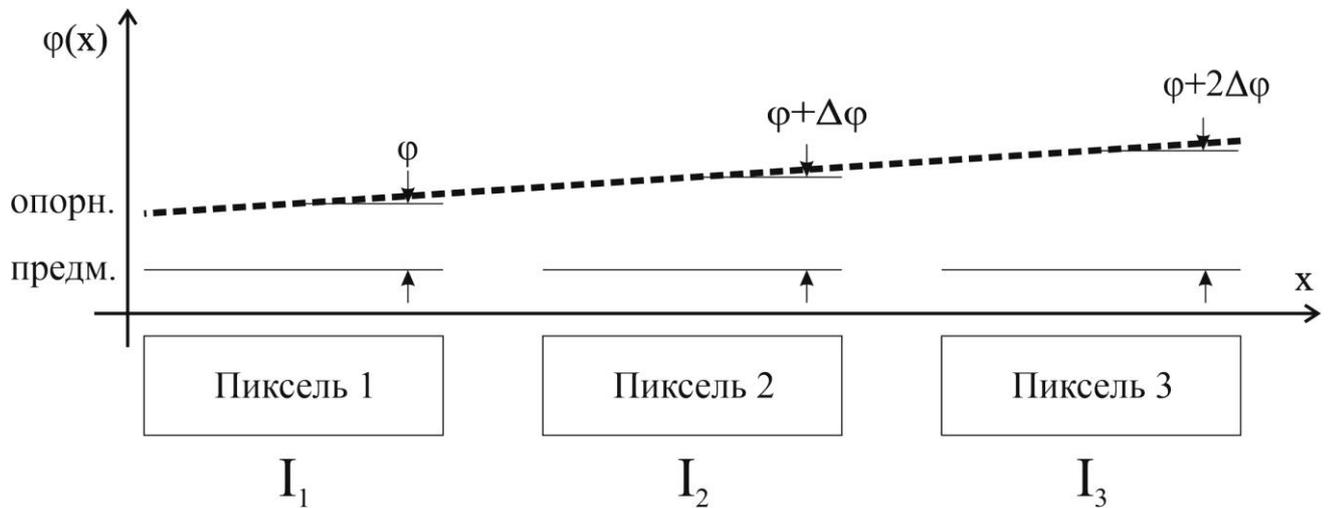


Рисунок 20 – Фаза предметной и опорной волны в методе пространственного сдвига

Используя уравнения 7, 8, 9 имеем формулу 10 для восстановления фазы φ при трехшаговом случае:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \sqrt{3} \frac{I_{\text{рез.1}} - I_{\text{рез.2}}}{2I_{\text{рез.1}} - I_{\text{рез.2}} - I_{\text{рез.3}}} \quad (10)$$

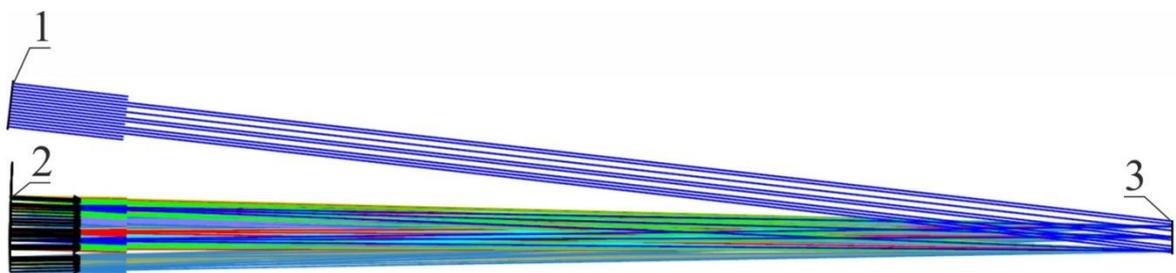
Для исследования погрешности измерений в зависимости от ошибки задания угла пространственного фазового сдвига проводилось моделирование оптической схемы спекл-интерферометра в программном пакете для расчета и проектирования оптических систем Zemax OpticStudio. Спеклы являются результатом интерференции нескольких взаимно когерентных оптических полей, которые имеют псевдо случайные фазы в плоскости наблюдения. Такая интерференция в частности возникает в случае наблюдения объекта с шероховатой поверхностью, освещенной лазерным излучением. Для получения псевдослучайного набора фаз предлагается использовать принцип Гюйгенса, согласно которому шероховатая поверхность является набором точечных источников. Это предполагает, что изменения высоты на поверхности достаточно велики, чтобы создать такой случайный процесс.

Было предложено три способа моделирования спекл-интерферометра, которые описаны ниже. Первый характеризуется заданием предметной волны в виде набора точечных источников. Во втором в качестве объекта освещения используется поверхность с псевдослучайной микроструктурой. В третьем применяются две плоские волны, проецируемые в плоскость наблюдения. Последний метод является предпочтительным, поскольку позволяет получать корректные интерференционные картины при вычитании изображений начального и деформированного состояний, минимизировать источники погрешностей, за исключением ошибок, связанных с неточностью задания пространственного фазового сдвига.

Рассмотрим модель задания предметной волны набором точечных источников. В реальном эксперименте используется один источник освещения, который испускает лучи равномерно в некоторой пространственной области и в пределах определенного угла конуса. Поскольку необходимо, чтобы несколько лучей выходящих из заданной точки, имели одинаковую фазу относительно друг друга, но были распределены случайным образом относительно всех других

точек, разумным вариантом является создание дискретного набора точечных источников, которые распределены по плоской области освещения. Чтобы избежать периодических артефактов выборки, эти точечные источники могут быть размещены случайным образом в области освещения. Эти источники освещают всю плоскость наблюдения, для чего подбирается угол расходимости каждого из них.

В работе представлено моделирование (рисунок 21), в котором 50 точечных источников с длиной волны 0,65 мкм случайным образом заполняют квадратную область освещения размером 0,5 мм × 0,5 мм. Детектор размером 0,5 мм × 0,5 мм имеет разрешение 1000×1000 пикселей и располагается на расстоянии 7 мм от плоскости освещения. Каждый точечный источник предметной волны имеет одинаковую интенсивность, но случайную фазу. Таким образом моделируется шероховатость поверхности объекта. Опорная волна моделируется плоским источником размерами (1×1) мм. В результате сложения двух волн наблюдается спекл-картина (рисунок 22 а).

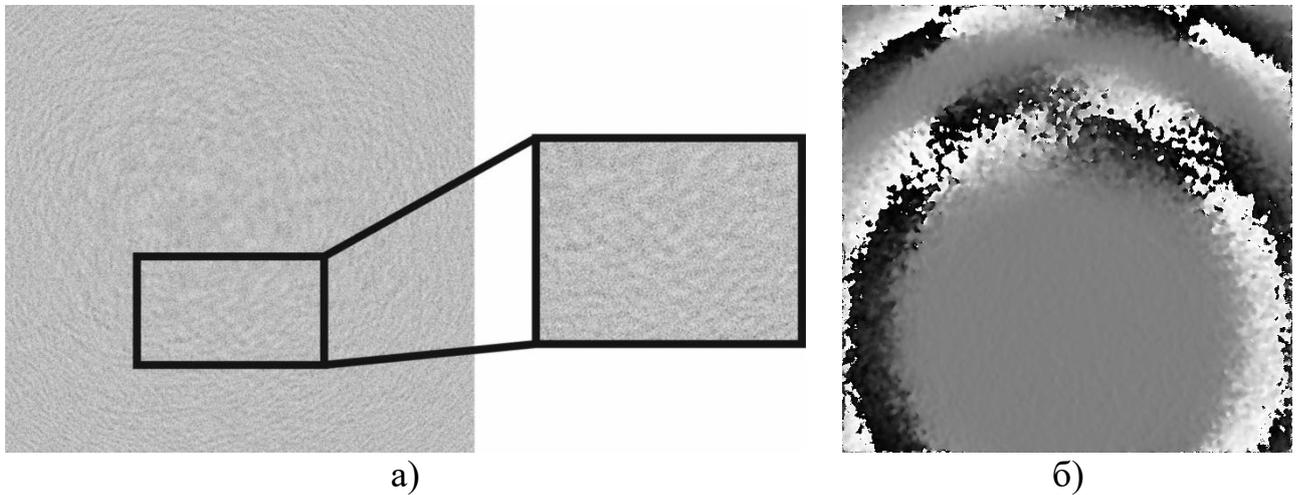


1 – опорная волна, 2 – предметная волна, 3 – плоскость наблюдения

Рисунок 21 – Моделирование спекл-интерферометра в программном пакете Zemax OpticStudio

Опорная волна последовательно наклонялась на разные углы, получались спекл-картины объекта в исходном состоянии и деформированном. Эти спекл-картины вычитаются, тем самым получается изображение с информацией о фазе, которое расшифровывается в карту деформаций. Пример обработки изображения приведен на рисунке 22 б.

В результате обработки имеем некорректные интерференционные картины, на которых изменяется направление изменения фазы, относительно вертикальной оси симметрии, что противоречит ожидаемой концентрической картине интерференционных колец для заданного типа деформации. Мы фактически наблюдаем дифракцию источников, а не формирование изображения объективом. Из-за этого, в перспективе, невозможность учета aberrаций оптических элементов, которые неотвратно будут присутствовать в физическом эксперименте. При этом, процесс задания каждого из источников очень трудоемкий.



а) пример спекл-картины, полученной в программном пакете Zemax OpticStudio

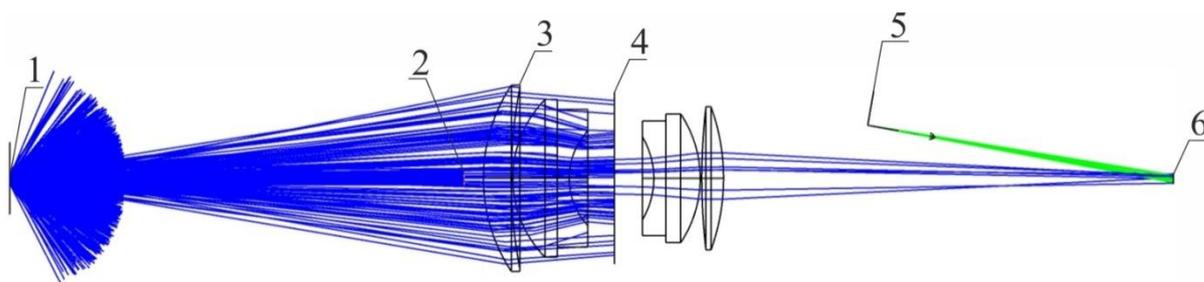
б) карта деформаций спекл-картины, полученной в результате моделирования

Рисунок 22 – Моделирование спекл-интерферометра

Поэтому, предложен другой способ моделирования. Для получения псевдо-случайного набора фаз можно моделировать поверхность объекта псевдослучайной микроструктурой величиной рельефа до нескольких длин волн (рисунок 23). В этом случае даже в геометрическом приближении (при трассировке лучей) оптическая схема будет имитировать работу спекл-интерферометра. Благодаря наличию микронеровностей, сигнал на изображении будет похож на реальный, а при небольших деформациях будут наблюдаться

интерференционные полосы. Однако данный подход перестаёт работать при значительных смещениях, превышающих поперечный размер микроструктуры.

Объектный источник 2 освещает измеряемый объект 1 с псевдослучайной микроструктурой на поверхности величиной до 10λ , объективом 3 формируется изображение на матрице 6. Опорный источник 5 является точечным и освещает матрицу без объектива. Пример спекл-изображения, полученного в результате моделирования с учетом дифракционных эффектов показан на рисунке 24 а. И при получении двух таких изображений, между которыми произошла деформация, получаем отсутствие интерференционных полос (рисунок 24 б). Такой результат получается из-за особенностей работы Zemax OpticStudio – дифракционные эффекты рассчитываются для небольшой области фокусировки (десятки мкм). Для большого изображения ($0,5 \times 0,5$ мм) расчет не ведется. Применение же строгого волнового подхода требует огромных вычислительных затрат, так как необходимо провести интегрирование по принципу Гюйгенса всех точечных источников от объекта, затем учесть влияние оптической системы и вычислить волновой фронт предметной волны для каждого элемента фотоприёмника. Применение данного подхода особенно для больших объектов является крайне затруднительным.

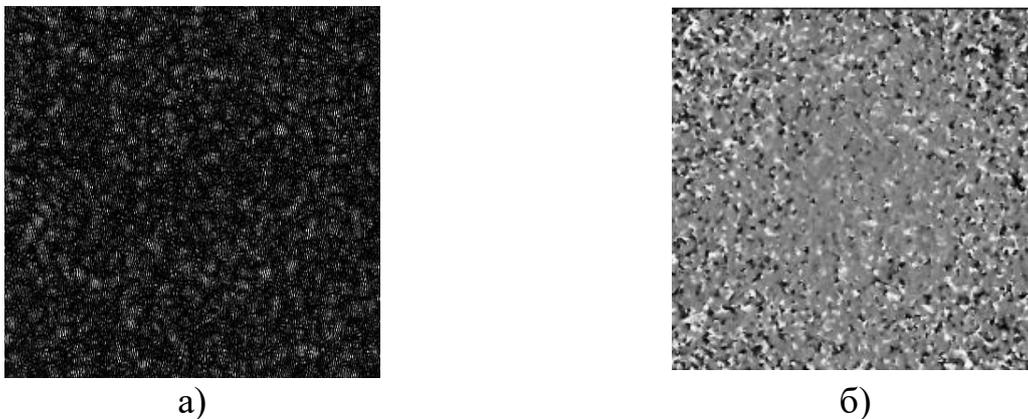


1 – объект с псевдослучайной микроструктурой на поверхности величиной 10λ ,
 2 – объектный источник, 3 – объектив, 4 – апертурная диафрагма,
 5 – опорный источник, 6 – матрица

Рисунок 23 – Моделирование спекл-интерферометра с использованием объектива

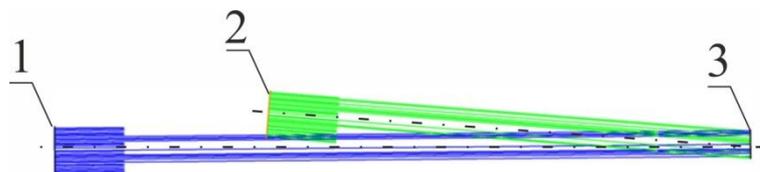
Для моделирования формирования изображений с пространственным фазовым сдвигом предложена более простая для вычислений модель спекл-

интерферометра в геометрическом приближении (рисунок 25). Действительно, метод фазового сдвига достаточно универсален и работает для волновых фронтов любой формы, поэтому для его имитации нет необходимости в расчете сложных рассеянных полей. Например, обе волны, и предметную, и объектную, можно моделировать плоскими волновыми фронтами. При этом в оптический путь предметной волны можно вставить элементы оптической системы (линзы, объективы, зеркала), и тем самым получить возможность исследовать влияние оптики на искажения интерферограмм.



- а) пример спекл-картины, полученной в программном пакете Zemax OpticStudio
 б) карта деформаций спекл-картины, полученной в результате моделирования

Рисунок 24 – Изображение с матрицы и результат обработки при моделировании спекл-интерферометра с использованием объектива



- 1 – объектный источник, 2 – опорный источник, 3 – матрица

Рисунок 25 – Спекл-интерферометр в геометрическом приближении

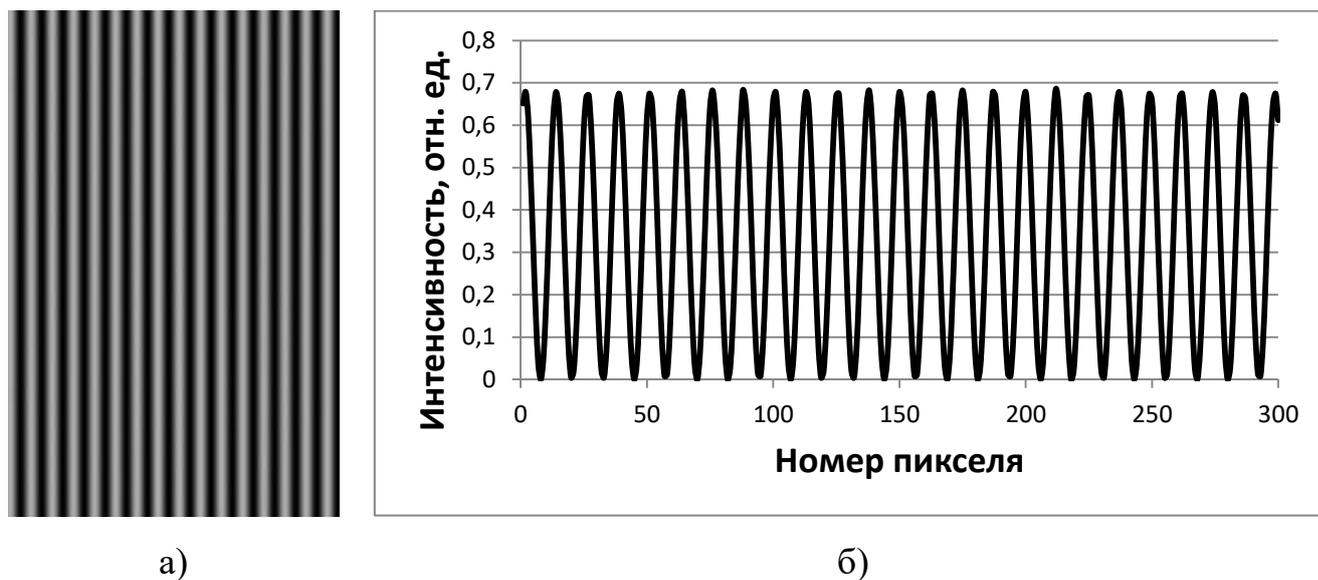
При моделировании обе волны проецировались непосредственно на матрицу. При этом опорная волна наклонена на определённый угол θ относительно предметной волны для задания пространственного фазового сдвига:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{p_M}\right), \quad (11)$$

где λ – длина волны лазера, p_M – период пространственного сдвига.

По данной формуле теоретически рассчитывается угол между опорной и предметной волной, который в реальном эксперименте устанавливается всегда с некоторой погрешностью. Влияние этой погрешности и определялось при моделировании.

В ходе моделирования регистрировались две картины: исходное состояние объекта (без воздействия) и его деформированное состояние. В отличие от предыдущих подходов к моделированию, на матрице не получается спекл картина, а наблюдается обычная интерференционная картина, период которой зависит от взаимного положения опорной и предметной волн. Пример получаемого изображения на рисунке 26.



а) картина, получаемая на матрице в результате моделирования, б) срез по оси X

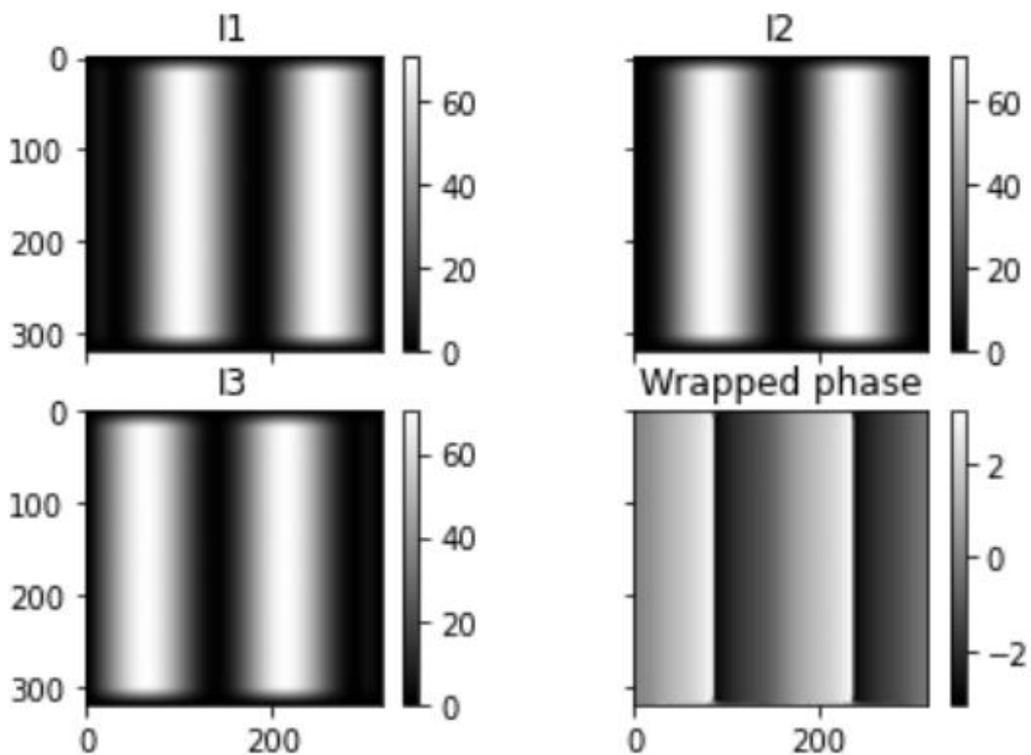
Рисунок 26 – Картина, получаемая на матрице в результате моделирования и срез с нее

Деформация моделировалась наклоном объектной волны. Затем производилась обработка спекл-интерферограмм: вычислялась фазовая картина, выполнялась программная сшивка фазы и она расшифровывалась в карту

деформаций. Было разработано программное обеспечение на языке Python для выполнения обработки изображений, интерферограмм, получения карт деформаций. Из полученной картины с помощью выражений 7-9 выполняем расчет фазовых картин I1, I2, I3, а затем рассчитываем модулированную фазу (Wrapped phase) рисунок 27.

На итоговой фазовой карте имеются разрывы фазы, которые проявляются как скачки на 2π (или кратные 2π). Необходимо устранить дискретные скачки или разрывы в фазе и сделать фазовый профиль непрерывным, например методом рекурсивного «разворачивания» фазы (unwrap phase) [23].

После выполнения процесса сшивки фазы устраняются разрывы и удается восстановить непрерывный фазовый профиль (рисунок 28), который можно будет использовать для дальнейшего анализа.



I1, I2, I3 – фазовые картины, Wrapped phase – модулированная фаза

Рисунок 27 – Вычисление значений I1, I2, I3, и итоговой фазы

Полученный непрерывный фазовый профиль необходимо преобразовать в карту деформаций. Для этого можно использовать численные методы (например, градиентные методы) для вычисления перемещений на основе фазового профиля.

Процесс включает в себя дифференцирование фазового профиля и преобразование в пространственные деформации [5].

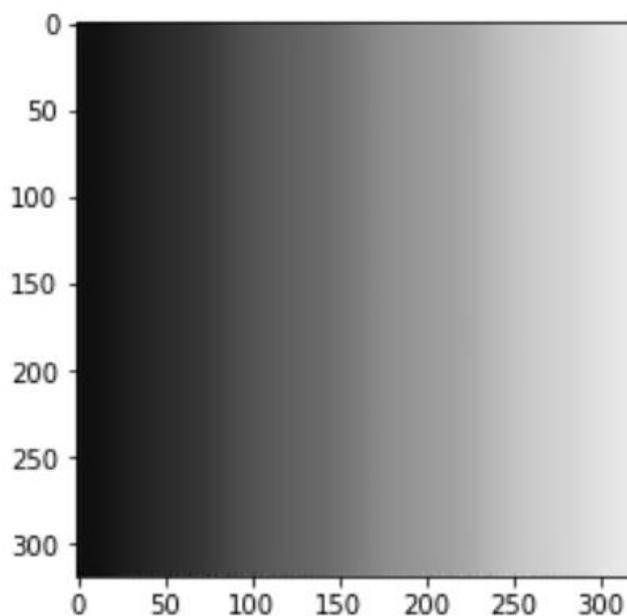


Рисунок 28 – Восстановленный фазовый профиль,
оси X, Y – номер пикселя

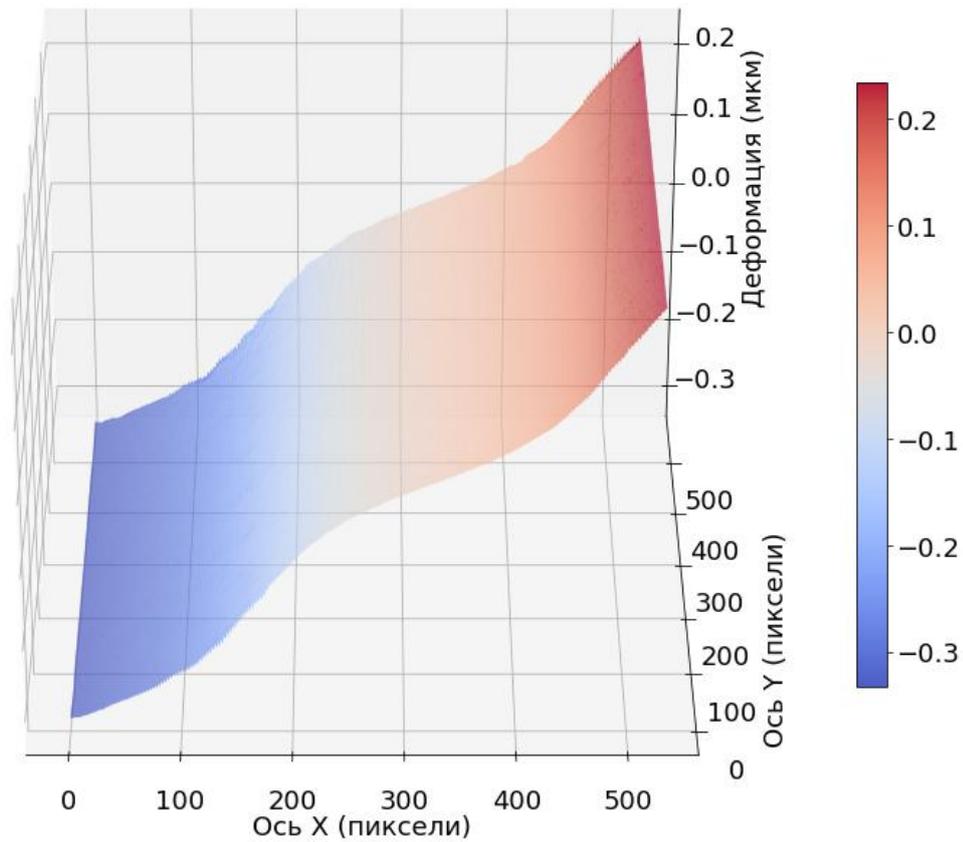
После расшифровки, с учетом длины волны:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta Z}{\lambda}, \quad (12)$$

где $\Delta\varphi$ – изменение фазы, ΔZ – изменение положения поверхности (деформация), λ — длина волны лазера

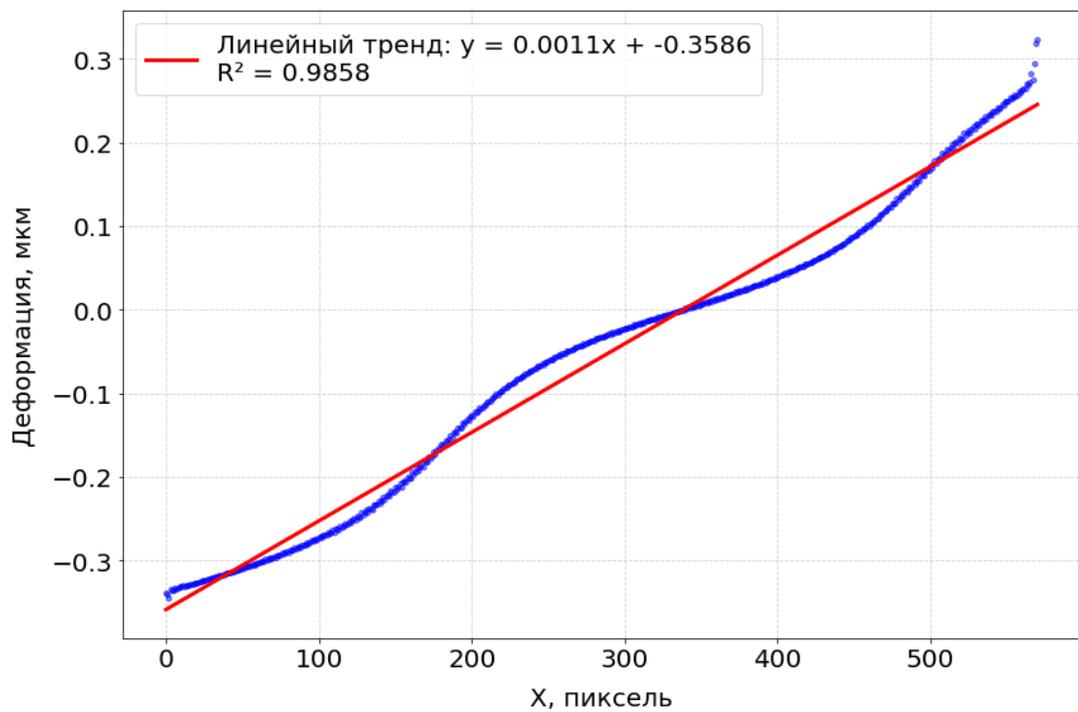
В результате получается карта деформаций (рисунок 29а).

При моделировании ожидалось, что после обработки получится строго линейный наклон на карте деформаций. Однако, если в модели оптической схемы спекл-интерферометра ошибочно задан пространственный фазовый сдвиг, то на карте деформаций появляется некоторая модуляция, приводящая к среднеквадратической ошибке измерений около 0,05 мкм ((рисунок 29 б).



Карта деформаций

а



Срез значений деформаций по оси Y

б

Рисунок 29 – Карта деформаций и срез с нее по оси Y

Величина модуляции зависит от ошибки задания угла наклона опорной волны относительно предметной. Формула расчета фазы (10) работает корректно, если p_M из формулы (11) равен ровно четырем пикселям. Либо можно использовать другие известные методы расчета фазы с произвольным фазовым сдвигом, но и в этом случае нужно точно знать его величину.

Поэтому при проектировании оптической схемы спекл-интерферометра необходимо было оценить ошибку задания пространственного фазового сдвига на всем изображении при разных размерах пикселей фотоприемной матрицы (взяты типичные размеры $p_M = 2, 3,5$ и 5 мкм, расчетный угол $\theta = 1,5^\circ, 2,2^\circ, 3,9^\circ$). В зависимости от величины удаления от расчетного угла наклона получили увеличение среднеквадратичного отклонения (СКО) от линейного тренда задаваемой деформации (рисунок 30).

Величина модуляции зависит от задаваемого угла наклона опорной волны относительно предметной, который вычисляется по формуле 13, и от того, насколько корректно этот угол учитывается при расшифровке фазовой картины в карту деформаций.

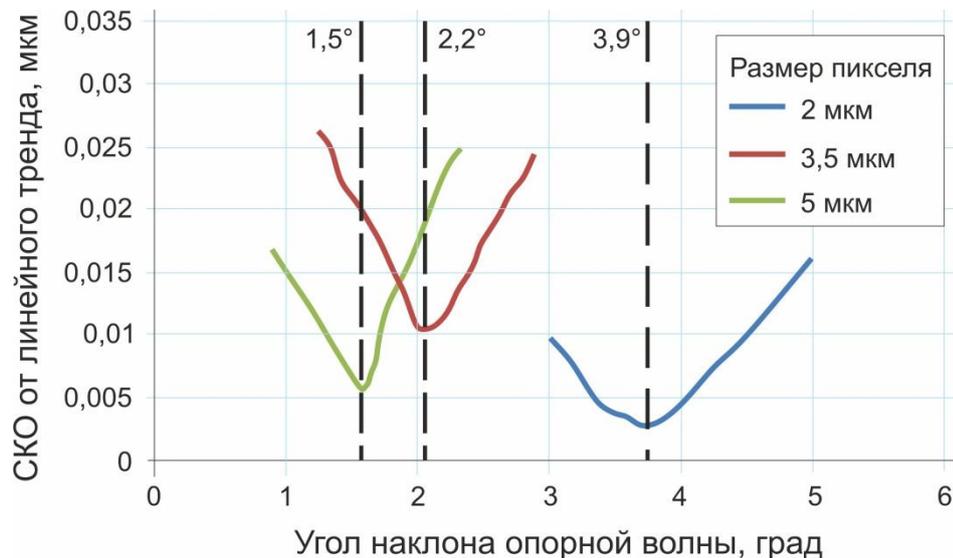


Рисунок 30 – Влияние точности задания пространственного фазового сдвига на ошибку измерения деформаций

В таблице 3 представлены значения чувствительности изменения угла, то есть вносимой погрешности измерений в зависимости от ошибки задания угла пространственного фазового сдвига опорной волны на 1 градус. В случае однократных измерений данная ошибка не имеет существенного влияния. При проведении многократных измерений (сутки, несколько тысяч интерферограмм) ошибка может накапливаться и оказывать существенное влияние на точность результатов.

Таблица 3 – Погрешность, полученная при моделировании разных размеров пикселей

Размер пикселя, мкм	Чувствительность к изменению угла, мкм/град
2	0,006
3,5	0,014
5	0,016

Из приведённых результатов видно, что с точки зрения минимизации ошибок восстановления фазы и удобства настройки оптической схемы целесообразно использовать камеры с меньшим размером пикселя. Но при этом такие фотоприёмники обладают меньшей чувствительностью и большими шумами.

В реальных же оптических системах предметные и опорные волны испытывают влияние оптических элементов объективов, формирующих изображение исследуемой поверхности, что также сказывается на ошибках измерения. При моделировании в схему спекл-интерферометра был введен проекционный объектив и повторно проведено исследование влияния ошибки установки наклона опорной волны на погрешность метода. Имеется два ранее рассчитанных объектива – Кольцо (рисунок 31) и КБК (рисунок 32) [10, 11].

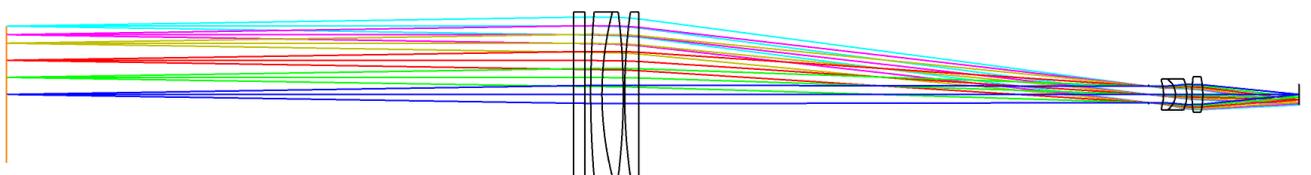


Рисунок 31 – Объектив Кольцо, оптическая схема

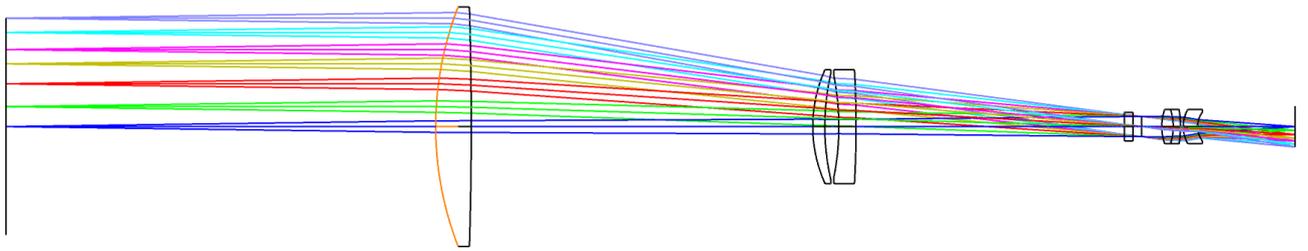
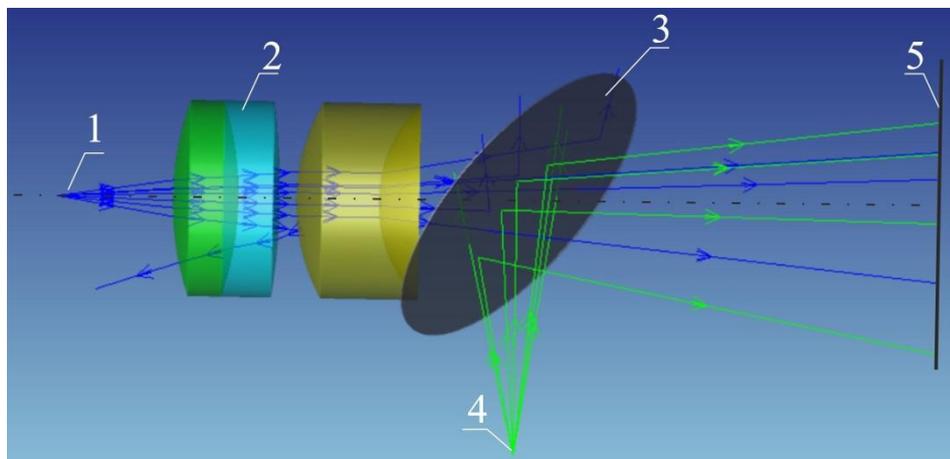


Рисунок 32 – Объектив КБК, оптическая схема

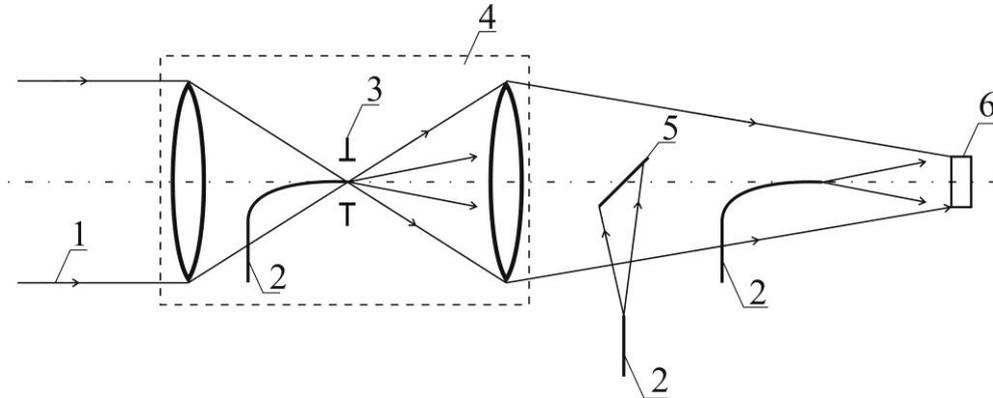
С помощью них мы моделируем проецирование изображения на матрицу спекл интерферометром. Для этого в плоскость апертурной диафрагмы объектива помещается точечный источник 1, который моделирует объектную волну, попадающую на матрицу 5 через объектив 2 (показана задняя часть объектива, после апертурной диафрагмы). Такой подход при моделировании предметной волны имеет физический смысл, так как в этом случае моделируется прохождение главных лучей, распространяющихся близко к энергетическому центру пучков, формирующих изображение объекта. Опорная волна 4 (например, торец оптоволокна) направляется на матрицу 5 с помощью полупрозрачного зеркала 3. (рисунок 33).



1 – объектная волна, расположенная в плоскости апертурной диафрагмы, 2 – объектив, 3 – полупрозрачное зеркало, 4 – опорная волна, 5 – матрица
Рисунок 33 – Математическая модель спекл-интерферометра с объективом

Наклон опорной волны, определяющий угол между интерферирующими волнами, может регулироваться различными методами введения излучения в

схему (рисунок 34). Выбор конкретного способа (через рассеяние в объективе, перед полупрозрачным элементом или в плоскости диафрагмы) зависит от требований эксперимента и параметров оптической системы.



1 – излучение от объекта, 2 – точечный источник (торец оптоволокна), 3 – апертурная диафрагма, 4 – объектив, 5 – полупрозрачное зеркало, 6 – матрица.

Рисунок 34 – Способы введения опорного излучения в оптическую схему спекл-интерферометра

В результате моделирования получаем СКО величины деформации от линейного тренда в зависимости от угла наклона опорной волны относительно предметной для двух объективов: 0,74 мкм для объектива КБК и 0,07 мкм для объектива Кольцо. Нетелецентричность объективов при этом $5,2^\circ$ и $1,3^\circ$ соответственно. Основной вклад в погрешность вносит то, что оба объектива имеют существенную нетелецентричность в пространстве изображений ($5,2^\circ$ и $1,3^\circ$ соответственно). Таким образом получается, что в центре изображения выполняется условие для фазового сдвига, а на периферии уже имеется существенное расхождение и оно тем меньше, чем выше телецентричность объектива в пространстве изображений.

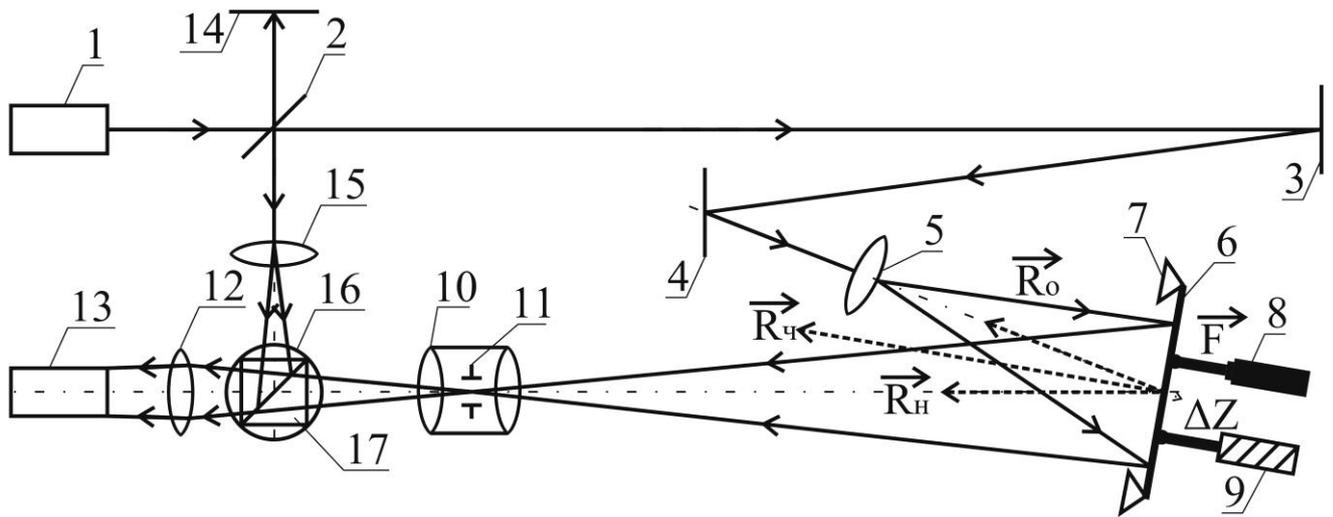
2.2 Разработка стенда на основе метода спекл-интерферометрии

Для проверки результатов моделирования собран лабораторный стенд спекл-интерферометра на основе метода пространственного фазового сдвига

(рисунок 35). Излучение лазера 1 попадает на светоделительную пластину 2, которая разделяет пучок на опорный и предметный. Предметный пучок с помощью зеркал 3, 4 и микрообъектива 5 направляется на объект 6, рассеянное излучение от которого направляется на цифровую матрицу 13 проекционным объективом 10. Опорный пучок направляется непосредственно на цифровую матрицу с помощью объективов 12, 15. Совмещение пучков осуществляется с помощью светоделительного кубика 16. Получаемое на матрице изображение передается в компьютер для последующего анализа.

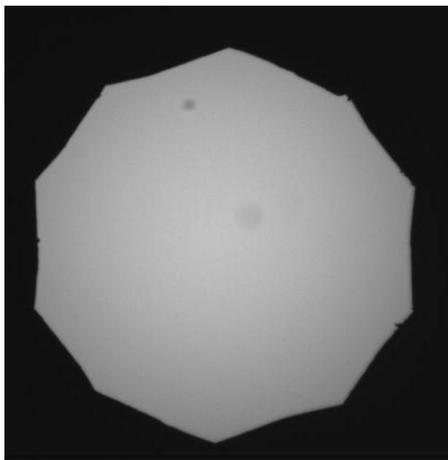
Деформация регистрируется в направлении разности вектора освещения \vec{R}_0 и вектора наблюдения \vec{R}_H , которая образует вектор чувствительности интерферометра $\vec{R}_\text{ч}$. В схеме он совмещен с вектором чувствительности преобразователем линейных перемещений (далее – ЛИР), погрешность $\pm 0,5$ мкм. На рисунке 38 с интерференционными полосами красным крестом обозначено место, к которому прилагалась нагрузка, а желтым – место измерения ЛИР. Показания ЛИР (инкрементный преобразователь линейных перемещений ЛИР-15, производство СКБ ИС) $\Delta Z_{\text{лир}}$ сравнивается со значением из карты деформаций, полученной спекл-интерферометром $\Delta Z_{\text{СИ}}$.

Для создания пространственного фазового сдвига необходимо предварительно совместить опорный и предметный пучки, после чего смещать опорный пучок, тем самым получится заданный фазовый сдвиг. Для удобства юстировки в схему введен объектив 12, который переносит изображение из выходного зрачка объектива 10 на цифровую матрицу 13. При этом диафрагма 11 и ее изображение располагаются в точке $2F$ объектива 12, что позволяет наблюдать ее без увеличения. Так реализуется падение предметного пучка на цифровую матрицу под прямым углом. При этом на матрице видно изображение диафрагмы 11 объектива 10. Путем расположения изображения опорного пучка по центру изображения диафрагмы (рисунок 36 а), реализуется совмещение опорной и предметной волн (рисунок 36 б) Наклон опорной волны при этом создается поворотной платформой 17.

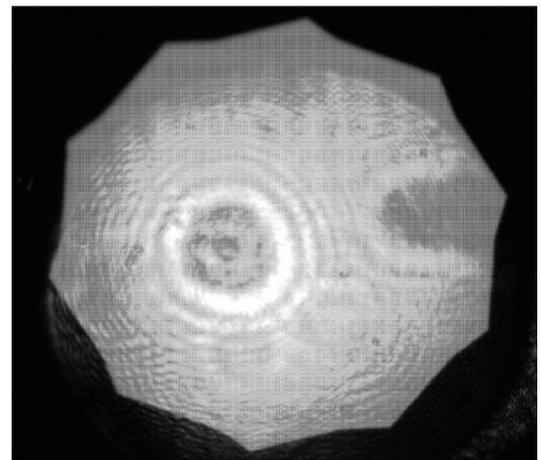


- 1 – лазер; 2 – светоделительная пластина; 3, 4, 14 – плоское зеркало;
 5, 12, 15 – микрообъектив; 6 – объект; 7 – крепление объекта; 8 – актуатор;
 9 – инкрементный преобразователь линейных перемещений ЛИР-15;
 10 – длиннофокусный объектив; 11 – диафрагма; 13 – цифровая матрица;
 16 – светоделительный кубик; 17 – поворотная платформа.

Рисунок 35 – Схема лабораторного стенда для исследования метода пространственного фазового сдвига



а)



б)

- а – изображение диафрагмы в белом свете, б – изображение диафрагмы при освещении лазерным излучением

Рисунок 36 – Изображение диафрагмы на цифровой матрице

В процессе совмещения на матрице опорного и предметного пучков произведена оценка соотношения их мощностей. Полученная информация позволит надежнее выполнить проектировку экспериментального стенда. Так выходящее из лазера излучение имеет мощность 67 мВт, оно делится на предметное плечо 64 мВт и опорное 20 нВт. То есть в опорном плече должно быть в 10^{-6} мощности меньше.

После выполнения процедуры сопряжения была выполнена регистрация спекл-картин (пример на рисунке 37), при небольшой деформации объекта между ними. Для получения численного значения деформации они должны быть попиксельно вычтены. Результат их вычитания в виде интерференционных полос представлен на рисунке 38.

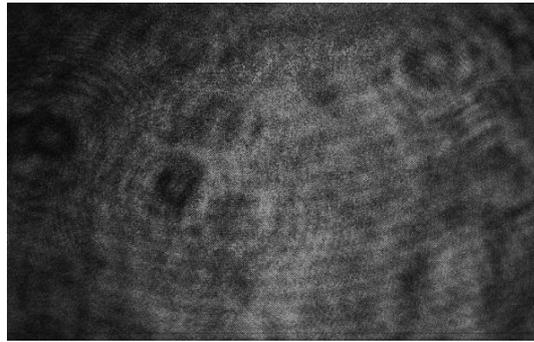
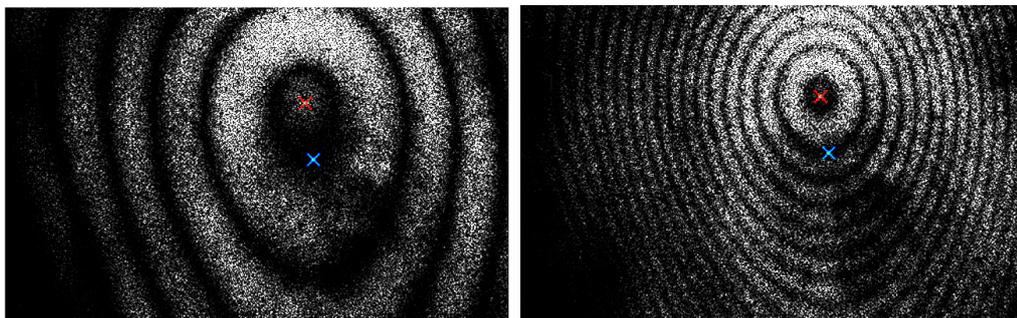


Рисунок 37 – Пример получаемой на матрице спекл-картины



а)

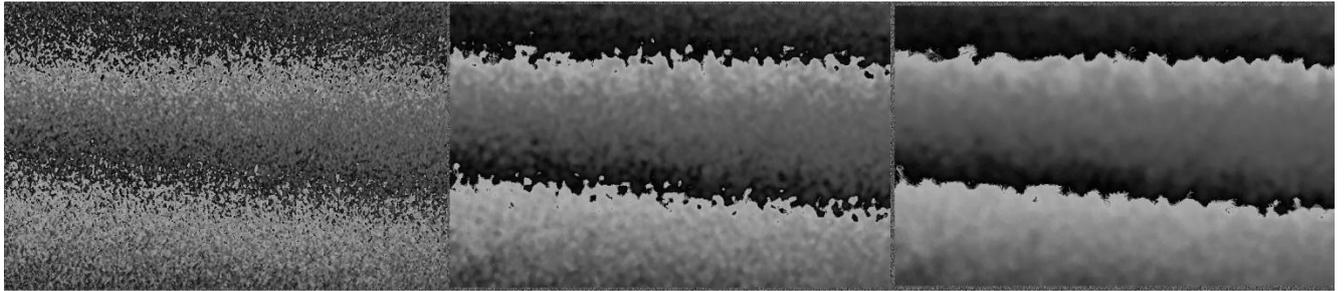
б)

а) деформация ~ 1 мкм, б) деформация ~ 6 мкм

красный крест – место приложения нагрузки, синий крест – место измерения
контрольным средством измерения

Рисунок 38 – Изображения интерференционных полос

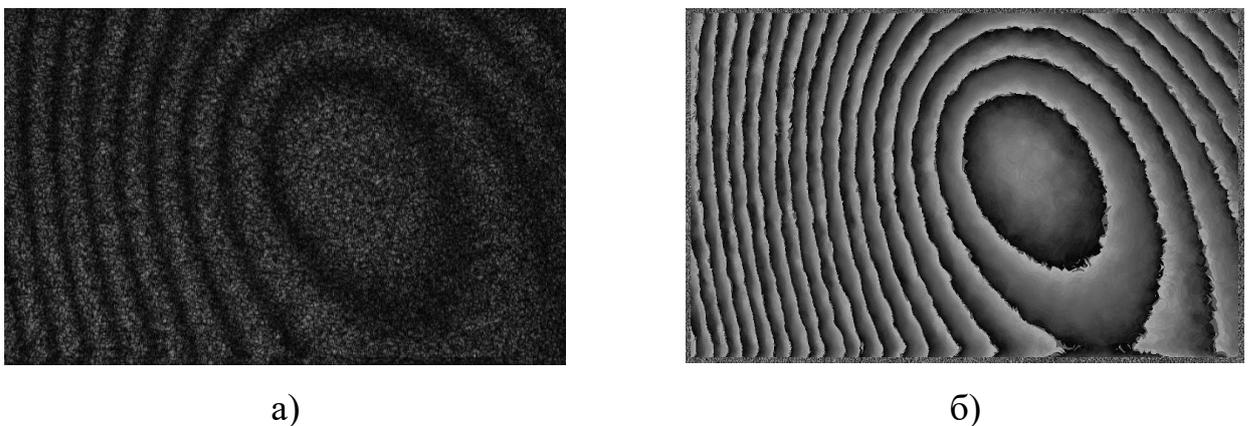
Из полученной интерференционной картины есть возможность получения величины деформации. На первоначальном этапе необходимо сгладить полосы медианным фильтром и фильтром нижних частот. Проведены эксперименты с разными радиусами обработки фильтрами, примеры изображения пары полос, получаемых при разных радиусах фильтров, приведены на рисунке 39.



Радиус фильтра 1 пиксель Радиус фильтра 4 пикселя Радиус фильтра 7 пикселей

Рисунок 39 – Обработка интерференционной картины медианным фильтром и фильтром нижних частот различного радиуса

Выбран радиус фильтра 7 пикселей, так как при нем наблюдается более гладкая граница разделения полос и невысокий уровень спекл-шумов. Вся интерференционная картина после обработки фильтром такого радиуса представлена на рисунке 40.



а) картина до обработки, б) картина после обработки

Рисунок 40 – Интерференционная картина после обработки медианным фильтром и фильтром нижних частот радиусом 7 пикселей

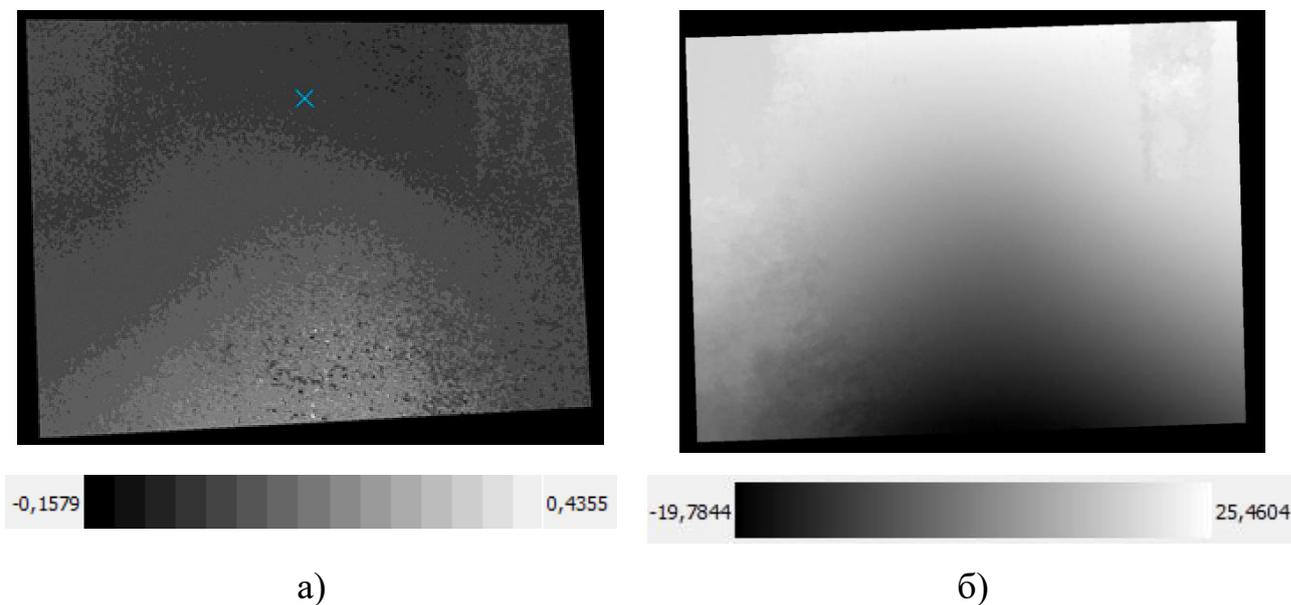
2.3 Экспериментальное исследование спекл-интерферометра на основе метода пространственного фазового сдвига

Величина деформации, которая может быть получена с помощью одного кадра, ограничивается количеством полос, которые могут быть различены на изображении, и равна значению 5 мкм. Для получения суммарной деформации более 5 мкм необходимо зарегистрировать несколько кадров, которые затем попиксельно сложить. Для исследования был выбран диапазон суммарной деформации 50 мкм, который соответствует величине деформации реальных объектов измерения. Для получения суммарной деформации такой величины необходимо зарегистрировать порядка 10 кадров. На рисунке 38а красным крестом обозначено место, к которому прилагалась нагрузка, синим – место измерения инкрементным преобразователем линейных перемещений ЛИР-15, производство СКБ ИС (ЛИР). Это значение с ЛИР сравнивается со значением из карты деформаций, полученной спекл-интерферометром. На рисунке 38б представлено изображение, которое получено при деформации объекта 6 мкм между двумя последовательными кадрами.

Ниже представлены полученные карты деформаций и размерные шкалы к ним: единичного измерения (рисунок 41а) и суммарного за несколько десятков кадров (рисунок 41б).

Для исследования метода пространственного фазового сдвига в схеме на рисунке 35 при помощи актуатора 8 измеряемый объект 6 в автоматическом режиме пошагово деформировался на установленную величину. Выполнялся анализ точности установки угла наклона опорной волны. Для этого светоделительный кубик 16 последовательно поворачивался с помощью поворотной платформы 17 на величины 0-5° с шагом 1°. Регистрировались спекл-картины, которые затем расшифровывались в карты деформаций. На карте деформаций выбиралось значение, соответствующее положению ЛИР, и сравнивалось с зарегистрированным показанием. При значениях угла наклона

$3^\circ < \theta < 5^\circ$ наблюдалась разница показаний больше 1 мкм. Полученные значения приведены в таблице 4.

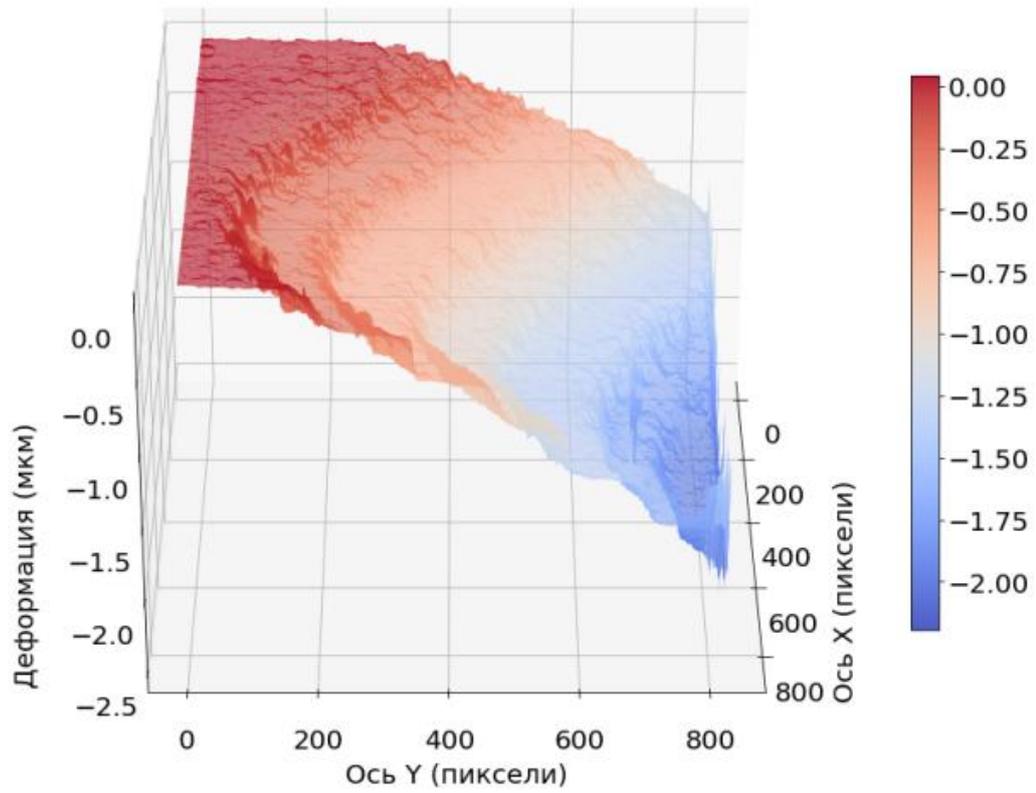


а) единичное измерение, б) измерение, суммарное за 25 кадров

Рисунок 41 – Карты деформаций

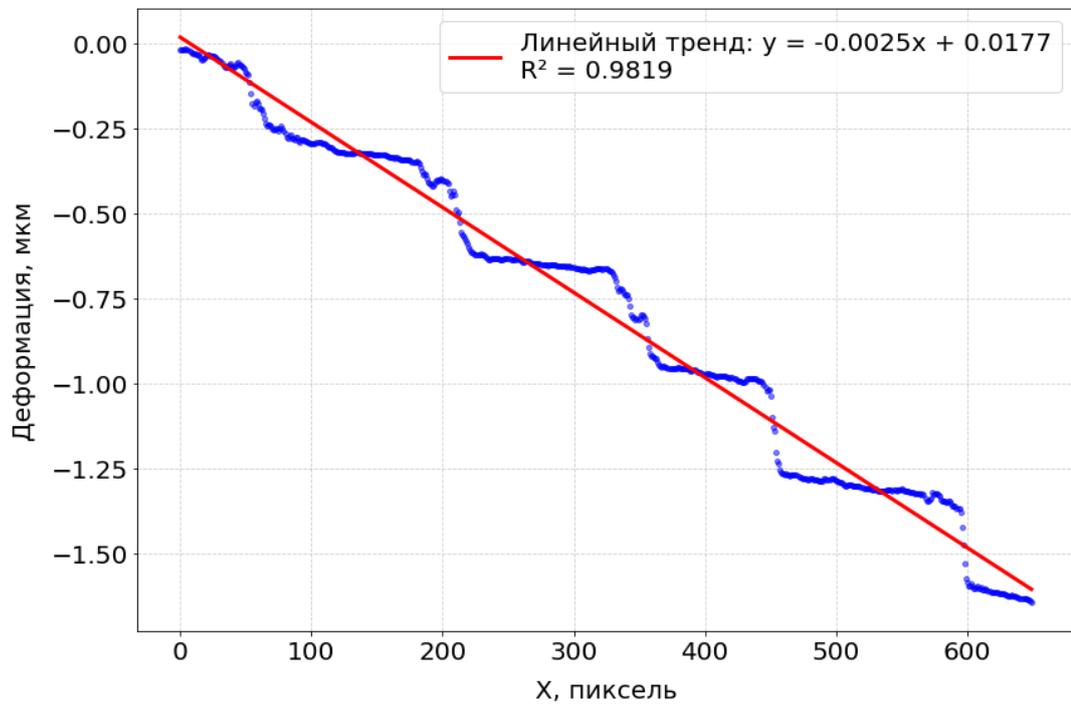
Таблица 4 Сравнение полученных значений с карты деформаций со значениями ЛИР

Угол между опорным и предметным излучениями, °	Значения, измеренные ЛИР, мкм	Значение, полученное спекл-интерферометром, мкм	Разница значений, мкм
0	18,04	2,15	15,88
1	21,21	-1,41	22,62
2	23,19	16,65	6,55
3	23,19	23,72	-0,52
4	23,39	22,92	0,47
5	23,39	17,65	5,74



Карта деформаций

а



Срез значений деформаций по оси X

б

Рисунок 42 – Карта деформаций, полученная на стенде и срез с нее по оси X

Эта разница обусловлена величиной ошибки, возникающей в каждом кадре. Проведя исследования срезов, аналогичные проведенным в моделировании, получаем модуляцию относительно линейного тренда (рисунок 42б). Так, при расчетном наклоне опорной волны $3,5^\circ$ мы физически задали наклон 1° . Получаем ошибку определения деформации $0,4$ мкм в 1 измерении.

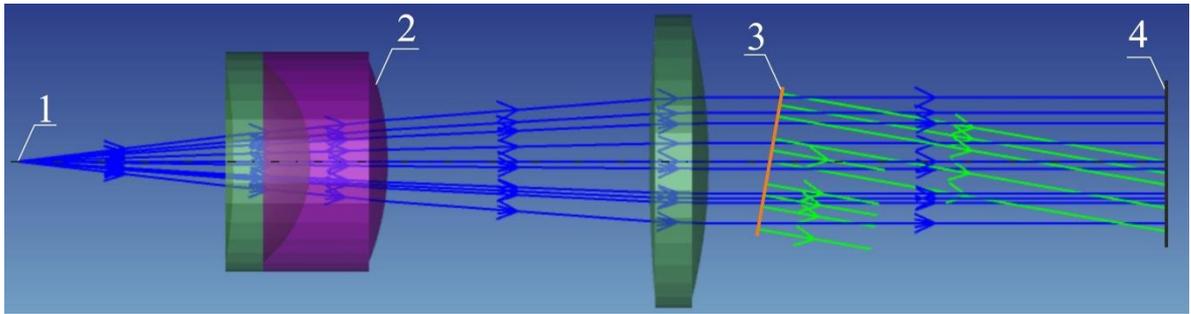
Видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными значениями, совпадает характер графиков и возникает модуляция при ошибочно установленном угле пространственного фазового сдвига. Поэтому при дальнейшей разработке спекл-интерферометра было решено разработать оптимальный вариант оптической схемы, в которой устранены возникающие ошибки восстановления волнового фронта за счет создания параллельного хода лучей в приемной части объектива.

2.4 Расчет оптической системы с телецентрическим ходом лучей в пространстве изображений

Так как при приближении к параллельному ходу лучей ошибка уменьшается, предложено устранить ее за счет создания параллельного хода лучей в пространстве изображений объектива.

Для этого был рассчитан телецентрический в пространстве изображений объектив, который использован в математической модели спекл-интерферометра (рисунок 43).

В плоскость апертурной диафрагмы телецентрического объектива 2 помещался точечный источник 1, который моделирует объектную волну. Опорная волна выбрана плоской и расположена между последней линзой и фотоприёмной матрицей (например, коллимированное излучение заводится с помощью пленочного светоделиителя или полупрозрачного кубика). Пространственный фазовый сдвиг задаётся наклоном этой волны.



1 – объектная волна, расположенная в плоскости апертурной диафрагмы, 2 – приемная часть телецентрического объектива, 3 – опорная волна, 4 – матрица

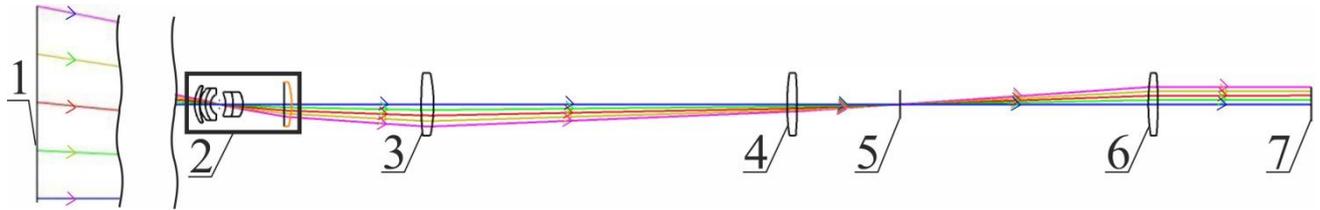
Рисунок 43 – Телецентрический объектив в математической модели спекл-интерферометра

В результате моделирования с телецентрическим объективом получена величина СКО погрешности измерения деформации предмета 0,02 мкм, что лишь немного превышает значение при моделировании без объективов. Это подтверждает предположение о том, что высокая телецентричность в пространстве изображений способствует снижению значений ошибки волнового фронта по всему изображению.

Поэтому, для работы спекл-интерферометра с большими объектами рассчитали систему с телецентрическим ходом лучей (не менее $0,05^\circ$) в пространстве изображений (рисунок 44). В ней объект 1 имеет размер 1 м. Проекционным объективом 2 излучение от объекта собирается, коллективной линзой 3 и оборачивающей системой линз 4 и 6 переносится на цифровую матрицу 7. Такая конфигурация позволяет сделать систему компактной (диаметр линз не превышает 40 мм), и в то же время остается пространство для размещения опорного излучения в перетяжке 5, которая оптически сопряжена с апертурной диафрагмой объектива 2.

В результате моделирования и экспериментальных исследований спекл-интерферометра с пространственным фазовым сдвигом получены величины ошибок при разных значениях телецентричности в пространстве предметов. Заключение, что при проектировании систем на основе метода спекл-интерферометрии, требующих регистрации большого числа кадров (несколько

тысяч), рекомендуется использовать объективы с высокой телецентричностью в пространстве изображений (не менее $0,05^\circ$). Пример подобной системы спроектирован и заложен в основу дальнейших исследований.



1 – объект, 2 – проекционный объектив, 3 – коллективная линза, 4 – двояковыпуклая линза, 5 – перетяжка, 6 – двояковыпуклая линза, 7 – цифровая матрица

Рисунок 44 – Оптическая система регистрации объекта размером 1 м и с телецентрическим ходом лучей в пространстве изображений

2.5 Энергетический расчет спекл-интерферометра

В разделе 2.2 экспериментально определены соотношения мощностей опорного и предметного пучков. В данном разделе приведены теоретические расчёты, позволяющие определить требуемую мощность лазера для измерения объекта соответствующего размера и при использовании определенной матрицы. Приведенные ниже шаги и формулы позволяют оценить параметры, такие как количество фотонов, которые будут захвачены матрицей.

Вначале определим яркость объекта V . Имеем размер объекта 1 м, стандартный средний размер рефлектора или панели составного зеркала. Учитывая широкое угловое рассеяние $\gamma = \frac{\pi}{2}$, предполагаем необходимость использования источника мощностью $P=1$ Вт. Расстояние до объекта составляет $a = \frac{f}{\beta} = 3,5$ м, где $\beta = \frac{d}{D} = 0,01$ линейное увеличение, $f = 35$ см – фокусное расстояние объектива. Можно рассчитать его телесный угол:

$$\Omega = 2\pi * (1 - \cos(\gamma)) \quad (13)$$

С учётом углового рассеяния вычисляется яркость объекта:

$$B = \frac{P}{D^2 * \Omega} = 0,1 \text{ Вт/м}^2 \quad (14)$$

Далее необходимо определить освещённость матрицы, которая определяется с учётом коэффициента пропускания оптики $\tau=0,8$, яркости объекта B , углового размера апертуры α , линейного увеличения β и относительного отверстия O . Используем формулу для определения освещённости, создаваемой проекционной системой на изображении:

$$E = \pi * \tau * B * \left(\frac{\sin(\alpha)}{\beta} \right)^2, \quad (15)$$

где $\alpha = \arctan\left(\frac{f * O}{2 * a}\right) = 6,25 \times 10^{-4}$ рад, передний апертурный угол.

Освещённость матрицы получается равной $5,62 \times 10^{-2}$ Вт/м².

Энергия, попадающая на один пиксель матрицы, определяется выражением:

$$Q_{\text{pix}} = E * t * p^2, \quad (16)$$

где $t=10$ мкс – время экспозиции, $p=5$ мкм – размер пикселя.

Энергия на 1 пиксель матрицы получается равной $3,906 \times 10^{-14}$ Дж.

Для вычисления количества фотонов, попадающих на один пиксель, нужно использовать энергию одного фотона Q_f , которая рассчитывается через длину волны $\lambda=0,532 \times 10^{-6}$ м, физическую константу Планка $h=6,626 \times 10^{-34}$ Дж×с, а также скорость света $c=3 \times 10^8$ м/с:

$$Q_f = \frac{h * c}{\lambda} = 3,73 \times 10^{-19} \text{ Дж} \quad (17)$$

Теперь, зная энергию на пиксель Q_{pix} и энергию одного фотона Q_f , можем вычислить количество фотонов, попадающих на один пиксель:

$$N = \frac{Q_{\text{pix}}}{Q_f} = 1,045 * 10^4 \quad (18)$$

Количество фотонов на одном пикселе составляет $1,045 \times 10^4$. Типичный показатель чувствительных sCMOS матриц (например, PCO edge 5.5) составляет 15–30 тысяч фотонов. Это позволяет утверждать, что в рассеянном объектом излучении камерой будет возможно зарегистрировать изображение.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

В главе 2 выполнено моделирование оптической схемы спекл-интерферометра в программном пакете для расчета и проектирования оптических систем Zemax OpticStudio. Было исследовано несколько подходов к моделированию, определены ограничения ПО (программное обеспечение) Zemax OpticStudio для моделирования спекл-интерферометра. Определена ошибка единичного измерения спекл-интерферометра при использовании рассчитанных объективов. Доказана необходимость использования телецентрических объективов для выполнения многократных измерений.

Разработан экспериментальный подход для проведения исследований погрешностей при формировании заданного пространственного фазового сдвига. Показана необходимость размещения в стенде поворотной платформы для создания фазового сдвига и дополнительного объектива для его контроля. На основе разработанного подхода создан стенд. В испытаниях на нем создавалась деформация поверхности пластины, которая измерялась созданным спекл-интерферометром с одной стороны и контрольным средством измерения (ЛИР) с другой стороны.

На созданном стенде проведены экспериментальные исследования. Получены спекл-картины и интерференционные полосы как результат программного вычитания двух спекл-картин. Вычитание изображений, расшифровка фазовой картины и визуализация карты деформаций выполнялась в разработанном на языке программирования Python ПО.

Получена разность показаний спекл-интерферометра и контрольного средства измерения. Контрольное средство измерения регистрировало данные в одной точке, поэтому для сравнения с карты деформаций выбиралась та же самая точка. Получено, что разность показаний спекл-интерферометра и ЛИР не превышала 1 мкм при точности задания сдвига 1° и соответствует значению $3-4^\circ$.

Заключено, что при проектировании систем на основе метода спекл-интерферометрии, требующих регистрации большого числа кадров (несколько

тысяч), рекомендуется использовать объективы с высокой телецентричностью в пространстве изображений (не менее $0,05^\circ$). Пример подобной системы спроектирован и заложен в основу дальнейших исследований.

Выполнен энергетический расчет спекл-интерферометра, позволяющий оценить количество фотонов, которые будут захвачены матрицей, а также их распределение по пикселям.

ГЛАВА 3 СОЗДАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА БАЗЕ ТЕРМОВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

Исследование формы поверхности объектов при воздействии экстремальных условий имитируется в термовакуумной камере. Испытываемый образец в процессе испытаний должен находиться непосредственно в камере. Спекл-интерферометр располагается снаружи и выполняется контроль через оптический иллюминатор. В данной главе описывается измерительный комплекс (система измерения деформаций (термодеформаций) поверхностей), который спроектирован для работы в таких условиях.

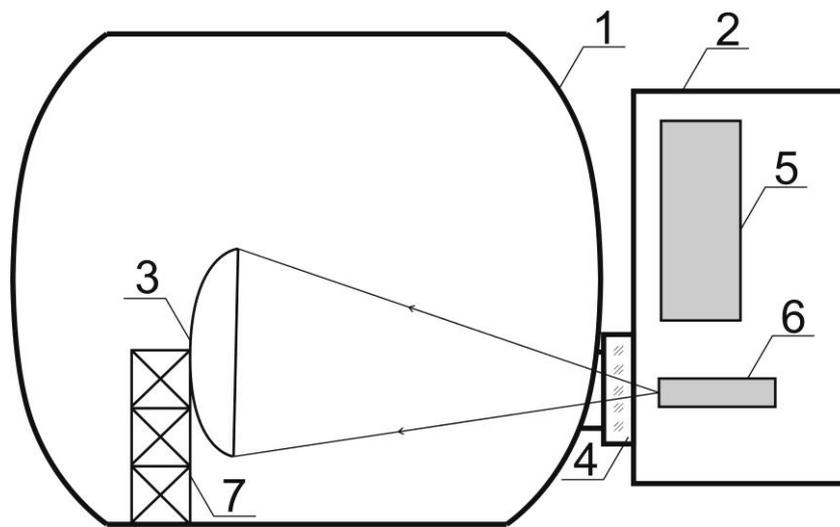
3.1 Измерительный комплекс для определения деформаций поверхностей на базе термовакуумной камеры

Для измерения деформаций с использованием термовакуумной камеры (на территории предприятия Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва») разработан измерительный комплекс для определения деформаций (термодеформаций) поверхностей (измерительный комплекс), позиция 2 на рисунке 45, размещается около термовакуумной камеры 1. Данная термовакуумная камера способна создавать внутри себя средний-высокий вакуум, а для охлаждения внутреннего объема использует жидкий азот. Контролируемые объекты 3, в качестве которых используются части космических аппаратов (КА), например рефлектор, располагаются внутри вакуумной камеры. Оптическое излучение для освещения объекта от лазера спекл-интерферометра 5 попадает внутрь камеры через иллюминатор 4. Рассеянное излучение регистрируется цифровой камерой 6.

Выполнение подобных измерений имеет высокую сложность, необходимо обеспечить попадание лазерного излучения внутрь термовакуумной камеры, где расположен объект, контролировать и поддерживать климатические условия

вокруг спекл-интерферометра, регистрировать уровень вибраций на измерительном комплексе. Поэтому в его составе предусмотрено наличие следующих компонентов:

- спекл-интерферометр (производство Carl Zeiss Optotechnik GmbH, Германия);
- оптический иллюминатор;
- устройство для поддержания заданных климатических условий вокруг измерительного средства;
- датчиковая аппаратура;
- устройство измерения виброперемещений измеряемого объекта;
- информационная система.



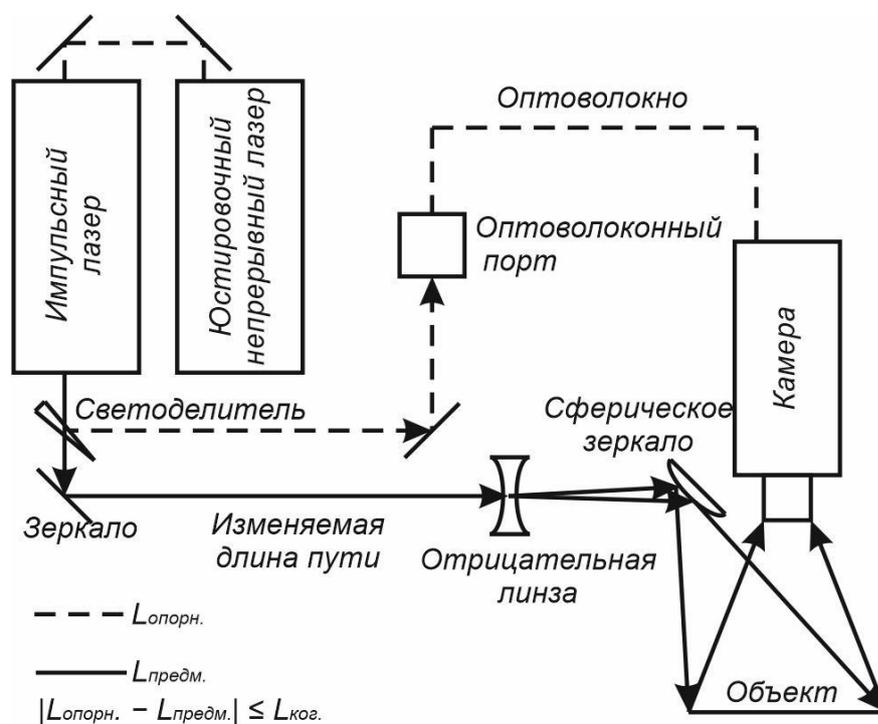
1 – термовакуумная камера, 2 – измерительный комплекс, 3 – контролируемый объект, 4 – иллюминатор, 5 – лазер, 6 – цифровая камера, 7 – крепление объекта

Рисунок 45 – Схематичное расположение измерительного комплекса около термовакуумной камеры

Основное средство измерения – спекл-интерферометр (оптическая схема на рисунке 46) на основе метода пространственного фазового сдвига. В качестве

источника излучения используется импульсный рубиновый лазер (энергия в импульсе 1 Дж, длительность импульса 20 нс, длина когерентности 1 м, длина волны 694 нм). Импульсный лазер позволяет выполнять мгновенную регистрацию объекта, что обеспечивает в условиях вибраций (насосы термовакuumной камеры) или подвижности объекта корректно выполнять измерения. Настройка спекл-интерферометра выполняется при помощи постоянного, низко мощного лазера, оптический путь которого совмещен с оптическим трактом импульсного лазера.

Излучение рубинового лазера пространственно разделяется на опорный и предметный пучки на выходе из оптического тракта. Излучение опорного плеча направляется на цифровую камеру с помощью одномодового оптоволокна, оптическая длина которого подбирается в соответствии с длиной оптического пути объектного плеча – $|L_{\text{опорн.}} - L_{\text{предм.}}| \leq L_{\text{ког.}}$ – разность путей не превышает длину когерентности. Предметный пучок проецируется на исследуемый объект с помощью зеркал (плоских, сферических) и отрицательных линз; таким образом освещается вся контролируемая поверхность рефлектора.

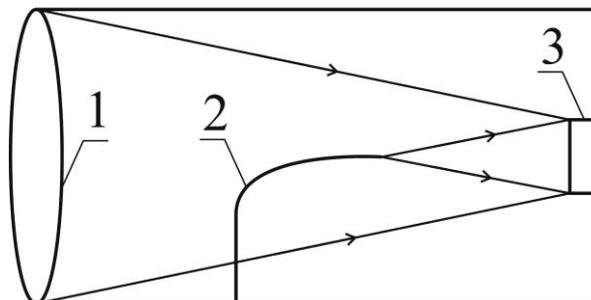


$L_{\text{опорн.}}$ – оптическая длина пути опорного плеча,

$L_{\text{предм.}}$ – оптическая длина пути предметного плеча, $L_{\text{ког.}}$ – длина когерентности

Рисунок 46 – Оптическая схема спекл-интерферометра

Пространственный фазовый сдвиг выполнен с помощью наклона опорного плеча, которое попадает на цифровую матрицу с помощью оптического волокна. На рисунке 47 на цифровую матрицу 1 с помощью линзы 3 проецируется излучение объектного пучка. Оптическое волокно 2, которое расположено в рассеянном пучке линзы 3, проецирует на матрицу излучение опорного плеча под заданным углом.



1 – линза, 2 – оптическое волокно, 3 – цифровая матрица

Рисунок 47 – Способ проецирования опорного плеча на матрицу в измерительном комплексе

Программное обеспечение спекл-интерферометра позволяет в автоматическом режиме сохранять все получаемые изображения (выполнено тестирование на около 10000 измерений). Необходимо выполнить предварительную настройку спекл-интерферометра, которая заключается в выборе маски, надежности расшифровки и величины автоматического контраста, а также в расстановке точек для вычитания перемещения объекта как твердого целого.

Маска применяется для исключения из расшифровки областей на изображении, не подлежащих измерению. Так, рефлекторы, форма которых преимущественно круглая, на квадратной матрице занимают лишь часть области.

В зависимости от условий испытаний, измеряемого объекта и качества настройки могут быть зарегистрированы изображения с высоким уровнем шума.

В этом случае необходимо устанавливать высокий уровень надежности расшифровки. Он требует больших вычислительных мощностей, но обеспечивает лучший результат в случае зашумленных измерений. При обработке измерений с низким уровнем шума нет необходимости устанавливать высокий уровень надежности, так как в этом случае могут быть получены некорректные результаты расшифровки вследствие пропуска полосы или появления дополнительных (паразитных) полос.

Финальным этапом подготовки является расстановка точек для вычитания перемещения объекта как твердого целого. В процессе измерений объект может перемещаться и наклоняться без деформаций (за счет деформаций внешних элементов крепления объекта в камере), при этом спекл-интерферометр будет регистрировать эти перемещения. Тем самым будет регистрироваться деформация, которой на самом деле не существовало. Для работы функции вычитания на измеряемой поверхности необходимо расположить 3 точки, через которые будет строиться базовая плоскость.

Для ввода/вывода лазерного излучения во внутренний объем камеры используется оптический иллюминатор. Иллюминатор в виде круглой пластины толщиной 60 мм и диаметром 250 мм выполнен из плавленного кварца КИ ГОСТ 15130-86, поскольку данный материал имеет высокую однородность (в таком объеме стекла практически нет дефектов – свилей, пузырей и иных включений), обладает высокой устойчивостью к температуре и прочностью, выдерживая создаваемые внутри климатические условия и обеспечивая безопасную работу вакуумной камеры. Выбранный диаметр окна иллюминатора позволяет видеть всю поверхность объекта измерения во всем диапазоне расстояний. На оптическую часть иллюминатора с двух сторон нанесено просветляющее покрытие для длины волны рубинового лазера 694 нм.

Кроме того, при измерениях через иллюминатор не требуется предварительной калибровки средства измерения. Регистрируемые изображения содержат как информацию о состоянии объекта, так и информацию об искажении

картины иллюминатором. В результате их вычитания удастся исключить влияние иллюминатора на итоговую деформацию.

Произведен расчет иллюминаторного блока при моделировании разного вида деформаций конструкции в программном пакете Zemax OpticStudio [71]. Результаты математического моделирования представлены на рисунке 48. При откачивании атмосферы из объема ВУ стекло толщиной 60 мм при этом искривляется на 1 мкм.

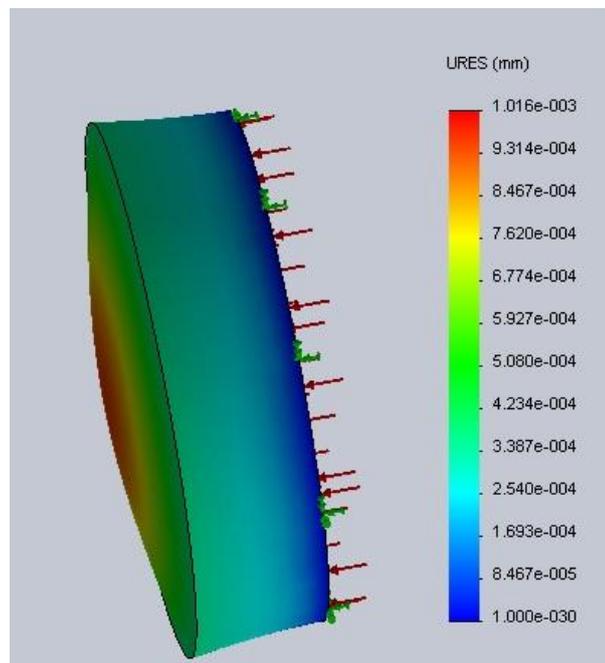


Рисунок 48 – Деформация стекла иллюминаторного блока

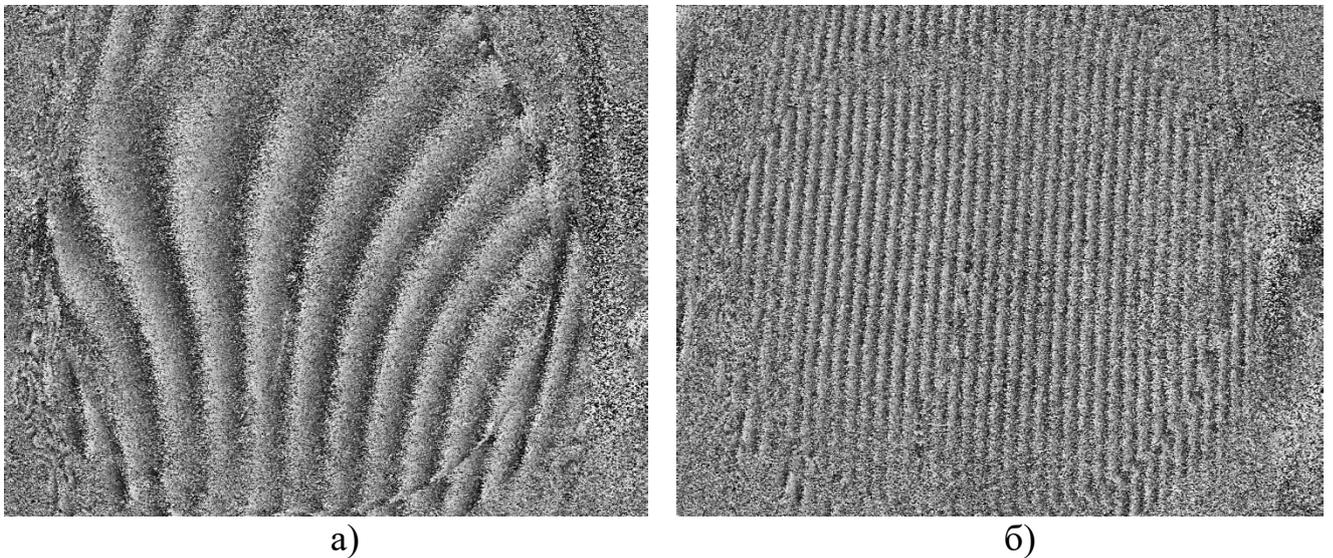
Для предотвращения возникновения существенного градиента температур и конденсации влаги (при отрицательных температурах внутри вакуумной камеры) в конструкцию иллюминатора заложено использование саморегулирующегося греющего кабеля, что не позволяет температуре опуститься ниже заданного оператором порога. В случае нагревания объектов охлаждать иллюминатор нет необходимости, так как нагревание объекта происходит локально с помощью инфракрасных ламп и не оказывает существенного влияния на иллюминатор.

Другой особенностью эксплуатации измерительной системы с использованием термовакуумных камер относятся сложные условия проведения измерений. Вокруг термовакуумных камер устанавливаются насосы для создания вакуума внутри самой камеры. Работа насосов вызывает вибрацию, которая оказывает вредное влияние, как на измерительное оборудование, так и на контролируемый объект. Персонал, обслуживающий камеру, необходимо защищать от источников мощного лазерного излучения. При этом оборудование должно быть защищено от воздействия создаваемых внутри камеры экстремальных высоких и низких температур.

Для обеспечения безопасности работающего персонала вокруг спекл-интерферометра устанавливается оптически герметичный кожух. Благодаря этому, несмотря на наличие лазера 4-го класса опасности, оператор может находиться в непосредственной близости от системы. Следует отметить, что установка кожуха создает закрытое пространство вокруг лазера, что в процессе его работы приводит к повышению температуры внутри кожуха. Для устранения этого эффекта вместе с кожухом используется устройство для поддержания заданных климатических условий вокруг измерительного средства. Оператор может самостоятельно регулировать поддерживаемую температуру, и она будет стабилизирована с погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Кроме того, устройство для поддержания заданных климатических условий понижает влажность внутри кожуха и уменьшает вероятность конденсации влаги на поверхности иллюминатора. Контроль климатических условий осуществляется с помощью датчиковой аппаратуры: термометра, барометра и гигрометра.

Контроль состояния объекта выполняется с помощью устройства измерения виброперемещений PDV-100, Polytec. Принцип его работы основан на методе лазерной виброметрии. На основании получаемых с него данных выполняется маркировка кадров, полученных при высоком уровне вибраций. Оператор может отдельно просмотреть каждый из кадров и принять решение о целесообразности его учета в итоговом результате. Это необходимо из-за особенностей метода

спекл-интерферометрии. Имея высокую чувствительность ($\lambda/10$ и более, где $\lambda = 694$ мкм – длина волны используемого лазера), этот метод обладает малым диапазоном измерения между двумя последовательными кадрами (≤ 5 мкм в условиях вакуумной камеры). В идеальных условиях (хорошо рассеивающая поверхность объекта, отсутствие вибраций как на спекл-интерферометре, так и на объекте, выдержка не менее суток в помещении, где будут выполняться измерения) диапазон измерения может достигать 10 мкм. При превышении этого диапазона начинают возникать ошибки в расшифровке интерференционной картины из-за пропуска полос, так как программно полосы невозможно достоверно различить. На рис. 49 а приведена интерференционная картина при небольшой (≤ 5 мкм) деформации объекта, а на рис. 49 б – при его большом перемещении/наклоне/деформации. В первом случае полосы хорошо различимы, во втором – полосы проблематично различить как визуально, так и программно. Пример ошибки в расшифровке полос будет показан ниже.



- а) деформация менее 5 мкм, хорошо различимые полосы,
б) деформация около 12 мкм, плохо различимые полосы

Рисунок 49 – Интерференционные картины

3.2 Программное обеспечение измерительного комплекса

Сбор, запись, хранение, обработка и визуализация данных выполняется в информационной системе, на рисунке 50 представлена ее общая схема. В составе нее используются 3 компьютера: компьютер спекл-интерферометра, сервер данных и компьютер оператора. Оператор имеет возможность управлять системой с компьютера оператора. Доступ к серверу данных и компьютеру спекл-интерферометра осуществляется посредством удаленного рабочего стола. Все компьютеры синхронизируются между собой по времени с точностью не более 5 с. На сервере данных реализован RAID-массив, который позволяет безопасно хранить всю основную информация – базы данных и исходные данные со спекл-интерферометра.

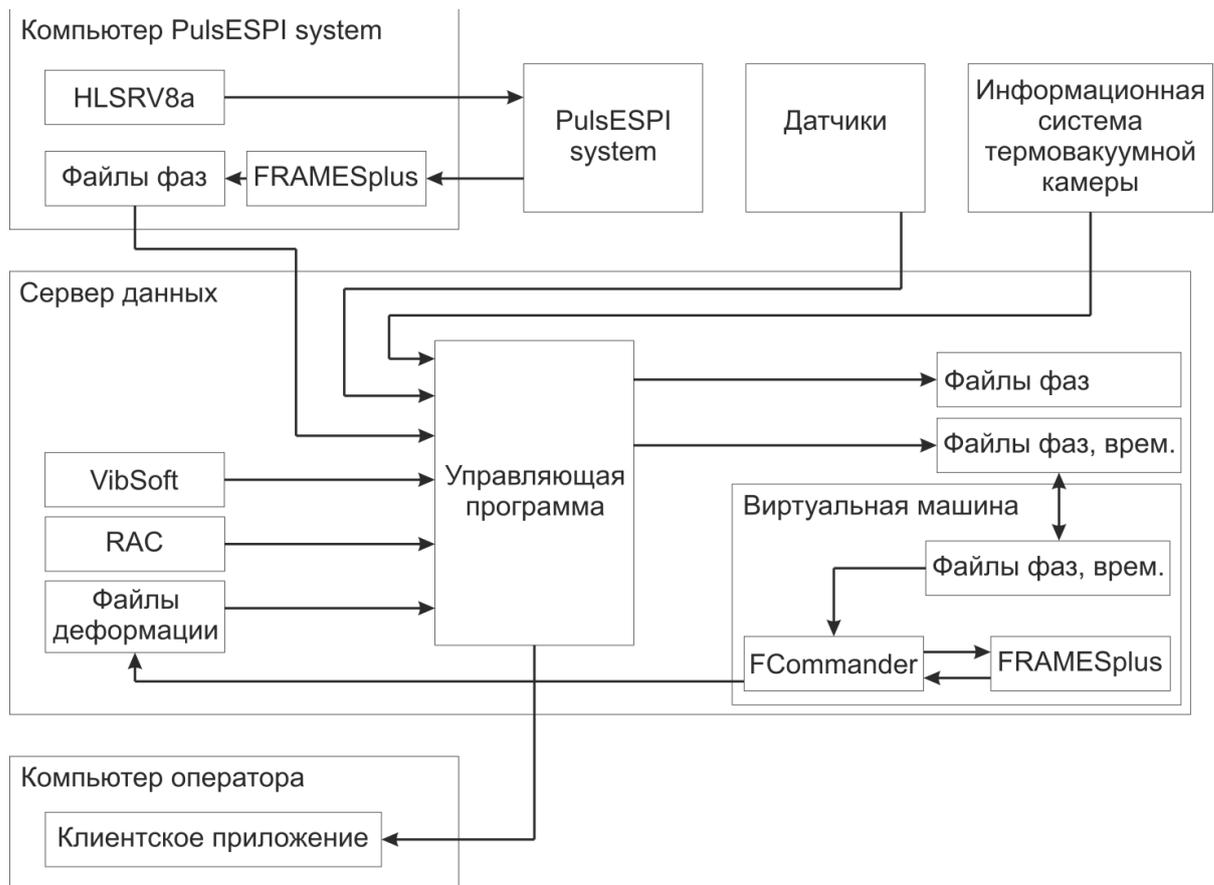
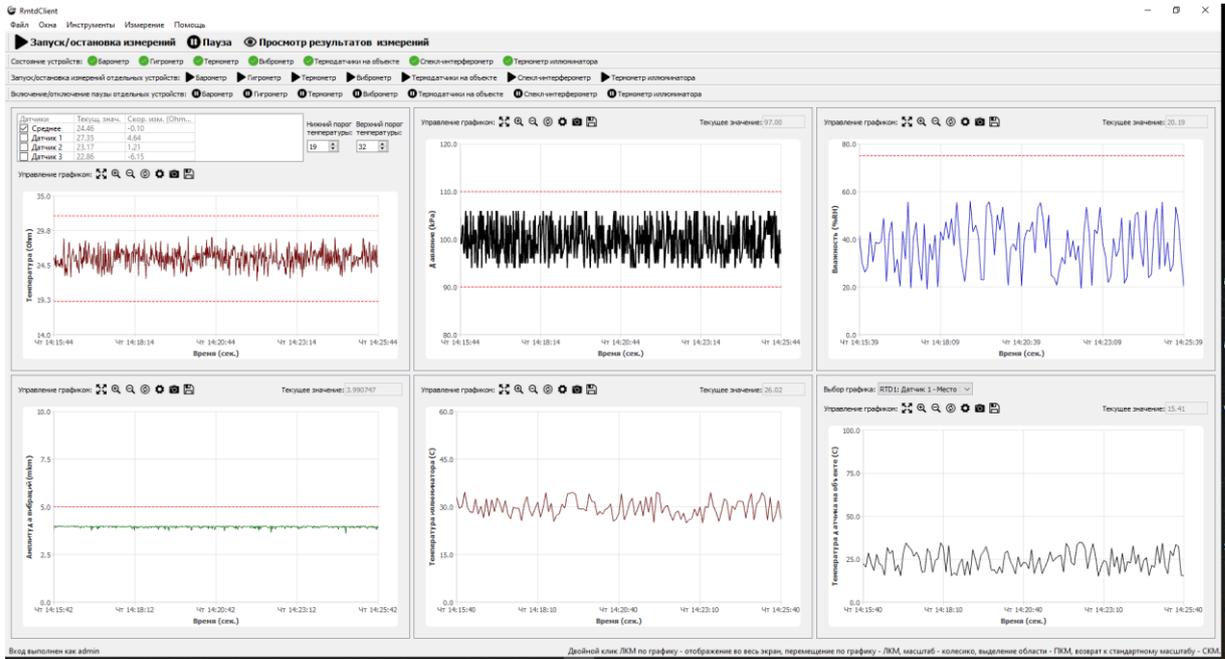
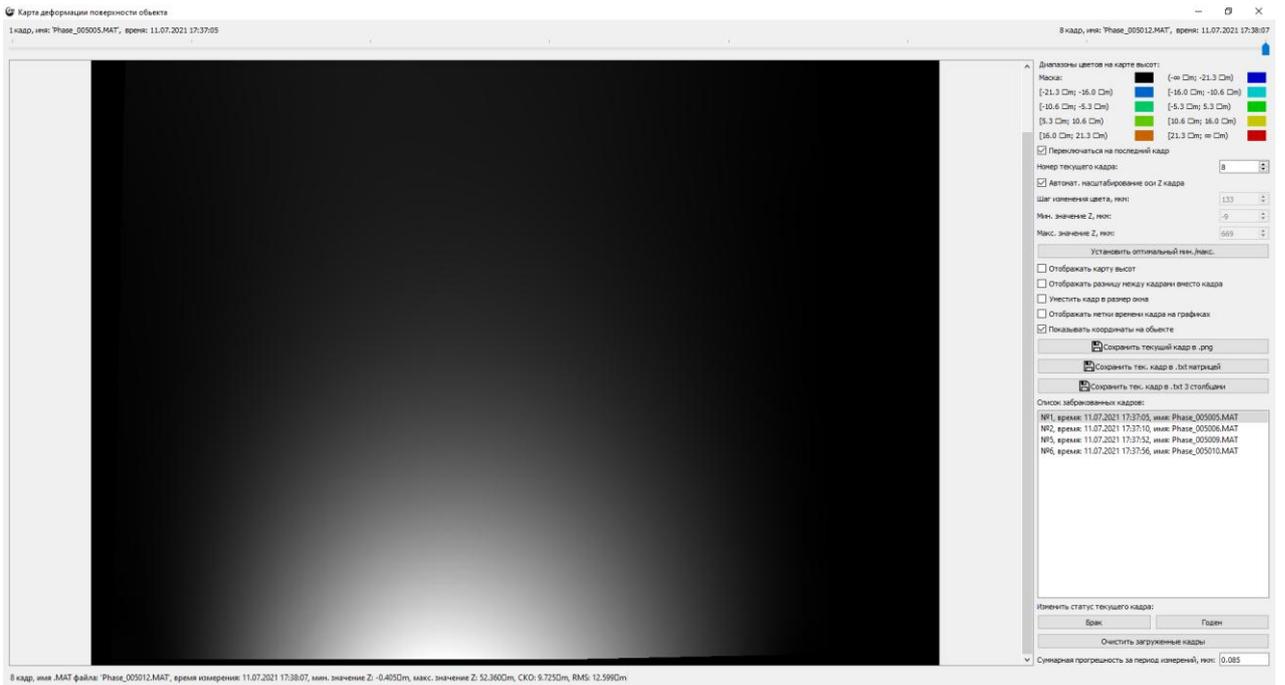


Рисунок 50 – Схема взаимодействия модулей программного обеспечения измерительного комплекса



а)



б)

а) информация с датчиков, б) измерения спекл-интерферометром

Рисунок 51 – Клиентское приложение

Также исходные данные со спекл-интерферометра остаются на его компьютере, доступ к ним с других компьютер открыт только для чтения, что обеспечивает их безопасное хранение и резервирование. Информационная система измерительного комплекса осуществляет связь с информационной системой термовакуумной камеры для получения данных о климатических условия внутри нее. Помимо этого, управляющая программа регистрирует данные с датчиковой аппаратуры и виброметра через его стандартное программное обеспечение VibSoft. Дополнительный программный модуль RAC выполняет привязку итоговой карты деформаций к координатам поверхности антенны. Тем самым оператору доступен весь комплекс данных об испытании.

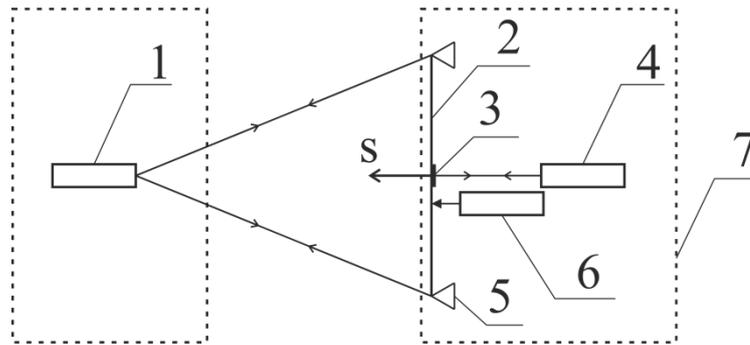
Компьютер оператора реализован на базе Эльбрус 401-PC под управлением ОС Linux E2S MONOCUB. Используется для отображения оператору полученных данных. Окно клиентского приложения выполняет отображение данных с датчиков в графическом виде представлено на рисунке 51 а. Каждый график может быть увеличен, сохранен, экспортирован в виде значений для дополнительной постобработки. В этом же окне оператором выполняется запуск и остановка измерений.

В окне «карта деформаций поверхности объекта» (рисунок 51 б) отображаются полученные со спекл-интерферометра данные. Имеется возможность просмотра деформации, как в градациях серого цвета, так и в цветном виде. Оператор может просматривать как каждое измерение отдельно, так и суммарную деформацию по всем измерениям либо выбранному диапазону. Реализован экспорт данных в виде численных значений для дальнейшей постобработки.

3.3 Внесение в Росреестр СИ РФ измерительного комплекса

Для определения метрологических характеристик спекл-интерферометра совместно с Западно-Сибирским филиалом ФГУП «ВНИИФТРИ» (Федерального

государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений») разработана методика утверждения типа СИ и методика его ежегодной поверки [13]. Оборудование внесено в Росреестр СИ РФ под номером 81555-21 [72]. Стенд, на котором проводились испытания, представлен на рисунке 52.



1 – спекл-интерферометр, 2 – плоский алюминиевый лист размерами (1,5×1,5) м, 3 – отражатель Renishaw, 4 – интерферометр перемещений Renishaw XL-80, 5 – крепление алюминиевого листа, 6 – актуатор, 7 – массивное основание,
S – вектор чувствительности спекл-интерферометра

Рисунок 52 – Схема стенда для испытаний спекл-интерферометра

В качестве объекта испытаний используется алюминиевый лист 2 с размерами (1,5 × 1,5) м и толщиной 5 мм. Элементы космических аппаратов, в свою очередь, могут иметь отличную от алюминия отражающую способность. Поэтому, в процессе настройки системы спекл-интерферометра одним из этапов юстировки является настройка яркости объектного пучка. Опорный пучок во всех экспериментах имеет схожую интенсивность, и под него подстраивается объектный пучок. Для этого обеспечены возможности изменения диаметра объектного пучка и диаметра апертурной диафрагмы объектива камеры.

С одной стороны объекта размещается спекл-интерферометр 1 на расстоянии не более 6,5 м, а с другой стороны листа помещается отражатель 3 и интерферометр перемещений Renishaw XL-80 4. Объект жестко закрепляется к

неподвижным колоннам 5, тем самым обеспечивается необходимая жесткость. Измеряемая Renishaw XL-80 область поверхности, деформируется с помощью актуатора 6. В качестве результатов измерений сравниваются показания перемещения, которые регистрирует Renishaw XL-80, и соответствующая ей точка с карты деформаций, получаемой спекл-интерферометром. Это возможно благодаря тому, что вектор чувствительности S спекл-интерферометра и направление измерения линейного перемещения Renishaw XL-80 совпадают.

Интерферометр Renishaw XL-80 и крепление алюминиевого листа установлены на массивном основании 7, что обеспечивает их неподвижность друг относительно друга во время испытаний. Для обеспечения точности измерений были устранены внешние источники вибраций, устранены колебания точки измерения, изолированы оптические пути, обеспечена синхронность регистрации показаний и спекл-интерферометра на уровне не более 0,01 с.

На данном стенде проведено три вида испытаний.

3.3.1 Определение погрешности измерений между соседними кадрами

В процессе испытания объект неподвижен, на него не оказывается никаких воздействий. Регистрируется более ста кадров. На рисунке 53 приведен пример расшифрованной интерференционной картины и шкала соответствия цвета на изображении величине деформации. Видно, что правая, левая и нижняя части объекта не деформированы. Эти области соответствуют колоннам и измеряемой Renishaw XL-80 области (обозначена белой меткой), которая напряжена актуатором. Верхняя и центральная части объекта свободны и могут совершать колебания, что можно наблюдать на карте деформаций.

На рисунке 54 представлена гистограмма частот распределения погрешности измерения: разницы измерений в точке, полученной с карты деформаций и измеренной интерферометром Renishaw XL-80.

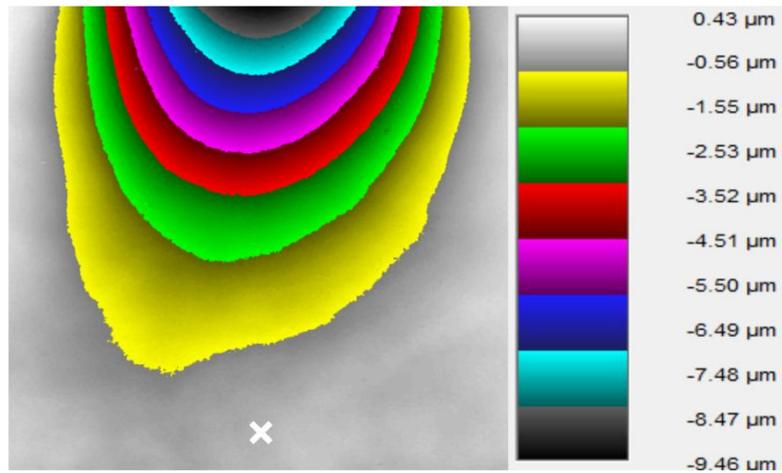


Рисунок 53 – Карта деформаций объекта (деформация в точке 0 мкм)

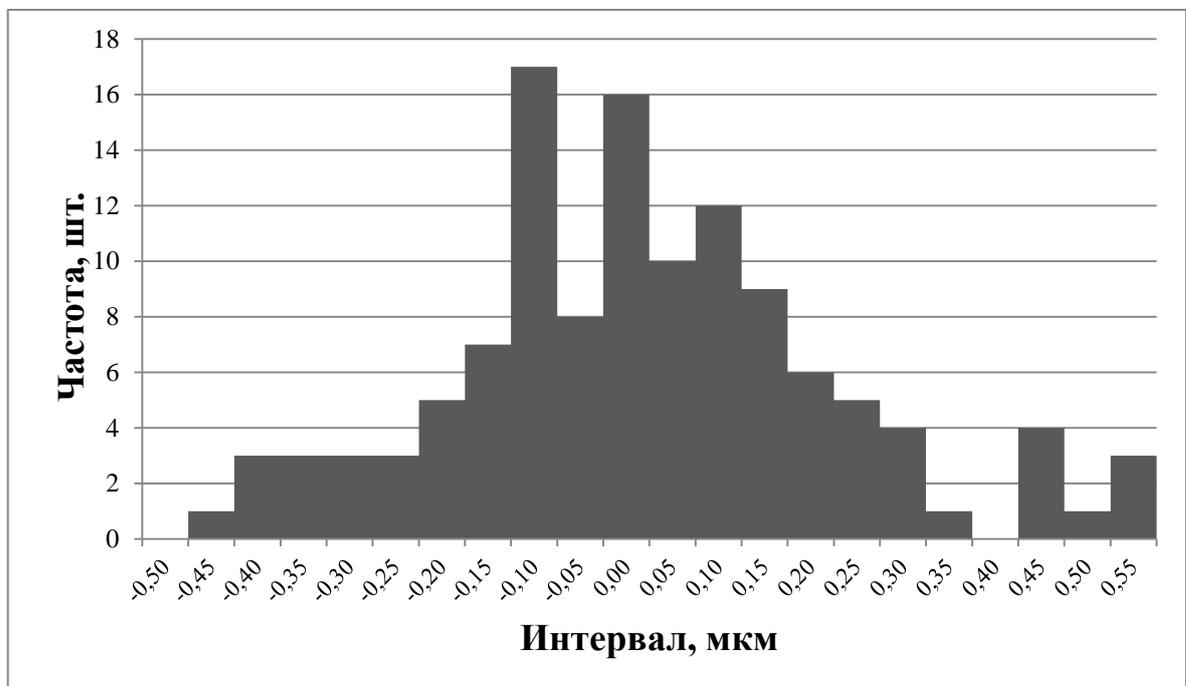


Рисунок 54 – Гистограмма частот ошибок

3.3.2 Определение диапазона измерения между двумя соседними кадрами

Объект неподвижен, измеряемая Renishaw XL-80 область деформируется (обозначена белой меткой). Величина деформации в процессе испытаний постоянно увеличивается. Начинается с величины 0,5 мкм между соседними

кадрами и заканчивается величиной 10 мкм. Необходимо определить при какой величине деформации интерферограммы будут корректно обрабатываться.

На рисунке 55 приведен пример расшифрованной интерференционной картины и шкала соответствия цвета на изображении величине деформации.

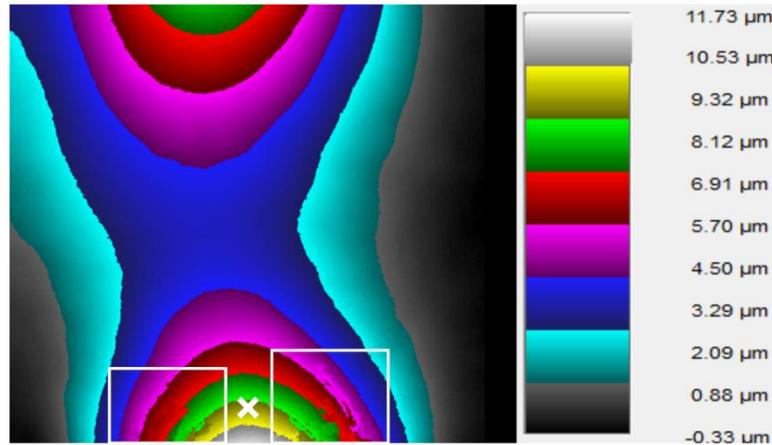


Рисунок 55 – Карта деформаций объекта (деформация в точке 10 мкм)

Видно, что правая и левая части объекта, соответствующие колоннам, не деформированы. При этом, измеряемая Renishaw XL-80 область, деформирована актуатором на величину около 10 мкм. Из-за этого наблюдается пропуск полос в нижней части объекта при расшифровке карты деформаций (области обозначены белыми прямоугольниками). При деформации объекта на величину около 5 мкм пропуска полос не наблюдается (рисунок 56).

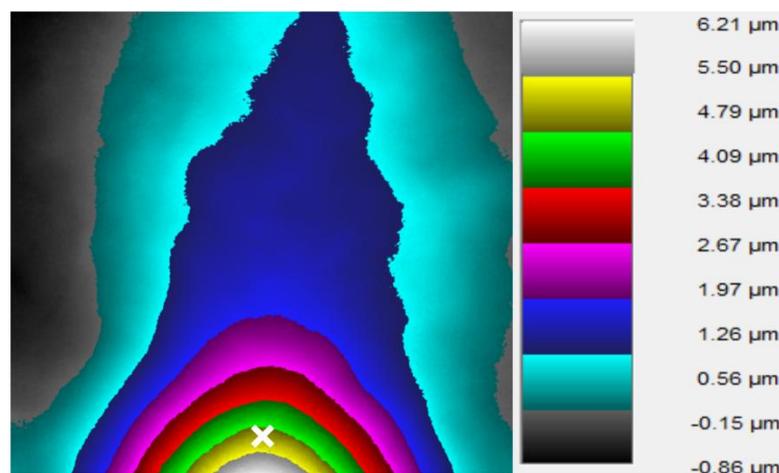


Рисунок 56 – Карта деформаций объекта (деформация в точке 5 мкм)

Разница показаний интерферометра Renishaw XL-80 и спекл-интерферометра до величины деформации 6 мкм разность носит случайный характер, а ее величина аналогична величине ошибки в испытании 1. При деформации 7 мкм и более, когда возникает пропуск полос, ошибка увеличивается и начинает носить систематический характер.

Исходя из этого и учитывая, что размер спекла должен быть минимум 3 пикселя, определяем диапазона измерения между двумя соседними кадрами. Чтобы надежно различать полосы, размер интерференционной полосы должен быть в 10 раз больше размера спекла – 30 пикселей. На матрице размером 1000 пикселей под объект может быть выделено 80 % площади, то есть 800 пикселей. На этом количестве пикселей могут быть расположены $800/(30*2) \approx 27$ полос. С учетом длины волны 0,694 мкм (одна полоса $\lambda/2$) получаем $\frac{27}{2} \times 0,347 = 4,7$ мкм.

3.3.3 Определение суммарного диапазона измерений деформаций, при котором погрешность измерений не превышает 1 мкм

Объект неподвижен, измеряемая Renishaw XL-80 область деформируется (обозначена белой меткой). Величина деформации в процессе испытаний постоянная и равна 5 мкм (рис. 10). Регистрируется семьдесят кадров и тем самым получается суммарная деформация за все испытание порядка 350 мкм.

На рисунке 57 приведена разница накопленных показаний интерферометра Renishaw XL-80 и спекл-интерферометра. Видно, что до величины 230 мкм разница показаний менее 1 мкм.

Возможная причина появления накапливающейся ошибки – нестабильность температуры помещения, в котором проводились испытания. При испытаниях в условиях имитации факторов воздействия космического пространства в оптической схеме измерения произойдет два изменения: добавится иллюминатор, с помощью которого оптическое излучение будет заводиться внутрь вакуумной установки и изменится показатель преломления среды. Наличие вакуума положительно сказывается на измерениях, так как будут отсутствовать

воздушные потоки, и не будет оказывать влияние изменение температуры среды. Ввиду относительности измерений, иллюминатор не будет вносить ошибку в результаты измерений.

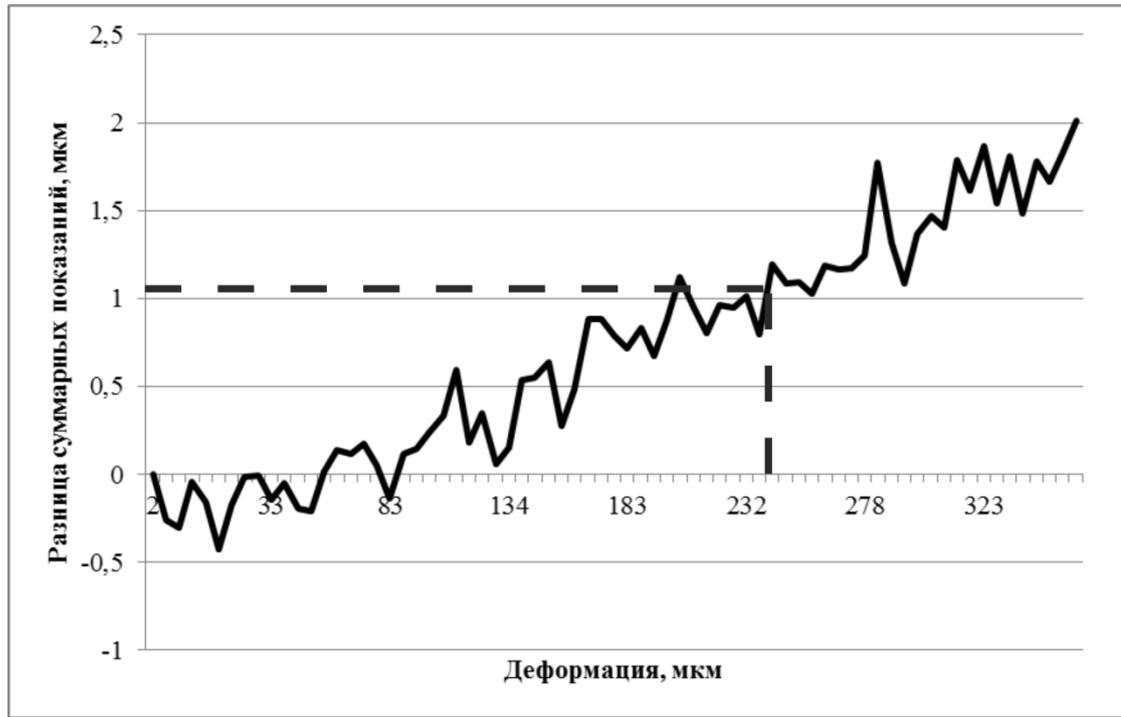


Рисунок 57 – Разница суммарных показаний интерферометра Renishaw XL-80 и спекл-интерферометра

В результате апробирована методика анализа метрологических характеристик спекл-интерферометра, позволяющая определить чувствительность ($\pm 0,05$ мкм), диапазон одного (до 5 мкм) и многократных измерений (до 200 мкм) при погрешности ± 1 мкм [62].

3.4 Расчет влияния параметров среды и допусков на оптические элементы на погрешность измерения спекл-интерферометра

Для оценки влияния изменений параметров среды (температура, давление) и расчета допусков расположения оптических элементов было проведено математическое моделирование оптической системы интерферометра при

измерении через окно иллюминатора деформаций объекта, находящегося в термовакуумной камере.

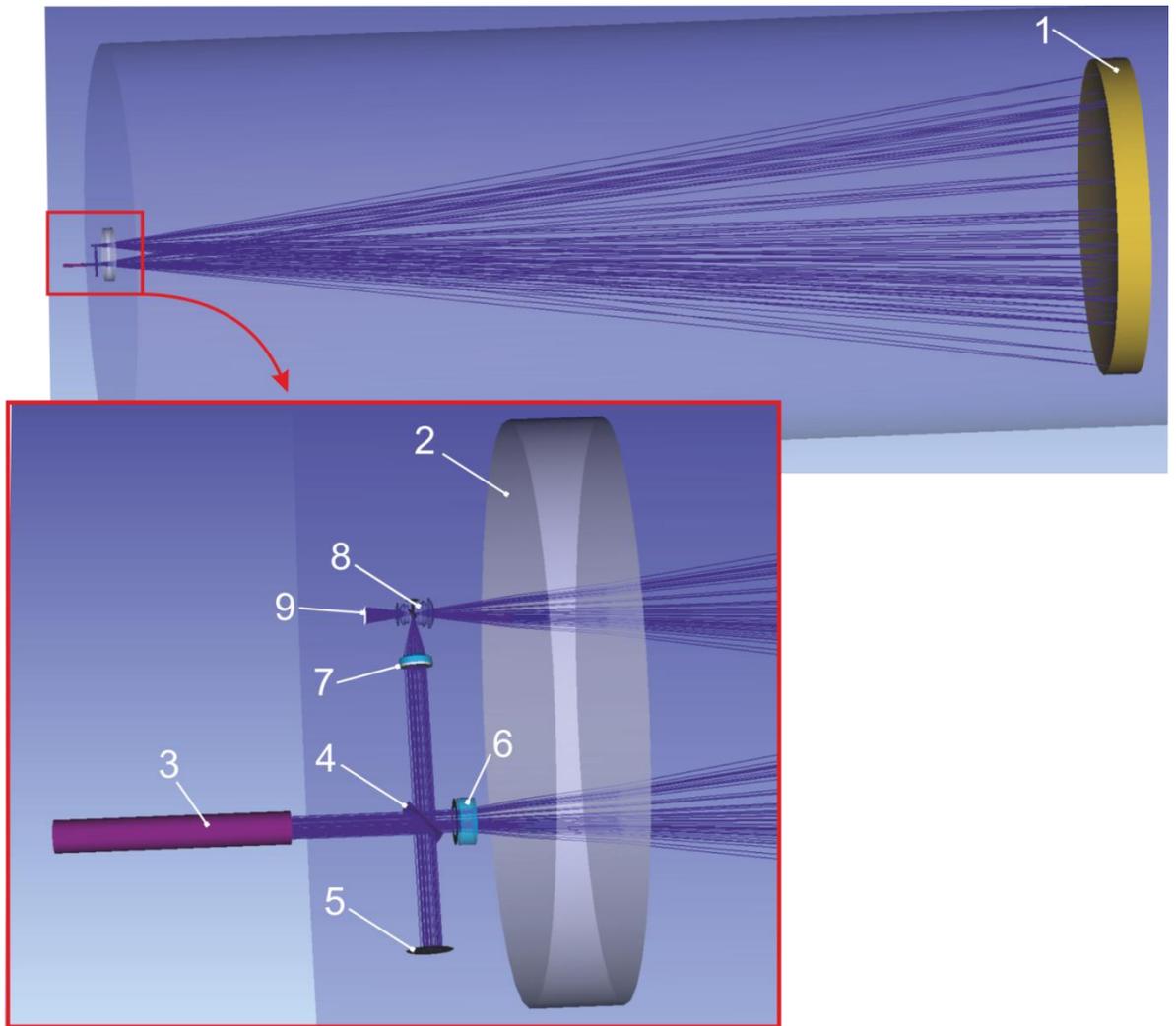
На рисунке 58 представлена 3D-модель оптической системы, созданная в программном пакете Zemax OpticStudio. Анализ производился в непоследовательном режиме работы. При этом моделировались следующие оптические эффекты:

- преломление;
- отражение (в т.ч. френелевское);
- интерференция;
- дифракция (с некоторыми ограничениями);
- рассеяние;
- термо-оптический анализ;
- поляризационные эффекты.

Оптические среды в Zemax OpticStudio (стекла, кристаллы, воздух и т.д.) поддерживают проведение термо-оптического анализа. Для них заданы коэффициенты линейного расширения (моделируется изменение геометрии оптических элементов), а также коэффициенты температурного изменения показателей преломления.

Используя возможности созданной модели оптической системы, промоделированы следующие ситуации:

- смещение иллюминатора вдоль оси относительно измерительной системы (имитация смещения окна при вакуумировании камеры);
- наклон иллюминатора;
- изменение температуры среды вокруг измерительной системы;
- изменение атмосферного давления вокруг измерительной системы;
- общее изменение температуры окна иллюминатора;
- градиент температуры окна иллюминатора.



1 – объект (диаметром 1,5 м), 2 – окна, 3 – лазер, 4 – светоделитель, 5 – опорное зеркало, 6 – отрицательная линза, 7 – положительная линза, 8 – объектив камеры, 9 – фотоприёмная матрица

Рисунок 58 – Модель интерферометра в ПО Zemax OpticStudio

В процессе моделирования производилась трассировка порядка 10^7 лучей от источника излучения 3 к детектору 9. При этом на детекторе регистрировалось изображение – интерферограмма. Расшифровка интерферограмм производилась методом 3-х фазовых шагов, т.е. при моделировании одной ситуации производилась регистрация 3-х интерферограмм с различным положением опорного зеркала 5. При расшифровке интерферограмм вычислялась фаза регистрируемого волнового фронта, а затем по фазе вычислялись возникающие искажения формы объекта (мнимые деформации или систематические ошибки измерений). Также при вычислениях учитывались собственные aberrации

оптической схемы интерферометра, их интерферограмма приведена на рисунке 59.

Ниже в таблице 5 приведены результаты моделирования: одна из трех интерферограмм, график возникающих ошибок и максимальная ошибка измерений для каждого случая.

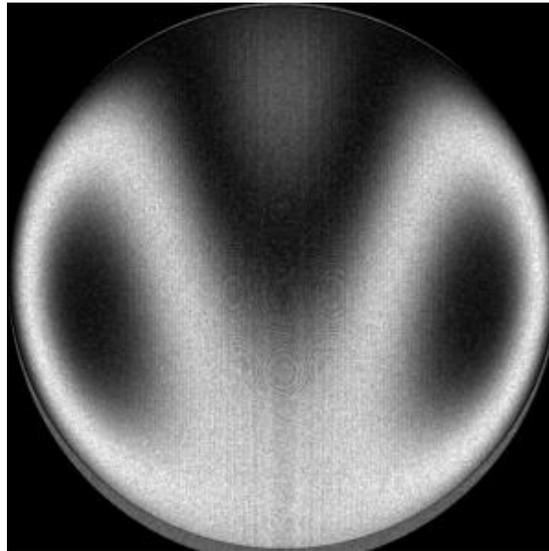
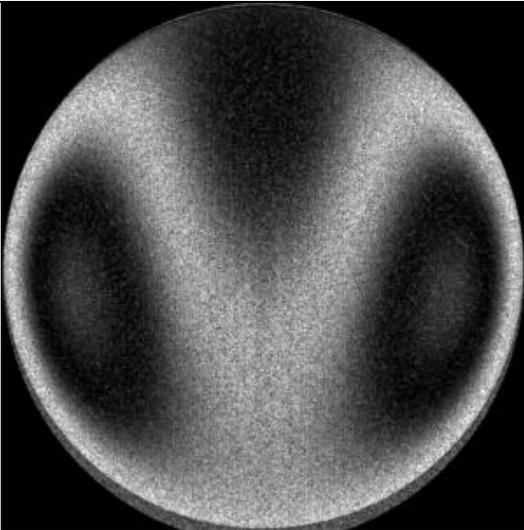
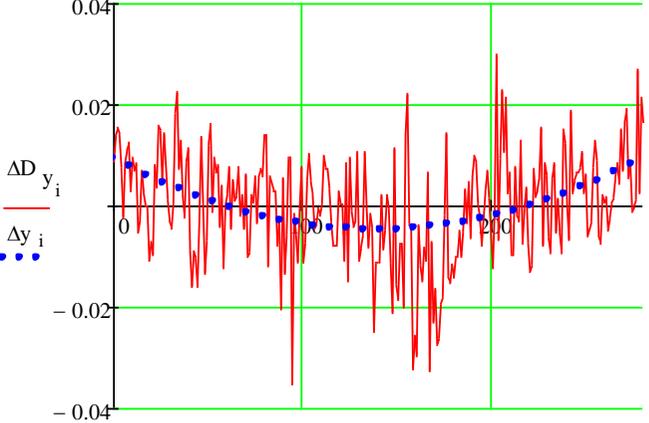
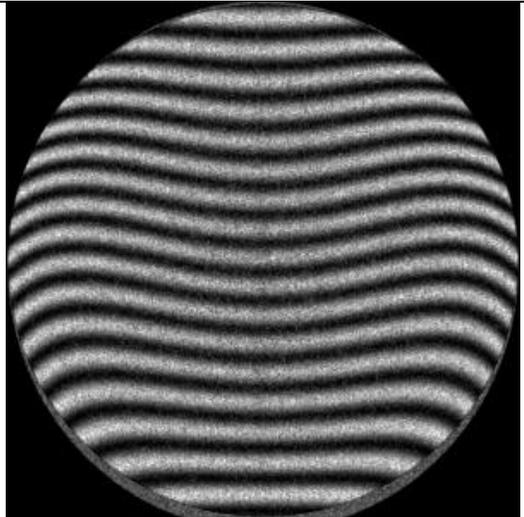
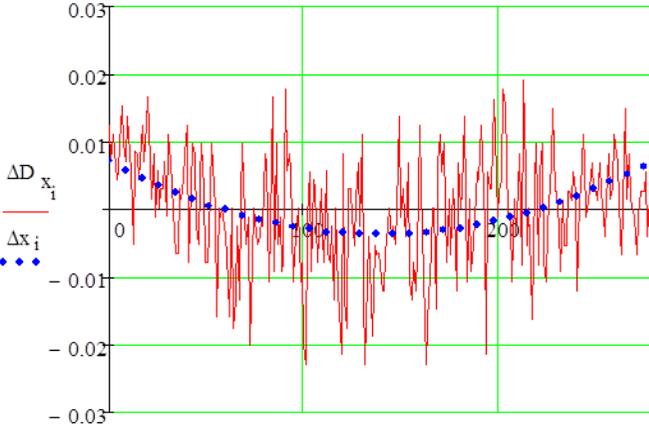


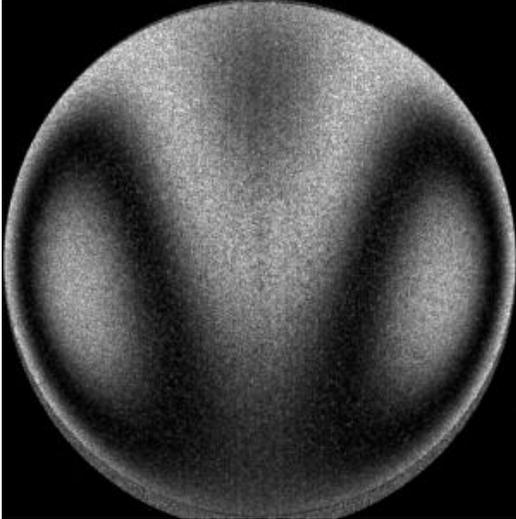
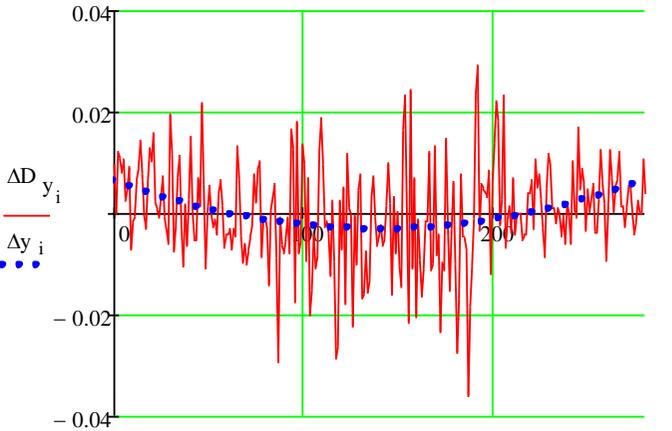
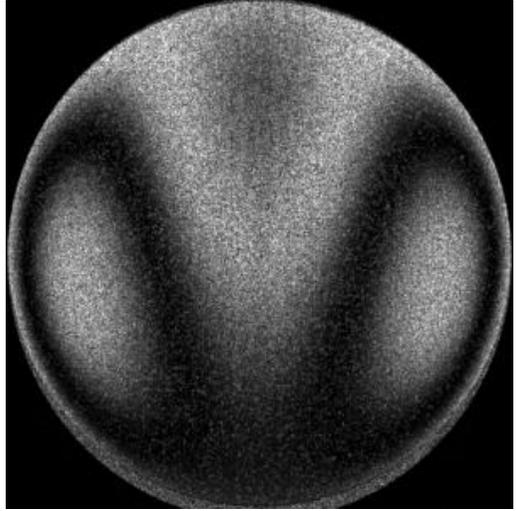
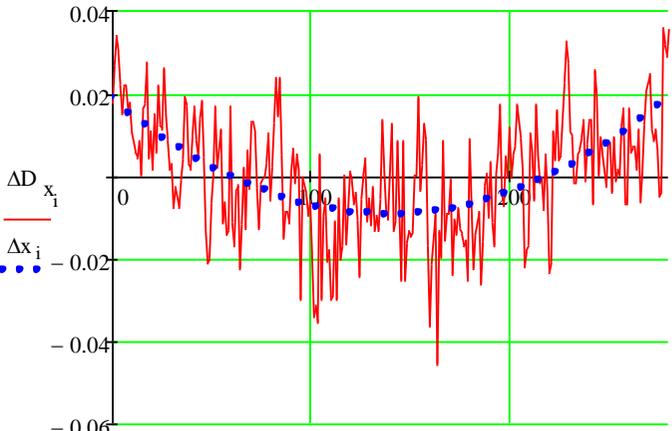
Рисунок 59 – Интерферограмма собственных aberrации оптической схемы интерферометра

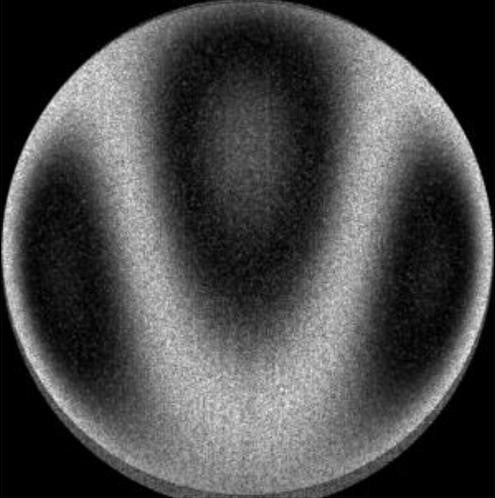
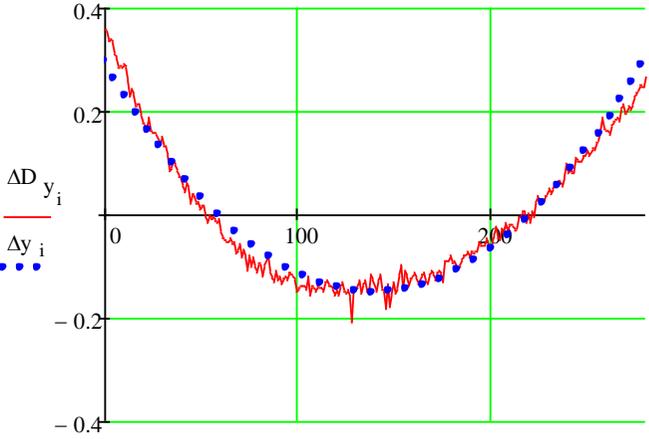
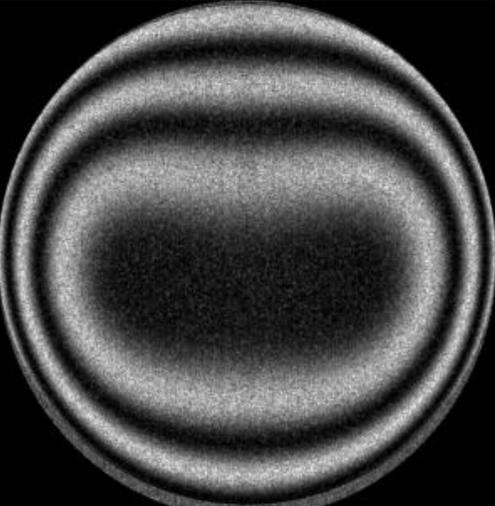
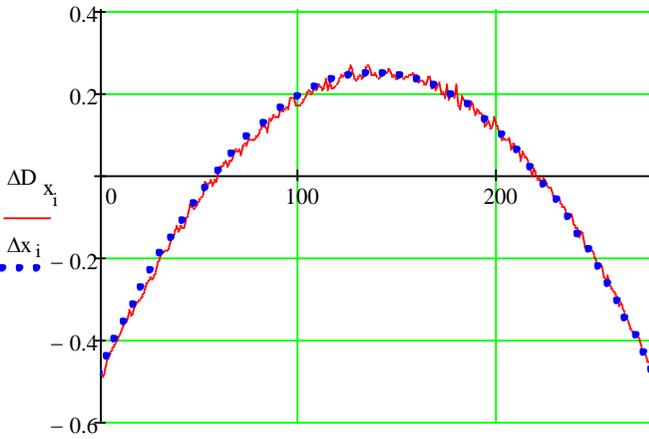
Графики возникающих ошибок измерения сильно зашумлены вследствие, случайного шума, присутствующего на интерферограммах. Данный шум возникает вследствие конечного числа трассируемых лучей. Для его уменьшения необходимо увеличить число лучей на 2 – 3 порядка, что в свою очередь привело бы к существенному увеличению времени расчетов.

Из приведенных расчетов видно, что наиболее критичной ситуацией является градиент температуры в окне иллюминатора. Ошибка 0,7 мкм при градиенте 50 °С, что объясняется сильной зависимостью показателя преломления от температуры. Стоит отметить, что использование в Измерительном комплексе нагревательного элемента по периферии окна для поддержания температуры на уровне 20 ± 1 °С позволяет уменьшить данную ошибку до единиц нм.

Таблица 5 – Результаты моделирования оптической системы интерферометра

Моделируемая ситуация	Вид интерферограмм	Возникающие ошибки измерения, мкм	Ошибка измерения, мкм
1. Смещение иллюминатора вдоль оси относительно измерительной системы на 1 мм		<p>Деформация по Y:</p> 	0,014
2. Наклон иллюминатора на 5 угл. мин.		<p>Деформация по X</p> 	0,011

Моделируемая ситуация	Вид интерферограмм	Возникающие ошибки измерения, мкм	Ошибка измерения, мкм
3. Изменение температуры среды вокруг измерительной системы на 2 °С		<p style="text-align: center;">Деформация по Y</p> 	0,0096
4. Изменение атмосферного давления вокруг измерительной системы в диапазоне 0,87 – 1 атм.		<p style="text-align: center;">Деформация по X</p> 	0,028

Моделируемая ситуация	Вид интерферограмм	Возникающие ошибки измерения, мкм	Ошибка измерения, мкм
5. Общее изменение температуры окна иллюминатора на 160 °С		<p style="text-align: center;">Деформация по Y</p> 	0,45
6. Градиент температуры окна иллюминатора 50 °С (от периферии к центру)		<p style="text-align: center;">Деформация по X</p> 	0,73

Прогиб окна иллюминатора, т.е. изменение его кривизны, моделировался, но результаты не приводятся, ввиду малых значений деформаций и возникающих ошибок (менее 1 нм).

3.5 Оценка возникающих ложных деформаций при перемещении объекта как твердого целого

При проведении измерений возможно перемещение объекта без его деформации. В случае освещения плоского объекта плоской волной такое перемещение вычитается посредством аффинного преобразования. Однако при использовании сферической волны возникает остаточная псевдодеформация, обусловленная разностью хода лучей к центру и краям объекта (рисунок 60).

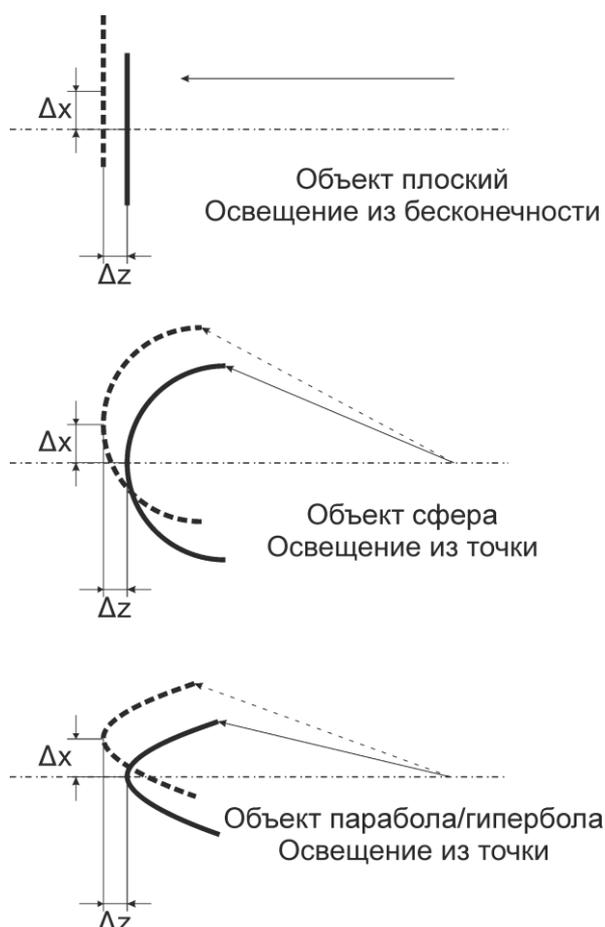


Рисунок 60 – Схема освещения плоской волной плоского объекта и освещение сферической волной сферического и асферического объектов

В реальных экспериментальных условиях объект освещается расширенным лазерным пучком (сферической волной), а исследуемые поверхности преимущественно имеют параболическую, гиперболическую или сферическую форму. В этом случае процедура вычитания перемещения как жесткого тела также приводит к появлению остаточной псевдодеформации. Для количественной оценки данного эффекта рассмотрим сферическую поверхность, описываемую формулой:

$$x^2 + z^2 = R^2 \quad (19)$$

При смещении объекта на величину $\Delta z = 2$ мм и освещении сферической волной (из точечного источника) переходим к полярным координатам. Формула смещенной сферической поверхности принимает вид:

$$r^2 \sin^2 \varphi + (r \cos \varphi + \Delta z)^2 = R^2 \quad (20)$$

Выражая r из формулы 20:

$$r = \sqrt{R^2 + \frac{\Delta z^2 \cos \varphi - \Delta z^2}{2}} - \Delta z \cos \varphi \quad (21)$$

Вычитая из полученного выражения (21) уравнение исходной сферической поверхности в полярных координатах, получаем зависимость, представленную на рисунке б1.



Рисунок б1 – График вычитания уравнений смещенной и несмещенной сфер

Наблюдается линейное смещение, которое может быть устранено процедурой вычитания перемещения как жесткого тела. После исключения линейной составляющей (путем вычитания коэффициентов линейной регрессии) получаем график остаточной псевдодеформации (рисунок 62).

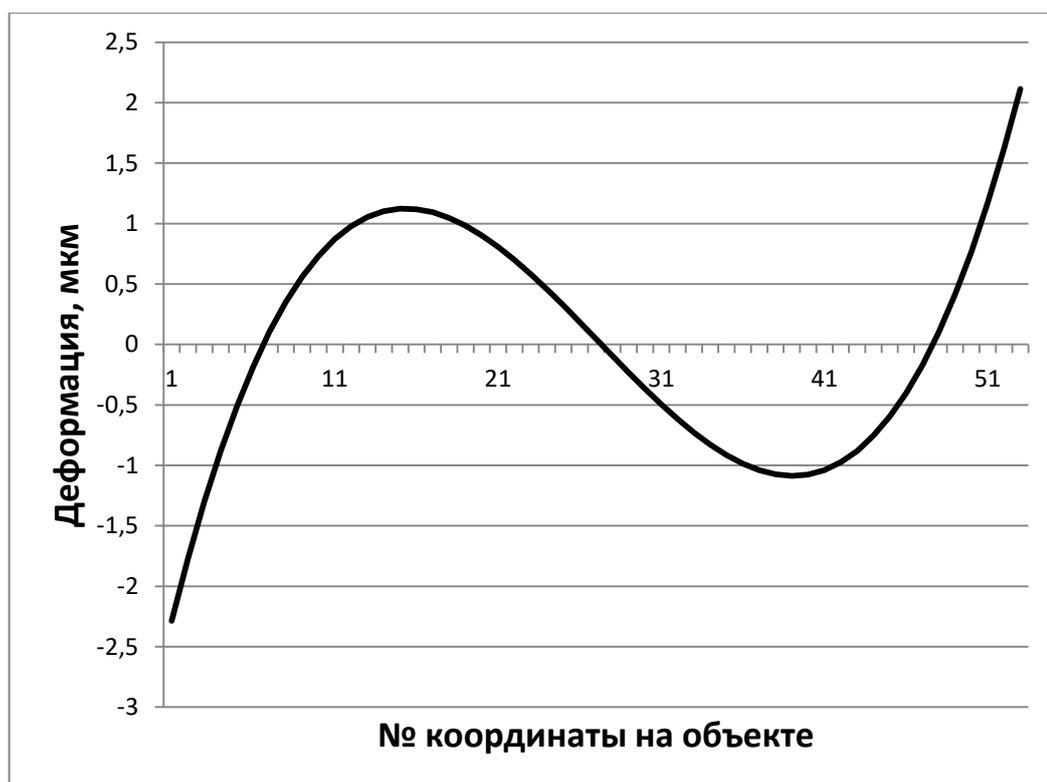


Рисунок 62 – Объект сферической формы поверхности, деформация после вычитания перемещения объекта по Z как твердого целого

Анализ результатов показывает, что при осевом смещении ($\Delta z = 2$ мм) недеформированного сферического объекта регистрируется псевдодеформация амплитудой порядка ± 2 мкм после компенсации движения как жесткого тела. Аналогичная картина наблюдается при поперечном смещении (по оси X), как показано на рисунке 63 а).



а)



б)



в)



г)

а – объект сферической формы поверхности, деформация после вычитания перемещения объекта по X как твердого целого, б – объект гиперболической формы поверхности, деформация после вычитания перемещения объекта по X как твердого целого, в – объект гиперболической формы поверхности, деформация после вычитания перемещения объекта по Z как твердого целого, г – объект параболической формы поверхности, деформация после вычитания перемещения объекта по X как твердого целого

Рисунок 63 – Графики объектов различных форм после вычитания перемещения объекта как твердого целого

Проведя аналогичные вычисления для гиперболической поверхности, получаем соответствующие зависимости для смещений по X (рисунок 63 б) и Z (рисунок 63 в). Для параболической поверхности характерна остаточная псевдодеформация только при поперечном смещении (рисунок 63 г), тогда как осевое смещение не приводит к появлению артефактов вследствие отсутствия квадратичной зависимости от данной координаты.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

В ходе работы разработан и успешно использован измерительный комплекс для измерения деформаций рефлекторов космических аппаратов на базе термовакуумных камер. В измерительном комплексе основную функцию выполняет спекл-интерферометр на базе метода пространственного фазового сдвига. Другие части предназначены для осуществления его безопасной работы и работающего рядом персонала. Они включают в себя: защитный кожух, защищающий от излучения мощного импульсного лазера; датчиковую аппаратуру и устройство поддержания климатических условий вокруг измерительной системы, которые задает оператор. Состояние измеряемого объекта отслеживается с помощью устройства измерения виброперемещений PDV-100, Polytec. Вся информация надежно хранится внутри информационной системы. Такой измерительный комплекс в России создан впервые.

Спекл-интерферометр аттестован, совместно с Западно-Сибирским филиалом ФГУП «ВНИИФТРИ» и внесен в Росреестр СИ РФ. Для этого разработан экспериментальный стенд. В результате апробирована методика анализа метрологических характеристик спекл-интерферометра, позволяющая определить чувствительность ($\pm 0,05$ мкм), диапазон одного (до 5 мкм) и многократных измерений (до 200 мкм) при погрешности ± 1 мкм. Полученные результаты и выбранный метод измерения позволяют говорить о возможности применения данной системы для прецизионного контроля деформаций

крупногабаритных объектов, таких как рефлекторы и элементы зеркальных систем космических аппаратов в условиях имитации факторов воздействия космического пространства.

Для оценки влияния изменений параметров среды (температура, давление), а также для расчета допусков расположения иллюминатора проведено математическое моделирование спекл-интерферометра на базе термовакуумной камеры. Иллюминатор может вносить вклад в погрешность измерений, если в процессе измерений он будет перемещаться, наклоняться или будет изменяться оптическая длина хода из-за изменения его температуры. С целью оценки данных влияний выполнено моделирование поведения иллюминатора при различных ситуациях. Результаты расчета показали следующее: смещение иллюминатора вдоль оси относительно измерительной системы на 1 мм дает ложную деформацию $\sim 0,014$ мкм; наклон иллюминатора на 5 угл. мин. – $\sim 0,011$ мкм; изменение температуры среды вокруг измерительной системы на 2°C – $\sim 0,0096$ мкм; изменение атмосферного давления вокруг измерительной системы в диапазоне от 0,87 до 1 атм. – $\sim 0,028$ мкм; общее изменение температуры окна иллюминатора на 50°C – $\sim 0,14$ мкм; градиент температуры окна иллюминатора 50°C – $\sim 0,73$ мкм. Видно, что самый значительный вклад в погрешность измерений вносят такие факторы как изменение температуры иллюминатора и возникновение в стекле градиента температур.

Исследовано влияние смещения объекта как твердого целого на карту деформаций при его освещении плоской, сферической волнами. Рассмотрено смещение, которое не вычитается в результате аффинного преобразования. Получено значение деформации до 2 мкм при смещении объекта диаметром 1,5 м на 2 мм.

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА БАЗЕ ТЕРМОВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ МЕТОДОМ СПЕКЛ- ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

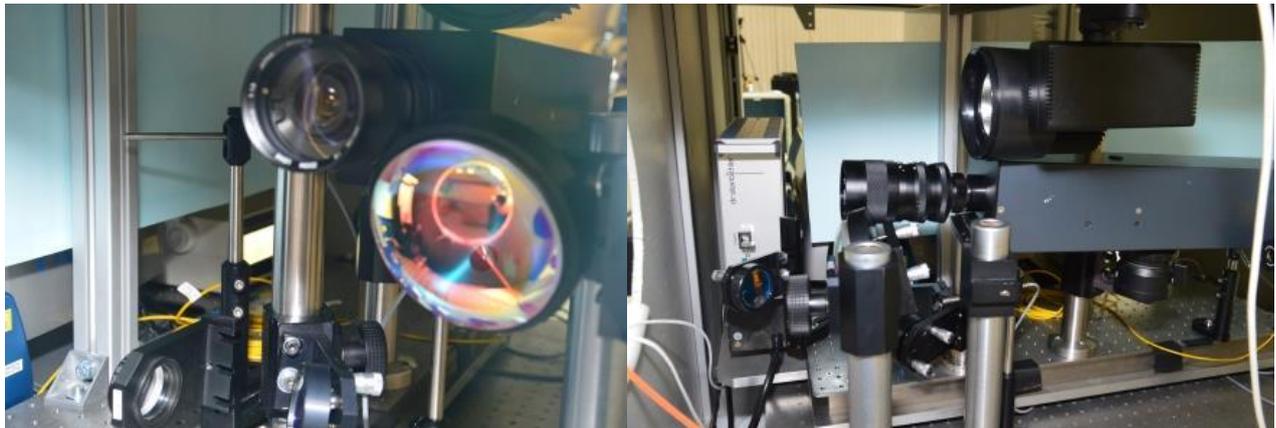
В данной главе описывается измерительный комплекс, который спроектирован для работы в термовакуумной камере, и с помощью которого измерены прототипы рефлекторов КА. По полученным данным выполнена оценка погрешности выполненных измерений.

4.1 Испытания на базе термовакуумной камеры

В рамках испытаний измерительного комплекса на территории предприятия Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» были успешно подтверждены все его технические и метрологические характеристики. Измерения выполнялись как в нормальных условиях, так и с использованием вакуумной камеры. Фотографии созданной системы представлены на рисунке 64.

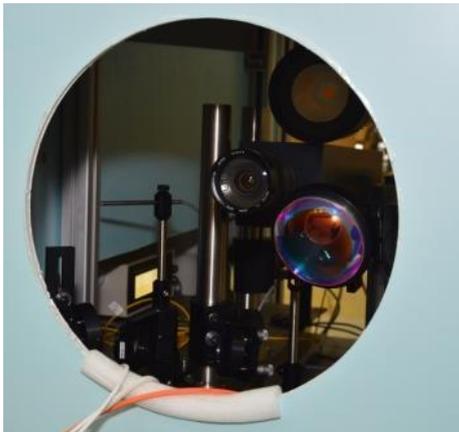
Для измерений было предоставлено три объекта из углепластика (углепластик КМУ-М55J/НИИКАМ-РС 154.ТУ159, изготовленные из препрега ПУ-М55J/НИИКАМ-РС по 154.ТУ158). Объекты являются прототипами рефлекторов, имеют разную форму поверхности (параболическую, гиперболическую) и различаются по диаметру (от 600 до 1200 мм). Расстояние от измерительного комплекса до объектов было в диапазоне 5500 ± 400 мм. Измерения проводились на разных этапах термоциклирования (рисунок 65). Так, измерения деформации поверхности объекта 1 начинались при нормальной температуре (25°C) и выполнялись до достижения температуры осушения ($T_{\text{осуш}}$). Деформация поверхности объекта 2 измерялась при нагревании от нормальной температуры до максимальной температуры ($T_{\text{макс}}$), а объекта 3 – при охлаждении от нормальной температуры до минимальной температуры ($T_{\text{мин}}$). Такой подход к

измерениям позволил оценить работу измерительного комплекса на всех этапах термоциклирования, возможность его перенастройки между разными объектами измерения в процессе работы вакуумной камеры, а также осуществимость измерений объектов с различными формой поверхности и диаметром [64].



а)

б)



в)



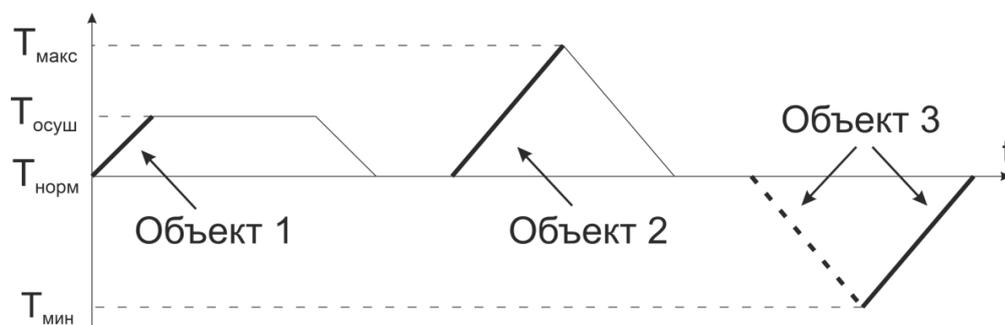
г)

а – фото спереди, б – фото сбоку, в – фото спереди, со стороны
иллюминатора, г – рабочее место оператора

Рисунок 64 – Фотография разработанного измерительного комплекса

Для объекта 1 имитировали сушку рефлектора перед испытаниями. Находясь в нормальных условиях, углепластик из-за своей гигроскопичности впитывает влагу из окружающего воздуха. Перед испытаниями на охлаждение и нагрев необходимо избавиться от влаги. Для этого объект нагревается до $T_{осуш}$ с

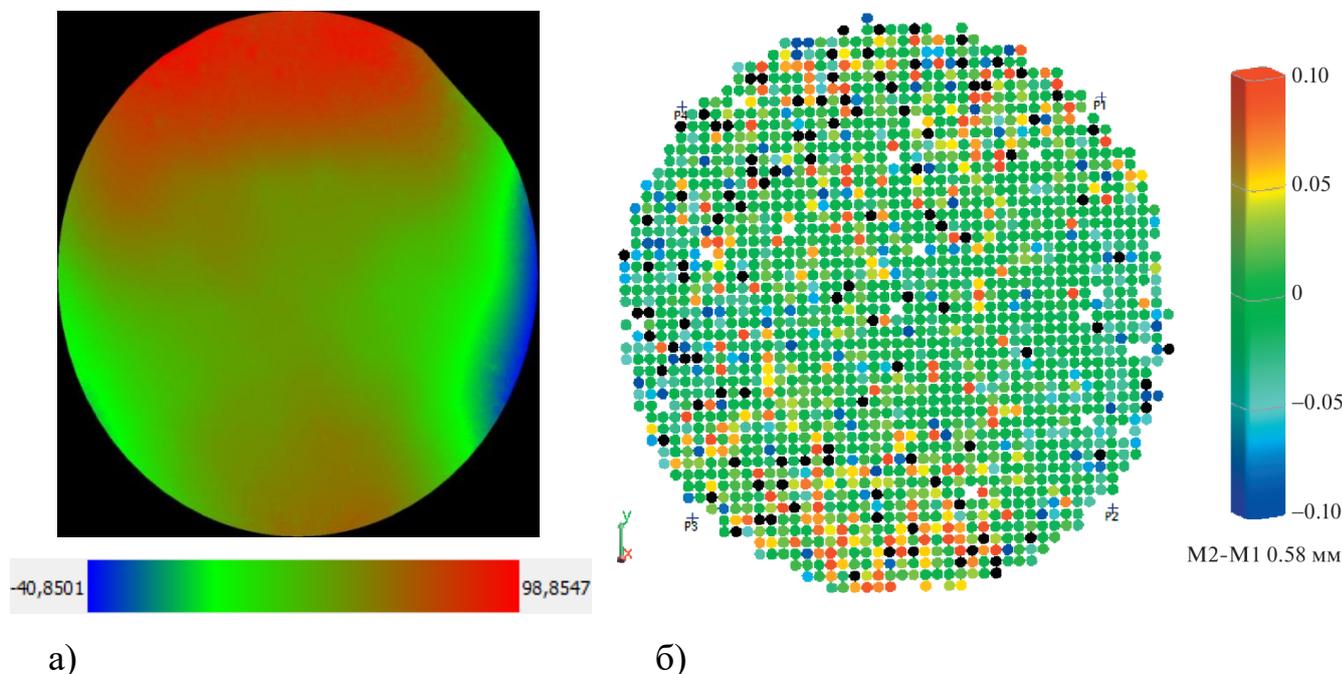
последующей выдержкой при такой температуре некоторое время. Измерения объекта 1 в рамках испытаний суммарно длились около 4 ч, было получено порядка 800 кадров. Все полученные кадры удалось корректно обработать и измерить поле деформаций при осушении объекта 1 (Рисунок 66 а).



$T_{\text{макс}}$ – максимальная температура, $T_{\text{осуш}}$ – температура осушения,

$T_{\text{норм}}$ – нормальная температура, $T_{\text{мин}}$ – минимальная температура

Рисунок 65 – Циклограмма испытаний объектов в термовакуумной камере



а) данные с измерительного комплекса; б) измерения, выполненные лазерным радаром

Рисунок 66 – Карта деформаций при осушении объекта 1

На карте цветом определяется величина деформации, а соответствие цвета величине отображено на шкале. Видно, что верхняя и нижняя части рефлектора деформировались в направлении наблюдения, а правая часть – в противоположном направлении. Изменение среднеквадратичного отклонения (СКО) формы рефлектора, измеренное измерительным комплексом, представлено в таблице 6 и составляет 24 мкм.

Таблица 6 – Результаты измерений изменения среднеквадратичного отклонения (СКО) формы рефлекторов

№ объекта	Измерительный комплекс, мкм	Измерения радаром, мкм
Объект 1	24	58
Объект 2	28	90
Объект 3	27	50

Аналогичные измерения для объекта 1 были выполнены с помощью лазерного радара серии MV350E [73]. Результаты измерений радаром представлены на рисунке 66 б, изменение СКО представлено в таблице 6 и составляет 58 мкм. Видно, что характер деформаций совпадает с данными измерительного комплекса. При этом можно наблюдать значительное количество локальных выбросов на карте деформаций. Они преимущественно связаны с погрешностью измерений радаром, которая рассчитывается по следующей формуле

$$\delta = \pm \sqrt{2(20 + 5L)^2 + 2(13,6L)^2}, \quad (22)$$

где L – расстояние от радара до измеряемого объекта).

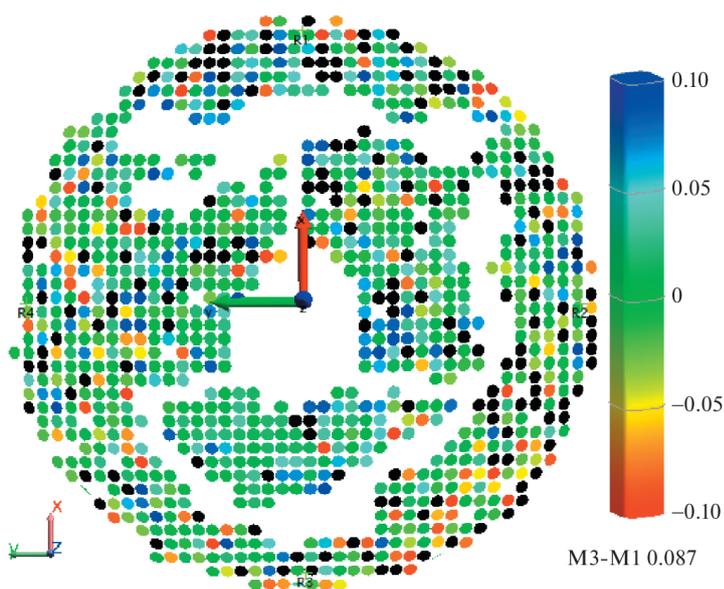
Так, на расстоянии 5500 мм погрешность составляет ± 125 мкм. При этом измеряемая величина деформации находится в диапазоне ± 100 мкм. Следовательно, радар позволяет лишь оценить положение, направление и примерную величину деформаций. При измерении величины деформации 50 мкм

и менее целесообразно является использование метода спекл-интерферометрии. Согласно рисунку 66 а, деформация по объекту изменяется гладко, без значимых выбросов.

Контроль деформации объекта 2 выполнялся при его нагревании от нормальной температуры до $T_{\text{макс}}$. Продолжительность испытаний составляла суммарно около 3 ч. Получено около 600 кадров. Результат измерения деформаций объекта 2 представлен на рисунке 67 а. Изменение СКО, полученное измерительным комплексом, представлено в таблице 6 и составляет 28 мкм. Видно, что верхняя и нижняя части рефлектора деформировались в сторону наблюдения, а правая часть – в противоположном направлении. Аналогичные измерения выполнены с помощью лазерного радара, их результаты представлены на рисунке 67 б, изменение СКО составило 90 мкм (см. таблицу 6).



а)



б)

а) данные с измерительного комплекса; б) измерения, выполненные лазерным радаром

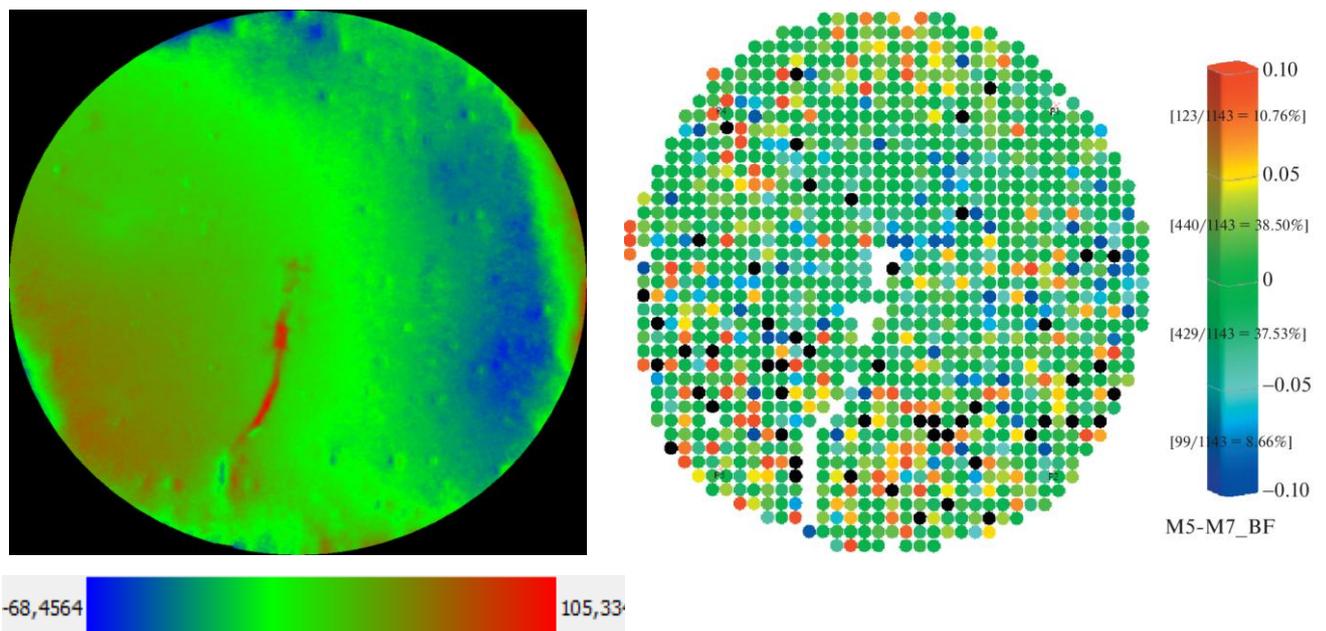
Рисунок 67 – Карта деформаций при нагревании объекта 2

На картах деформаций имеются неизмеренные места. Они соответствуют положениям датчиков температуры объекта и кабелей к ним. Датчики располагаются непосредственно на рабочей поверхности рефлектора. Кабели имеют большую подвижность при воздействии температуры. Эти участки поверхности перекрыты маской.

Измерения деформаций объекта 3 выполнялись при его охлаждении от нормальной температуры до $T_{\text{мин}}$. В рамках испытаний измерительного комплекса измерения суммарно длились около 6 ч. Было получено около 1500 кадров. Измерения удалось выполнить лишь частично. В процессе охлаждения объекта на криоэкраны вакуумной камеры порционно подавался жидкий азот, который охлаждал все три рефлектора в камере, в том числе и их оснастку. Операторы вакуумной камеры регулировали скорость подачи азота и его порции, тем самым контролируя скорость охлаждения по датчикам на поверхности объекта. Скорость охлаждения объекта поддерживалась на уровне 2 °С/мин. При такой скорости охлаждения, особенно в моменты подачи азота, происходило скачкообразное изменение формы и размеров рефлекторов и их оснастки. Величина перемещения, деформаций и наклона измеряемой поверхности объекта превышала 5 мкм, т.е. допустимый межкадровый диапазон измерений для измерительного комплекса. При обработке таких данных возникали пропуски полос и, соответственно, значительно увеличилась погрешность измерений. Таких кадров было зарегистрировано более 1000.

Большой объем (порядка 2/3 кадров) недостоверных данных не позволяет получить сведения о величине деформации за измеряемый период. Поэтому измерения были продолжены при нагревании термовакуумной камеры, а соответственно и выбранного для этого измерения объекта 3 от $T_{\text{мин}}$ до нормальной температуры. Нагревание объектов внутри вакуумной камеры суммарно длилось больше 12 ч. Было получено около 3300 кадров. Измерения также удалось выполнить только частично, при этом было потеряно не более 1/3 кадров. Результат измерения деформаций объекта 3 приведен на рисунке 68 а.

Согласно рисунку, левая нижняя часть рефлектора деформировалась в сторону измерительного комплекса, а правая верхняя часть – в направлении от нее. Аналогичные измерения выполнены с помощью лазерного радара, их результаты показаны на рисунке 68 б. При измерениях лазерным радаром в середине нижней части объекта виден неизмеренный участок – место расположения датчика температуры и кабеля к нему. При обработке измерений использованы два подхода: с закрытием датчика маской и без закрытия. Установлено, что без маскирования удалось получить заметно больше корректных измерений. При этом, используя полученную величину деформаций, необходимо не учитывать значения из этой области.



а)

б)

а) данные с измерительного комплекса; б) измерения, выполненные лазерным радаром

Рисунок 68 – Карта деформаций при охлаждении объекта 3

В итоге получены результаты измерения деформаций асферических поверхностей крупногабаритных (до 1,5 м) объектов разработанным комплексом в условиях термовакуумной камеры с погрешностью ± 1 мкм.

4.2 Определение погрешности на основе экспериментальных данных

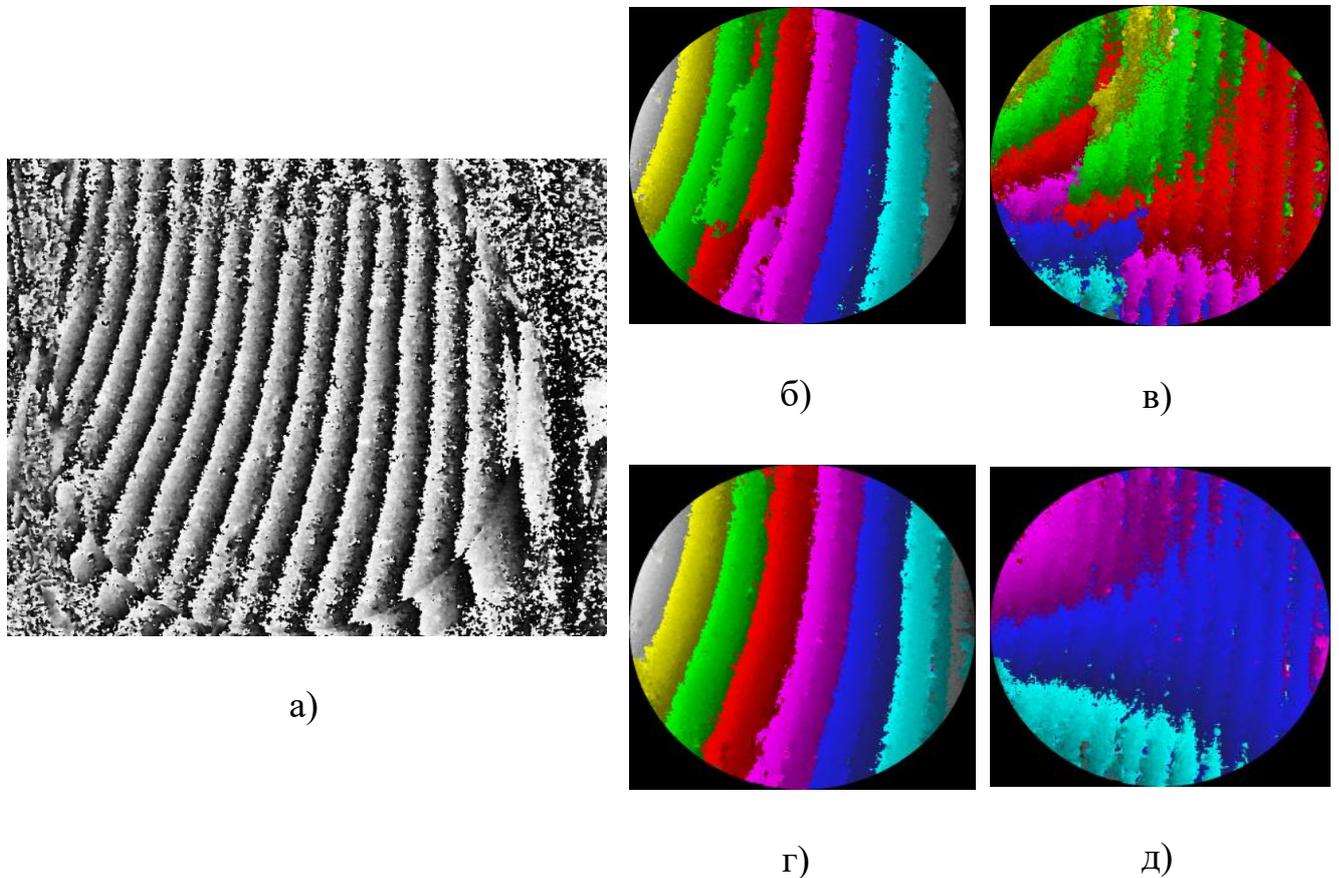
После завершения всех испытаний необходимо было оценить величину суммарной погрешности измерений. Часть измерений выполнена при низком уровне шума (объект 1, 2) и небольшом перемещении/деформации между кадрами, несмотря на постоянную работу создающего помехи оборудования вакуумной камеры. Измерения же объекта 3 выполнены при повышенном уровне шума и высокой скорости перемещения/деформации между кадрами. Это в большей степени связано с работой насосов подачи жидкого азота и собственно с влиянием самого азота. Вследствие этого возникали ошибки в расшифровке полос.

Другим потенциальным источником погрешности может быть нестабильность длины волны лазера. Изменение длины волны лазера в данной системе составляет около 4 пм, что не вносит существенного вклада в ошибку.

Ошибка, связанная с пропуском полосы, вносит вклад в погрешность измерений, равный расстоянию между полосами ($\lambda/2 = 0,347$ мкм). На рисунке 69а представлена одна из интерференционных картин объекта 3. Визуально она имеет участки с высоким уровнем шума, хотя полосы внешне хорошо различимы. На изображении можно видеть 15 полос, что при расстоянии между полосами 0,347 мкм дает деформацию/перемещение около 5 мкм. Изображение получено на границе диапазона измерения между кадрами и имеет высокий уровень шума.

При таких условиях обработка может быть выполнена с ошибками. Например, показанная на рисунке 69 б исходная интерференционная картина обработана при среднем уровне надежности обнаружения полос. В центральной части изображения виден пропуск полосы. Из-за этого на рисунке 69в, который

является изображением 69 б с вычитанием перемещения объекта как твердого целого, можно наблюдать смешанную карту деформаций.



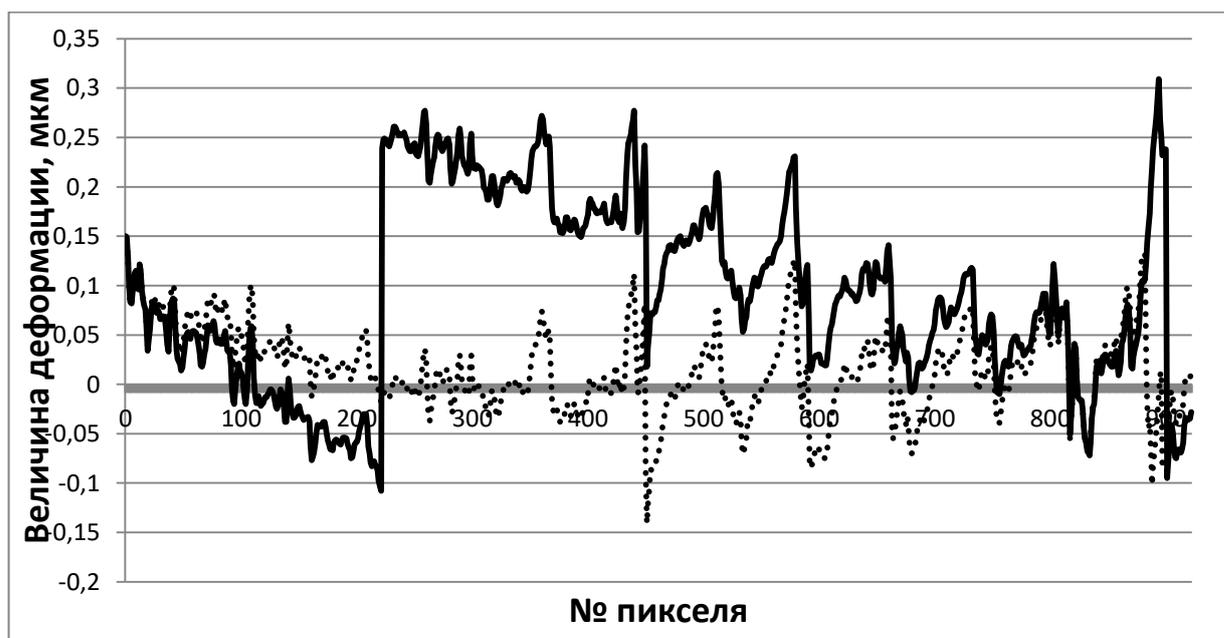
а – исходное изображение, б – некорректно обработанное изображение со средним уровнем надежности обнаружения полос, в – изображение (б) после вычитания перемещения объекта как твердого целого, г – корректно обработанное изображение с высоким уровнем надежности обнаружения полос, д – изображение (г) после вычитания перемещения объекта как твердого целого

Рисунок 69 – Обработка интерференционной картины с разным уровнем надежности обнаружения полос

Для сравнения на рисунке 69 г показана обработка изображений при высоком уровне надежности обнаружения полос. В этом случае на рисунке 69 д

(после вычитания перемещения объекта как твердого целого) видно, что полосы идут гладко, не наблюдается разрывов в карте деформаций.

Издержки обработки отображаются на графиках (рисунок 70) в виде скачка в точке пропуска полосы. На графиках показаны срезы, соответствующие изображениям на рисунках 69 в, 69 д. Под срезом понимается строка значений, взятая с карты деформаций. В данном случае срезы взяты по строке № 540. На графиках по оси X отмечен номер пикселя, а по оси Y – значение деформации в микронах. Видно, что при корректной обработке кривая деформации идет плавно, без видимых разрывов. При пропуске полосы виден скачок деформации в районе пикселя № 230.



сплошная линия – срез с рисунка 69в, пунктирная линия – срез с рисунка 69д

Рисунок 70 – Срезы по строке 540 на рисунках 69в, 69д

По этой причине после выполнения измерений необходимо все полученные результаты проверить на предмет пропуска полос. Автоматический подход для

определения ошибок подобного рода находится в процессе разработки и пока не дает стабильных результатов.

После исключения кадров, описанных выше, была проведена оценка суммарной погрешности измерений. Измерительный комплекс, работающий на основе метода спекл-интерферометрии, предполагает многократное измерение деформаций объекта. Процесс деформации достаточно длительный. Регистрируется несколько тысяч кадров. В процессе измерений происходит изменение внешних условий (температуры, давления, влажности воздуха) на пути луча, а также изменение температуры иллиuminатора и расширение основания, на котором стоит оптическая система. Измерительный комплекс, выполняя цикл обработки, вносит свой вклад в ошибку из-за несовершенства преобразования интерференционной картины в карту деформаций и шумов на изображении. В результате в каждом пикселе изображения объекта осуществляется сложение измеренных небольших или почти нулевых деформаций (десятки нанометров):

$$D_s = \sum_{i=1}^N d_i, \quad (23)$$

где N – число измерений, d_i – деформация в каждом пикселе изображения объекта.

При этом также в каждом кадре производится вычитание смещения объекта как твердого целого. Учтем, что у прибора имеется некоторая инструментальная погрешность единичного измерения – δd . Поскольку распределение ошибок единичных измерений является нормальным (рисунок 71), суммарная погрешность всего измерения может быть вычислена по следующей формуле:

$$\delta D = \delta d \cdot \sqrt{N} \quad (24)$$

Для расчета погрешности измерений необходимо вычислить погрешность единичного измерения δd . Ее величину можно оценить по полученным картам деформаций (см. рисунки 66а, 67а, 68а). На суммарной картине деформаций были взяты срезы со всех трех объектов измерения. При этом выбирались следующие области: объект 1 со средним уровнем шума, объект 2 с низким уровнем шума, объект 3 с высоким уровнем шума. Все срезы представлены на рисунке 72.

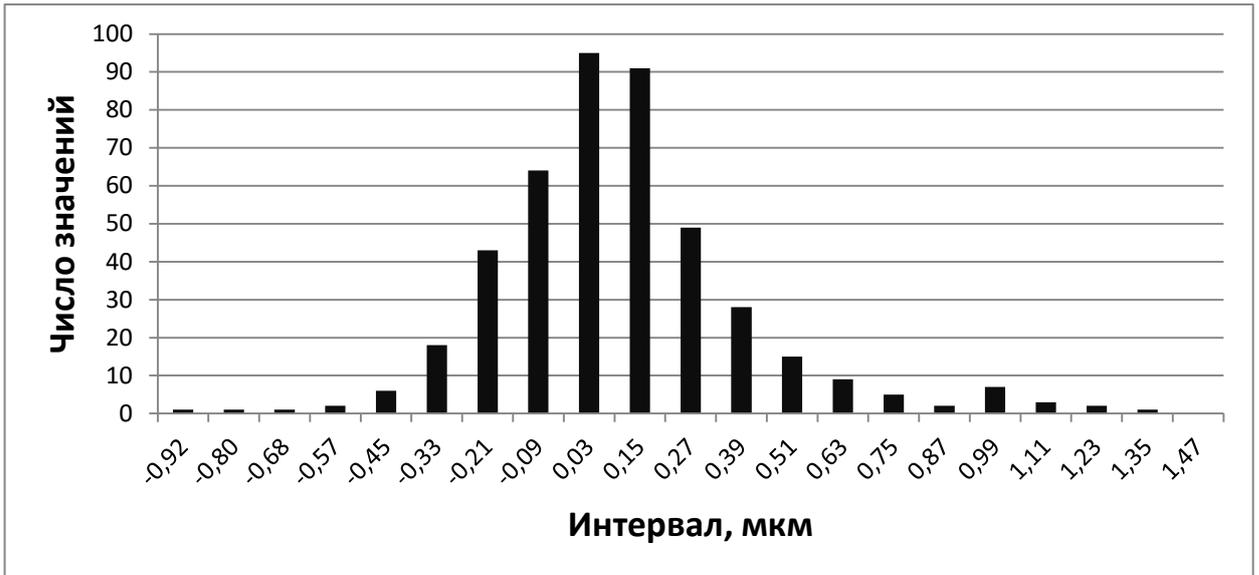


Рисунок 71 – Распределение вероятности СКО разности значений деформации в срезе и бегущего среднего по значениям деформации

По срезу можно оценить уровень шума на карте деформаций между пикселями (соседними точками измерений), взяв разницу значений деформации в срезе и бегущего среднего значения по срезам всех изображений. СКО этих разностей приведены в таблице 7.

Видно, что для объекта 1 разброс суммарных деформаций составил 0,3 мкм на визуально гладких участках и 0,8 мкм на визуально шумных участках. Количество кадров при этом составило 788. У объекта 3 эти значения выше: от 0,8 до 1,5 мкм, но при этом количество кадров значительно больше.

Величина уровня шума (см. таблицу 7) принимается за итоговую погрешность δD для каждого объекта. Тогда погрешность единичного измерения можно вычислить по следующей формуле:

$$\delta d = \frac{\delta D}{\sqrt{N}} \quad (25)$$

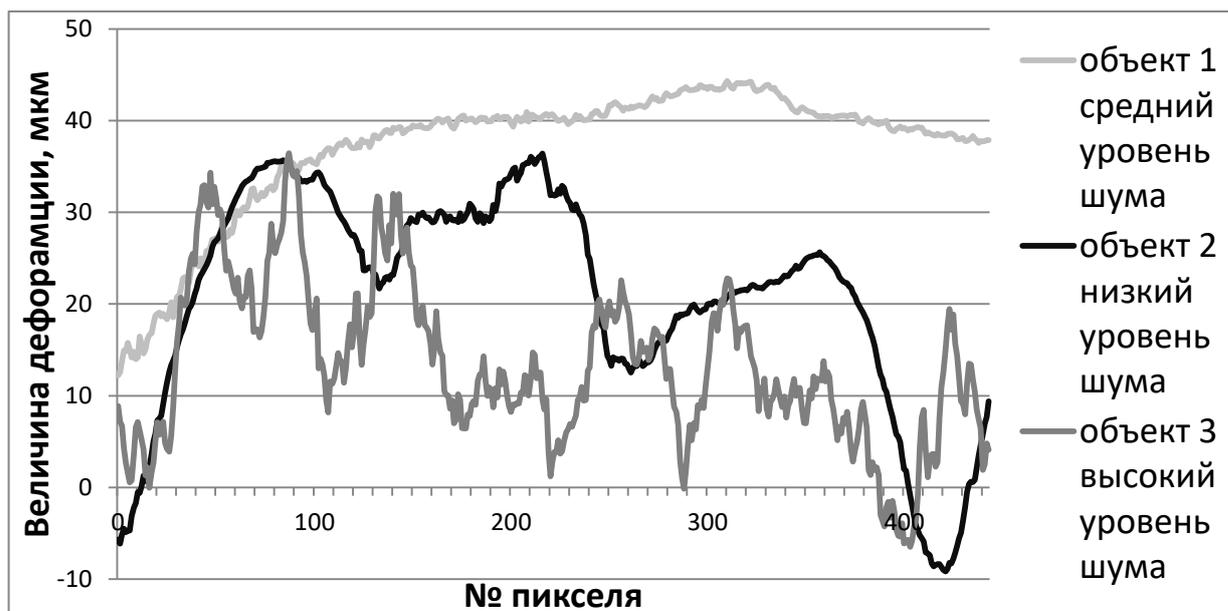


Рисунок 72 – Срезы по все трем объектам, выбранные из центральных частей карт деформаций

Таблица 7 – Уровень шума по срезам в разных местах изображений

Объект 1	Строчка 136	Строчка 500	Строчка 850
	0,8 мкм	0,32 мкм	0,53
Объект 2	Строчка 150	Строчка 450	Строчка 900
	0,55 мкм	0,83 мкм	0,54 мкм
Объект 3	Строчка 150	Строчка 450	Строчка 850
	1,32 мкм	0,8 мкм	1,52 мкм

В процессе испытаний погрешность единичных измерений для всех объектов составила от 0,018 до 0,025 мкм, что соответствует примерно 1/10 интерференционной полосы (типичная ошибка для большинства полевых интерферометров). Подставляя это значение в формулу 24, вычисляем суммарную погрешность, полученную при испытаниях. Так, для объектов 1, 2, 3 она составила 0,7; 0,64; 1,11 мкм соответственно при количестве измерений 800, 600 и 2000 соответственно.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

Созданная измерительная система позволяет измерять деформацию объектов произвольной формы, в том числе плоской, параболической, гиперболической и др. Измерения могут выполняться на всех этапах термоциклирования: сушка, нагревание, охлаждение. Измерения на первых двух этапах выполнены успешно, особенностей выявлено не было. При охлаждении же значительная часть измерений была потеряна из-за высокой скорости перемещения/деформации объекта. Измерения объекта 3 выполнены при нагревании из охлажденного состояния. Так же необходимо уменьшать подвижность объекта измерений в процессе испытаний – использовать размеростабильную оснастку, имеющую низкий коэффициент температурного расширения. При невозможности использования такой оснастки необходимо выполнять компенсацию перемещений объекта, для того, чтобы кадры можно было делать реже и тем самым регистрировать именно деформацию объекта и не его перемещение как твердого целого. Результаты измерения деформаций асферических поверхностей крупногабаритных (до 1,5 м) объектов разработанным комплексом в условиях термовакуумной камеры с погрешностью ± 1 мкм в России получены впервые и являются основой для дальнейших исследований и разработки подхода к измерению рефлекторов при больших скоростях охлаждения.

На основании полученных карт деформаций проведена оценка погрешности измерений. Оценена межкадровая погрешность в условиях работы с термовакуумной камерой, которая составила 1/10 интерференционной полосы. Суммарная же погрешность измерений не превышает 1 мкм при обработке до 2000 кадров. По сравнению с используемым в данный момент методом лазерной дальнометрии метод спекл-интерферометрии позволил уменьшить погрешность измерений в 100 раз – со 100 мкм до 1 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена задача исследования деформаций поверхностей рефлекторов космических аппаратов методом цифровой спекл-интерферометрии при испытаниях на базе термовакуумной камеры. На основе проведенного обзора литературы выбран метод импульсной цифровой спекл-интерферометрии на основе метода пространственного фазового сдвига.

Выполнено моделирование оптической схемы спекл-интерферометра в программном пакете для расчета и проектирования оптических систем Zemax OpticStudio. Получено, что при проектировании систем на основе метода спекл-интерферометрии, требующих регистрации большого числа кадров (несколько тысяч), рекомендуется использовать объективы с высокой телецентричностью в пространстве изображений (не менее $0,05^\circ$). Пример подобной системы спроектирован и заложен в основу дальнейших исследований.

Разработан и успешно использован Измерительный комплекс для измерения деформаций рефлекторов космических аппаратов на базе термовакуумных камер. В измерительном комплексе основную функцию выполняет спекл-интерферометр на базе метода пространственного фазового сдвига. Другие его части предназначены для осуществления его безопасной работы и работающего рядом персонала. Такой измерительный комплекс в России создан впервые.

Спекл-интерферометр аттестован, совместно с Западно-Сибирским филиалом ФГУП «ВНИИФТРИ», и внесен в Росреестр СИ РФ. В результате проведения испытаний получены следующие метрологические характеристики: максимальная деформация между двумя последовательными измерениями (кадрами) не более 5 мкм; максимальная суммарная деформация за весь период испытаний, при которой погрешность не превышает ± 1 мкм, не более 200 мкм.

Выполнен теоретический анализ погрешности измерений. Для оценки влияния изменений параметров среды (температура, давление), а также для расчета допусков расположения иллюминатора проведено математическое

моделирование спекл-интерферометра на базе термовакуумной камеры. Результаты расчета показали, что самый значительный вклад в погрешность измерений вносят такие факторы, как изменение температуры иллиминатора и возникновение в стекле градиента температур.

Исследовано влияние смещения объекта как твердого целого на карту деформаций при его освещении плоской, сферической волнами. Рассмотрено смещение, которое не вычитается в результате аффинного преобразования. Получено значение деформации до 2 мкм при смещении объекта диаметром 1,5 м на 2 мм.

Созданная измерительная система позволяет измерять деформацию объектов произвольной формы, в том числе плоской, параболической, гиперболической и др. Диаметр контролируемых объектов может достигать 1,5 м. Измерения могут выполняться на всех этапах термоциклирования: сушка, нагревание, охлаждение. Результаты измерения рефлекторов методом спекл-интерферометрии на базе термовакуумных камер в России получены впервые и являются основой для дальнейших исследований и разработки подхода к измерению рефлекторов при больших скоростях охлаждения.

На основании экспериментальных данных и оценке погрешностей, возникающих при измерениях спекл-интерферометром на базе термовакуумной камеры проведена оценка погрешности измерений. Оценена межкадровая погрешность в условиях работы с термовакуумной камерой, которая составила 1/10 интерференционной полосы. Суммарная же погрешность измерений не превышает 1 мкм при обработке до 2000 кадров. По сравнению с используемым в данный момент методом лазерной дальнометрии метод спекл-интерферометрии позволил уменьшить погрешность измерений в 100 раз – со 100 мкм до 1 мкм.

Полученные результаты говорят о том, что необходимо уменьшать подвижность объекта измерений в процессе испытаний – использовать размеростабильную оснастку, имеющую низкий коэффициент температурного расширения. При невозможности использования такой оснастки выполнять

компенсацию перемещений объекта, для того, чтобы кадры можно было делать реже и тем самым регистрировать именно деформацию объекта, а не его перемещение как твердого целого.

Направлением дальнейших исследований является разработка системы для измерения деформаций на базе термовакуумной камеры, способной охлаждать объект до гелиевых температур. Планируется также создание системы, способной регистрировать три направления деформации.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, к.т.н. Петру Сергеевичу Завьялову за большую поддержку на протяжении всей работы над диссертацией, за неоценимую помощь в обсуждении результатов и подготовке статей к печати. Кроме того, большая благодарность выражается научному сотруднику лаборатории технического зрения КТИ НП СО РАН к.т.н. Елене Сергеевне Жимулёвой за поддержку на всех этапах выполнения диссертации, обсуждение и корректирование направления работы. Хочется поблагодарить весь коллектив лаборатории технического зрения за постоянное содействие и доброжелательную рабочую атмосферу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксёнов Е. А. [и др.]. Бесконтактный спекл-интерферометрический измеритель малых смещений // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2008. № 1. С. 15–19.
2. Антонов А. А., Капустин О. Е., Уткин И. Ю. Развитие метода лазерной интерферометрии, предназначенного для оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях // Дефектоскопия. 2020. № 5. С. 45–51.
3. Бадалян Н. П. [и др.]. Лазерная дистанционная спекл-интерферометрия. Модель формирования спекл-структуры // Квантовая электроника. 2008. № 5 (38). С. 477–481.
4. Бакут П. А. [и др.]. Способ аттестации телескопа // 1995.
5. Бланк А. В., Сухарева Н. А. Пространственный дифференциальный анализ распределения интенсивности коллимированного волнового пучка // вычислительные методы и программирование. 2020. № 1 (21). С. 13–26.
6. Вечтомов В. А., Голубцов М. Е., Можаров Э. О. Зеркальный коллиматор миллиметрового диапазона волн // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 8 (8). С. 28.
7. Вишняков Г. Н. [и др.]. Сдвиговой спекл-интерферометр с квадрилинзой // Оптика и спектроскопия. 2020. № 10 (128). С. 1577–1582.
8. Вокулёр Ж. Т. Ж. Фотографирование небесных тел для любителей астрономии 1967.
9. Гужов В., Ильиных С. Оптические измерения. Компьютерная интерферометрия 2-е изд. Учебное пособие для бакалавриата и магистратуры / В. Гужов, С. Ильиных, Litres, 2018.
10. Жимулева Е. С., Завьялов П. С., Кравченко М. С. Разработка и исследование телецентрических объективов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. № 1 (5). С. 120–124.

11. Жимулева Е. С., Завьялов П. С., Кравченко М. С. Разработка телецентрических объективов для систем размерного контроля // Автометрия. 2018. № 1 (54). С. 61–70.
12. Жужукин А. И. Применение спекл-интерферометрии для исследования колебаний крупногабаритных конструкций газотурбинных двигателей // Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение». 2017. № 3 (114). С. 66–74.
13. Завьялов П. С. [и др.]. Исследование метрологических характеристик системы PulsESPI применительно к прецизионному контролю термодифформаций // Решетневские чтения. 2018. (1). С. 107–109.
14. Завьялов П. С. [и др.]. Высокоточная двухступенчатая система контроля положения зеркальных элементов космической обсерватории «Миллиметрон» // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2022) : сборник трудов по материалам VIII Международной конференции и молодежной школы, Самара, 23–27 мая 2022 года. Том 2. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2022. – С. 23002.
15. Завьялов П. С. [и др.]. Бесконтактная система измерения геометрических параметров решеток ионных двигателей // Фотоника. 2023. № 8 (17). С. 622–631.
16. Завьялов П. С., Кравченко М. С., Жимулева Е. С. Разработка системы контроля и юстировки рефлектора обсерватории «Миллиметрон» // Автометрия. 2020. № 4 (56). С. 48–60.
17. Завьялов П. С., Кравченко М. С., Жимулева Е. С. Применение метода ножа фуко для адаптации зеркальной системы обсерватории "Миллиметрон" // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. № 1 (8). С. 27–34.
18. Калинин А. В. Радиоголография больших антенн // Вестник нижегородского университета им. НИ Лобачевского. 2011. № 5–3. С. 175–182.
19. Козачок А. Г. Голографические измерительные системы // Автометрия. 1992. № 6. С. 4.

20. Лавринов В. В., Лавринова Л. Н., Туев М. В. Реконструкция волнового фронта по результатам преобразования светового поля датчиком Шэка–Гартмана // *Автометрия*. 2013. № 3 (49). С. 111–120.
21. Максutow Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики / Д. Д. Максutow, Рипол Классик, 1984.
22. Паршиков А. А. Разработка и исследование остронаправленных зеркальных антенн для радиосистем миллиметрового диапазона: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. к. т. н.: (05.12.07) // 1979.
23. Плотников М. Ю., Куликов А. В. Алгоритмы гомодинной демодуляции в фазовых волоконных акустооптических сенсорах: учебное пособие // Плотников МЮ, Куликов АВ СПб: Университет ИТМО. 2018.
24. Сарнадский В. Н. Система цифрового анализа полей неоднородных деформаций на основе накладных голографических интерферометров // *Автометрия*. 1986. № 5. С. 46.
25. Arai Y. Three-dimensional shape measurement beyond the diffraction limit of lens using speckle interferometry // *Journal of Modern Optics*. 2018. № 16 (65). С. 1866–1874.
26. Baars J. W. M. [и др.]. Near-field radio holography of large reflector antennas // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2007. № 5 (49). С. 24–41.
27. Barducci A., Pippi I. Analysis and rejection of systematic disturbances in hyperspectral remotely sensed images of the Earth // *Applied Optics*. 2001. № 9 (40). С. 1464–1477.
28. Creath K. Phase measurement interferometry techniques // *Progress in optics*. 1988. (26). С. 348–393.
29. De Nicola S. [и др.]. Fringe analysis for moiré interferometry by modification of the local intensity histogram and use of a two-dimensional Fourier transform method // *Measurement Science and Technology*. 2000. № 9 (11). С. 1328.
30. Freischlad K., Koliopoulos C. L. Fourier description of digital phase-measuring interferometry // *Josa a*. 1990. № 4 (7). С. 542–551.

31. Funnell W. R. J. Image processing applied to the interactive analysis of interferometric fringes // *Applied Optics*. 1981. № 18 (20). С. 3245–3250.
32. Gardner J. P. [и др.]. The James Webb Space Telescope // *Space Science Reviews*. 2006. № 4 (123). С. 485–606.
33. Ge Z. [и др.]. Coordinate-transform technique for closed-fringe analysis by the Fourier-transform method // *Applied Optics*. 2001. № 10 (40). С. 1649–1657.
34. Haible P., Kothiyal M. P., Tiziani H. J. Heterodyne temporal speckle-pattern interferometry // *Applied Optics*. 2000. № 1 (39). С. 114–117.
35. Ichioka Y., Inuiya M. Direct phase detecting system // *Applied optics*. 1972. № 7 (11). С. 1507–1514.
36. Jacquot P. Speckle Interferometry: A Review of the Principal Methods in Use for Experimental Mechanics Applications // *Strain*. 2008. № 1 (44). С. 57–69.
37. Kujawinska M., Wojciak J. High accuracy Fourier transform fringe pattern analysis // *Optics and lasers in engineering*. 1991. № 4–5 (14). С. 325–339.
38. Kujawinska M., Wojciak J. Spatial phase-shifting techniques of fringe pattern analysis in photomechanics SPIE, 1991.C. 503.
39. Larkin K. G., Oreb B. F. New seven-sample symmetrical phase-shifting algorithm SPIE, 1993.C. 2–11.
40. Liu J. B., Ronney P. D. Modified Fourier transform method for interferogram fringe pattern analysis // *Applied optics*. 1997. № 25 (36). С. 6231–6241.
41. Mast A. W. Electronic Antenna Calibration System and Measurements for compensating real-time dynamic distortions IEEE, 2010.C. 1–12.
42. Mastin G. A., Ghiglia D. C. Digital extraction of interference fringe contours // *Applied optics*. 1985. № 12 (24). С. 1727–1728.
43. Nösekabel E. H., Ernst T., Haefker W. Measurement of the thermal deformation of a highly stable antenna with pulse ESPI SPIE, 2007.C. 845–854.
44. Owner-Petersen M. Digital speckle pattern shearing interferometry: Limitations and prospects SPIE Optical Engineering Press, 1996.C. 385–393.

45. Pedrini G., Pfister B., Tiziani H. Double Pulse-electronic Speckle Interferometry // *Journal of Modern Optics*. 1993. № 1 (40). С. 89–96.
46. Pedrini G., Tiziani H. J. Double-pulse electronic speckle interferometry for vibration analysis // *Applied optics*. 1994. № 34 (33). С. 7857–7863.
47. Pfeiffer E. K. [и др.]. *Highly stable antenna structure technologies* Citeseer, 2010.
48. Robinson D. W., Williams D. C. Digital phase stepping speckle interferometry // *Optics communications*. 1986. № 1 (57). С. 26–30.
49. Roddier C., Roddier F. Interferogram analysis using Fourier transform techniques // *Applied optics*. 1987. № 9 (26). С. 1668–1673.
50. Servin M., Rodriguez-Vera R. Two-dimensional Phase Locked Loop Demodulation of Interferograms // *Journal of Modern Optics*. 1993. № 11 (40). С. 2087–2094.
51. Slettemoen G. Å., Wyant J. C. Maximal fraction of acceptable measurements in phase-shifting speckle interferometry: a theoretical study // *JOSA A*. 1986. № 2 (3). С. 210–214.
52. Spooren R. Double-pulse subtraction TV holography // *Optical Engineering*. 1992. № 5 (31). С. 1000–1007.
53. Stetson K. A. Vibratory strain field measurement by transverse digital holography // *Applied Optics*. 2015. № 27 (54). С. 8207–8211.
54. Takeda M. Fourier fringe analysis and its application to metrology of extreme physical phenomena: a review // *Applied Optics*. 2013. № 1 (52). С. 20–29.
55. Thalmann R., Dandliker R. High resolution video-processing for holographic interferometry applied to contouring and measuring deformations SPIE, 1985.С. 299–306.
56. Van der Auweraer H. [и др.]. *Industrial applications of pulsed-laser ESPI vibration analysis*. 2001.С. 490–496.

57. Wang Y. [и др.]. Synchronous measurement of three-dimensional deformations by multicamera digital speckle patterns interferometry // *Optical Engineering*. 2016. № 9 (55). С. 091408–091408.

58. Xu Y., Guan F. Structure design and mechanical measurement of inflatable antenna // *Acta Astronautica*. 2012. (76). С. 13–25.

59. Yang L. [и др.]. Review of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) for three dimensional displacement measurement // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2014. № 1 (27). С. 1–13.

60. Yatagai T. [и др.]. Automatic fringe analysis using digital image processing techniques // *Optical Engineering*. 1982. № 3 (21). С. 432–435.

61. Zavyalov P. [и др.]. Approach to controlling the position of the space observatory “Millimetron” mirror elements by the high-precision system IEEE, 2022.С. 1–5.

62. Zavyalov P. S. [и др.]. Investigation of the metrological characteristics of the PulsESPI system applied to the precision inspection of thermal deformations // *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2019. № 2 (20). С. 210–218.

63. Zavyalov P. S. [и др.]. Development of a two-channel system for monitoring the mirror elements of the Millimetron space observatory // *Applied Optics*. 2022. № 2 (61). С. 588–596.

64. Zavyalov P. S. [и др.]. High Precision Measurements of Thermal Deformations of Spacecraft Reflectors // *Instruments and Experimental Techniques*. 2023. № 1 (66). С. 127–138.

65. Zhang H. [и др.]. Precise Detection of Wrist Pulse Using Digital Speckle Pattern Interferometry // *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 2018. № 1 (2018). С. 4187349.

66. Zhang Z., Zhong J. Spatial quasi-phase-shifting technique for single-frame dynamic fringe analysis // *Optics Express*. 2014. № 3 (22). С. 2695–2705.

67. Космическая обсерватория Миллиметрон [Электронный ресурс]. URL: <https://www.millimetron.ru/osnovnye-parametry/antenna>.

68. 3D Puls-ESPI System (Q-600) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=857>.
69. 3D ESPI System (Q-300) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=854>.
70. Electronic Speckle Pattern Interferometer (ESPI) Model: HO-ED-INT-15, Holmarc Opto-Mechatronics Ltd [Электронный ресурс]. URL: https://www.holmarc.com/speckle_interferometer.php.
71. Zemax [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zemax.com/>.
72. Система измерения термодформаций поверхностей // Подсистема «АРШИН» [Электронный ресурс]. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1387412>.
73. Системы лазерные координатно-измерительные // Подсистема «АРШИН» [Электронный ресурс]. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/367908>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ НА
ТЕРРИТОРИИ ПРЕДПРИЯТИЯ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ» ИМЕНИ
АКАДЕМИКА М. Ф. РЕШЕТНЕВА»**



Акционерное общество
«Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнёва»

ул. Ленина, ад. 52, г. Железногорск,
г.о. ЗАТО Железногорск,
Красноярский край,
Российская Федерация, 662072
ОКПО 10163039; ОГРН 1082452000290
ИНН/КПП 2452034898/785050001

тел. (3919) 76-40-02, 72-24-39
факс (3919) 72-26-35, 75-61-46
office@iss-reshetnev.ru
http://www.iss-reshetnev.ru

КТИ НП СО РАН
Директору КТИ НП СО РАН
П.С. Завьялову
ул. Русская д. 41
Новосибирск, 630058

Исх. № 345-5/932 от 09.09.2025

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
научного сотрудника КТИ НП СО РАН
Кравченко Максима Сергеевича**

Результаты диссертационной работы Кравченко М.С. использовались в ходе выполнения договора № 1120187311701010128000310/711/233-16 КТИ НП СО РАН с АО «РЕШЕТНЕВ» от 1 августа 2016 г. на СЧ ОКР «Создание специализированного рабочего места определения 3D-термодеформаций поверхностей». Созданная система позволяет измерять деформацию объектов произвольной формы, в том числе плоской, параболической, гиперболической и др., глубиной не более 500 мм. Диаметр контролируемых объектов может достигать 1,5 м. Измерения могут выполняться на всех этапах термоциклирования: сушка, нагревание, охлаждение.

Результаты измерения рефлекторов методом спекл-интерферометрии на базе термовакуумных камер в России получены впервые. Межкадровая погрешность в условиях работы на базе термовакуумной камеры составила 1/10 часть интерференционной полосы. Суммарная погрешность измерений не превышает 1 мкм при обработке до 2000 кадров. Метод спекл-интерферометрии позволил уменьшить погрешность измерений рефлекторов при термовакуумных испытаниях: с 0,1 мм до 0,001 мм, в сравнении с методом лазерной дальнометрии.

Директор отраслевого центра крупногабаритных трансформируемых механических систем –
заместитель генерального конструктора по
механическим системам,
кандидат технических наук

Ф.К. Сильковский

Заместитель директора
главный инженер отраслевого центра
крупногабаритных трансформируемых
механических систем

В.А. Куклин

Исполнитель: Романенко Иван Валентинович,
тел.: (3919) 76-40-01 доб. 66-70