

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Конструкторско-технологическом институте приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН).

**Научный руководитель:** **Завьялов Петр Сергеевич**,  
кандидат технических наук,  
директор КТИ НП СО РАН.

**Официальные оппоненты:** **Двойнишников Сергей Владимирович**,  
доктор технических наук, Федеральное  
государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИТ СО РАН), лаборатория основ безопасности и  
эффективного использования реакторных установок,  
заведующий лабораторией;

**Никулин Дмитрий Михайлович**,  
кандидат технических наук, доцент, Федеральное  
государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Сибирский  
государственный университет геосистем и  
технологий» (СГУГиТ), кафедра фотоники и  
приборостроения, заведующий кафедрой.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт оптики атмосферы  
им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской  
академии наук.

Защита диссертации состоится «10» марта 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.347.02 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru).

Автореферат разослан \_\_\_ января 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент

Максим Андреевич Степанов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию деформаций поверхностей рефлекторов космических аппаратов методом цифровой спекл-интерферометрии и разработке измерительного комплекса для испытаний на базе термовакуумной камеры.

### **Актуальность и степень разработанности темы исследования**

На различных этапах создания рефлекторов антенн космических аппаратов необходимо выполнять прецизионный контроль их поверхности. В настоящее время 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 рефлекторов используются специальные материалы с минимальным тепловым расширением, такие как: бериллий («James Webb Space Telescope»), карбид кремния («Herschel Space Observatory»), астраситал («VISTA»), специальный углепластиковый композит («Миллиметрон») и др.

В процессе изготовления и испытаний рефлекторов влияние факторов космического пространства на их форму имитируется в термовакуумной камере. Измерения выполняются либо непосредственно в камере, либо с выносом измерительной аппаратуры за её пределы. Допустимая погрешность измерений не должна превышать  $\pm 1$  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 окно, прозрачное в видимом диапазоне спектра.

Наиболее подходящим и эффективным в обозначенных условиях измерений является метод цифровой спекл-интерферометрии благодаря его низкой погрешности измерений ( $\pm 1$  мкм) и широкой универсальности. Он получил обширное применение при неразрушающем контроле деформаций, смещений и вибраций. Метод позволяет контролировать объекты с оптически грубой (шероховатой) поверхностью без установки на объект каких-либо меток или отражателей. Для решения задачи контроля деформаций на базе термовакуумной камеры данный метод использован в России впервые. Большую роль в теоретическом и практическом исследовании данного метода сыграли труды Funnell W. R. J., Козачок А. Г., Pedrini G., Tiziani H. J., Robinson D. W., Williams D. C., Larkin K. G., Takeda M., Barducci A., Mast A. W., Nosekabel E. H., Wang Y., Жужукина А. И., Van der Auweraer H., Гужова В.И. и др.

### **Цель и задачи диссертации**

Целью диссертационной работы является создание оптико-электронного измерительного комплекса, обеспечивающего прецизионный контроль деформаций крупногабаритных элементов космических аппаратов в условиях термовакуумных 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 термовакуумной 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  $\pm 1$  мкм.

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

#### **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.

#### **Практическая значимость работы и результаты внедрения**

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.

#### **Апробация работы**

Результаты диссертации докладывались на следующих международных конференциях: Интерэкспо Гео-Сибирь (г. Новосибирск, 2017 г.), XXII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева 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 ИП 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.

## **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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обозначена актуальность темы исследования, определены цель и задачи диссертации, новизна и практическая значимость полученных результатов, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе**, имеющей обзорный характер, рассматривается историческое развитие метода спекл-интерферометрии от обработки изображений вручную до самых передовых методов, позволяющих определять 3D-деформации. Проанализировано применение исследуемого метода в разных областях промышленности. Рассматриваются различные объекты, обладающие свойством рассеяния лазерного излучения: металлические промышленные изделия, органические материалы, композитные материалы и др. Приводятся промышленные решения на основе метода цифровой спекл-интерферометрии. Показано, что метод спекл-интерферометрии имеет широкий спектр применений из-за уникальной точности (до  $\lambda/100$ ) измерений шероховатых, крупногабаритных объектов без установки на их поверхность дополнительных меток.

Метод спекл-интерферометрии основан на сравнении двух состояний объекта – начального и деформированного. В результате их программного вычитания получается интерферограмма, которая расшифровывается и преобразуется в поле перемещений контролируемой поверхности. Так как измерения дифференциальные, то удается исключить влияние факторов, вносящих постоянную величину ошибки. Поэтому не требуется предварительной калибровки средства измерения, что является несомненным преимуществом метода.

Для решения задачи контроля деформаций при термовакуумных испытаниях наиболее применим метод импульсной спекл-интерферометрии, который хорошо себя показывает в условиях высокой вибрации. Для измерения рефлекторов достаточно одного направления деформации, соответственно одного спекл-интерферометра (СИ). Выбран метод пространственного фазового сдвига, так как он позволяет с помощью одного кадра получать информацию о величине фазы.

**Вторая глава** посвящена исследованию погрешности измерений в зависимости от ошибки задания угла пространственного фазового сдвига и на основе этого определению требований к оптической схеме СИ. В главе представлены результаты компьютерного моделирования СИ без объектива, с объективом, с телецентрическим объективом. Изучено влияние точности задания

сдвига на погрешность измерений. Для подтверждения результатов моделирования приведены данные экспериментальных исследований.

Суть метода пространственного фазового сдвига заключается в создании строго определенной разности фаз между соседними пикселями посредством наклона опорной волны относительно предметной. Тем самым задается период пространственного фазового сдвига, в пределах которого, сдвигая попиксельно зарегистрированное изображение, получаем два дополнительных изображения, которые необходимы для получения спекл-интерферограммы и устранения фазовой неоднородности. Например, можно реализовать трехшаговый метод восстановления фазы и использовать следующее выражение:

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

где  $I_{\text{рез.1}}$ ,  $I_{\text{рез.2}}$ ,  $I_{\text{рез.3}}$  – интенсивность спекл-изображения,  $\varphi$  – фаза.

Для исследования ошибки задания сдвига на погрешность измерений проводилось моделирование оптической схемы СИ в программном пакете для расчета и проектирования оптических систем Zemax OpticStudio. Предложена модель СИ в геометрическом приближении. 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.

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

$$\theta = \arcsin \left( \frac{\lambda}{p_M} \right), \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны лазера;  $p_M$  – период пространственного фазового сдвига.

По данной формуле теоретически рассчитывается угол между опорной и предметной волной, который в реальном эксперименте устанавливается всегда с некоторой ошибкой. Её влияние и определялось при моделировании.

В ходе моделирования регистрировались две картины: исходное состояние объекта (без воздействия) и его деформированное состояние. 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. При ошибочно заданном пространственном фазовом сдвиге на карте деформаций появляется некоторая модуляция, приводящая к ошибке измерений около 0,005 – 0,025 мкм.

Величина модуляции зависит от ошибки задания угла наклона опорной волны относительно предметной. Формула расчета фазы (1) работает корректно, если  $p_M$  из выражения (2) 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 СИ необходимо было оценить ошибку задания пространственного фазового сдвига на всем изображении при разных размерах пикселей фотоприемной матрицы (взяты типовые размеры  $p_M = 2, 3,5$  и  $5$  мкм,  $\theta = 1,5^\circ, 2,2^\circ, 3,9^\circ$ ). В зависимости от величины удаления от расчетного угла наклона получили увеличение среднеквадратичного отклонения (СКО) от линейного тренда задаваемой деформации (рисунок 1).

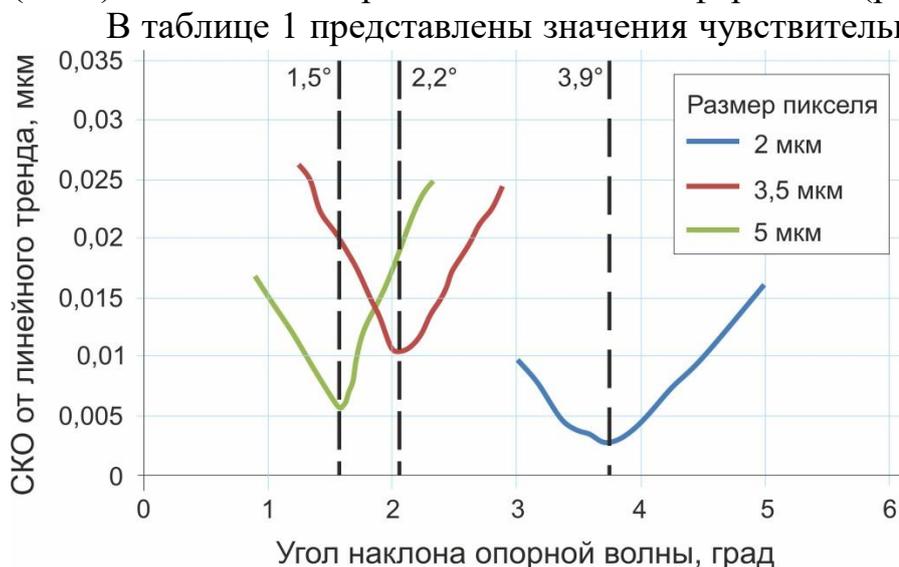


Рисунок 1 – Влияние точности задания пространственного фазового сдвига на ошибку измерения деформаций

вносимой погрешности измерений при неточности установки угла наклона 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 1 – Погрешность, полученная при моделировании разных размеров пикселей

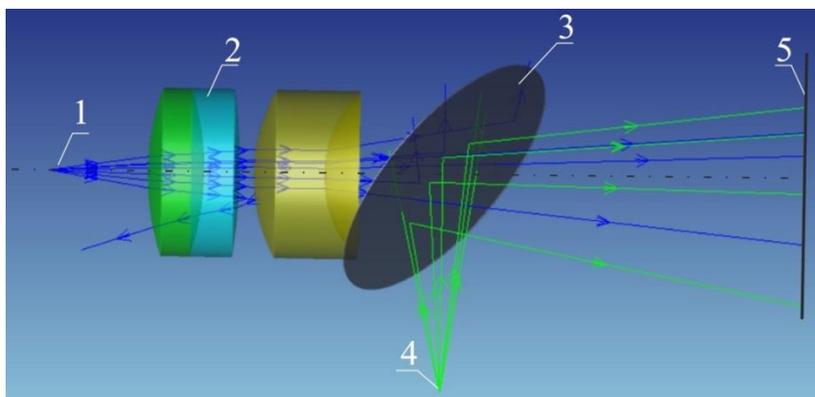
Размер пикселя, мкм	Чувствительность к изменению угла, мкм/град
2	0,006
3,5	0,014
5	0,016

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 такие фотоприёмники обладают меньшей чувствительностью и большими шумами.

В реальных 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 СИ был введен проекционный объектив и повторно проведено исследование влияния ошибки установки наклона опорной волны на погрешность метода (рисунок 2). Для этого в плоскость апертурной диафрагмы объектива помещается точечный источник 1, который моделирует объектную волну, попадающую на цифровую 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.

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 1 и 0,07 мкм для объектива 2. Нетелецентричность объективов при этом  $5,2^\circ$  и  $1,3^\circ$  соответственно. При приближении к параллельному ходу лучей ошибка уменьшается.



1 – источник объектной волны, расположенная в плоскости апертурной диафрагмы, 2 – объектив, 3 – полупрозрачное зеркало,

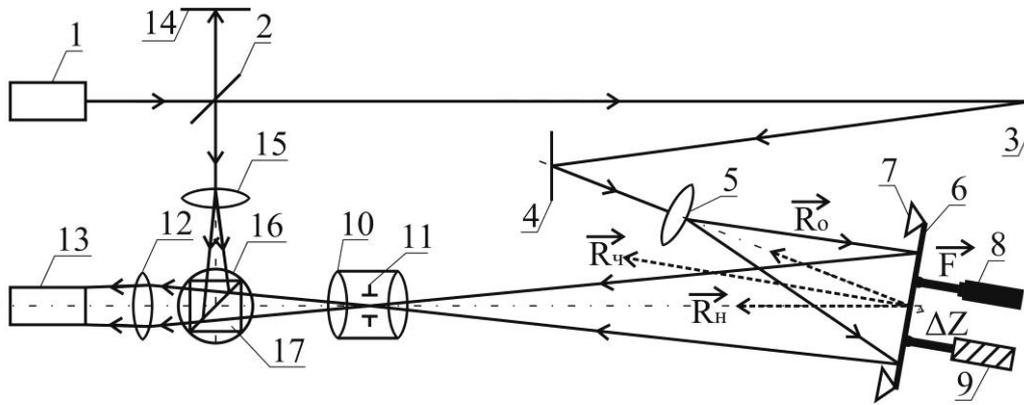
4 – источник опорной волны, 5 – матрица

Рисунок 2 – Математическая модель СИ с объективом

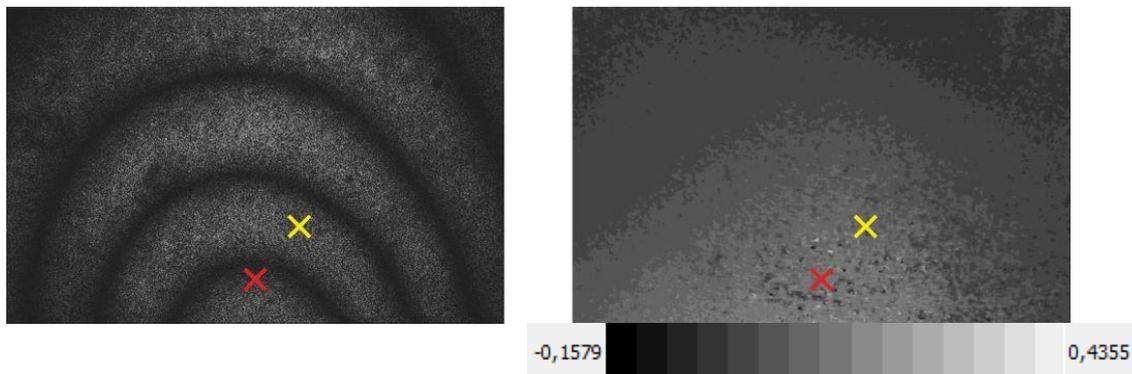
Основной вклад в погрешность вносит то, что оба объектива имеют существенную нетелецентричность в пространстве изображений ( $5,2^\circ$  и  $1,3^\circ$  соответственно). Таким образом, получается, что в центре изображения выполняется условие (2) для фазового сдвига, а на периферии уже имеется существенное расхождение и оно тем меньше, чем выше телецентричность объектива в пространстве изображений.

Для проверки результатов моделирования собран лабораторный стенд СИ на основе метода пространственного фазового сдвига (рисунок 3). 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.

Деформация регистрируется в направлении разности вектора освещения  $\vec{R}_0$  и вектора наблюдения  $\vec{R}_H$ , которые образуют вектор чувствительности интерферометра  $\vec{R}_\psi$ . В схеме он совмещен со штоком преобразователя линейных перемещений (ЛИР), погрешность  $\pm 0,5$  мкм (далее – ЛИР). Величина деформации, которая может быть получена с помощью одного измерения, ограничивается количеством полос, которые различаются на изображении, и составляет порядка нескольких микрометров. Для измерения большей суммарной деформации (10-200 мкм) необходимо зарегистрировать и обработать несколько кадров, а полученные данные затем попиксельно сложить. На рисунке 4 красным крестом обозначено место, к которому прилагалась нагрузка, а желтым – место измерения ЛИР. Показания ЛИР  $\Delta Z_{\text{лир}}$  сравнивается со значением из карты деформаций, полученной СИ  $\Delta Z_{\text{СИ}}$ .



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 – проекционный объектив; 11 – апертурная диафрагма; 13 – цифровая матрица; 16 – светоделительный кубик; 17 – поворотная платформа  
Рисунок 3 – Схема лабораторного стенда для исследования метода пространственного фазового сдвига



Интерференционные полосы,  
деформация  $\sim 0,5$  мкм

а)

Карта деформаций

б)

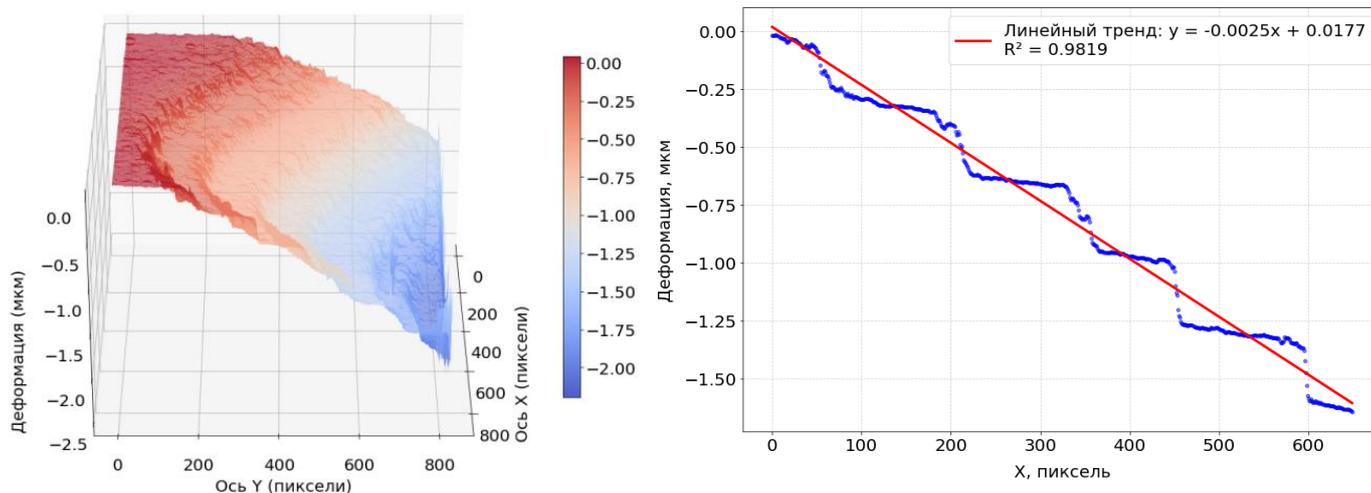
Рисунок 4 – Результаты однократного измерения. Красный крест – место приложения нагрузки, желтый крест – место расположения ЛИР

При помощи актуатора объект измерения в автоматическом режиме пошагово деформировался на установленную величину. Выполнялся анализ ошибки установки угла наклона опорной волны. Для этого светоделительный кубик 16 поворачивался с помощью поворотной платформы 17. Так, при расчетном наклоне опорной волны  $3,5^\circ$  мы физически задали наклон  $1^\circ$ . Получили ошибку определения деформации  $0,4$  мкм в 1 измерении и модуляцию относительно линейного тренда (рисунок 5).

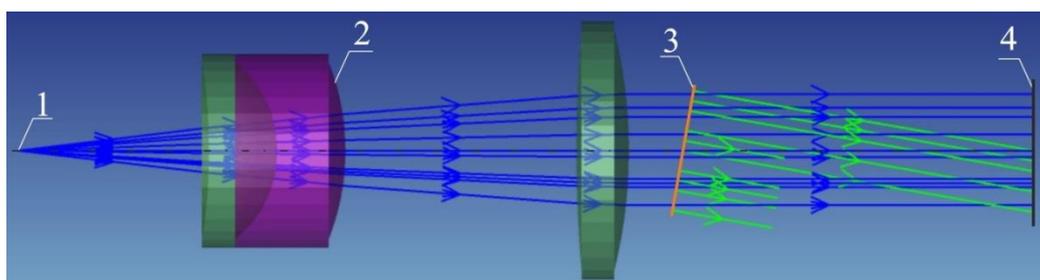
При дальнейшей разработке СИ было решено найти оптимальный вариант оптической схемы, в которой устранены возникающие ошибки восстановления волнового фронта за счет создания параллельного хода лучей в приемной части объектива.

Для этого был рассчитан телецентрический в пространстве предметов объектив (показана только его приемная часть), который использован в математической модели СИ (рисунок 6). В плоскость его апертурной диафрагмы 2

помещался точечный источник 1, который моделирует объектную волну. Опорная волна выбрана плоской и расположена между последней линзой и фотоприёмной матрицей. Пространственный фазовый сдвиг задаётся наклоном этой волны.



а) Карта деформаций  
 б) Срез значений деформаций по оси X  
 Рисунок 5 – Карта деформаций, полученная на стенде и срез с нее по оси X

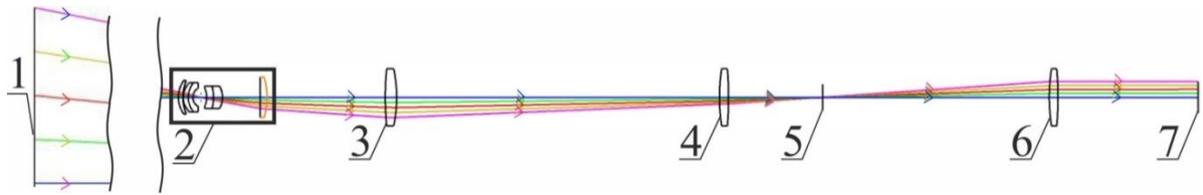


1 – объектная волна, расположенная в плоскости апертурной диафрагмы,  
 2 – приемная часть телецентрического в пространстве предметов объектива,  
 3 – опорная волна, 4 – матрица

Рисунок 6 – Телецентрический в пространстве предметов объектив в математической модели СИ

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

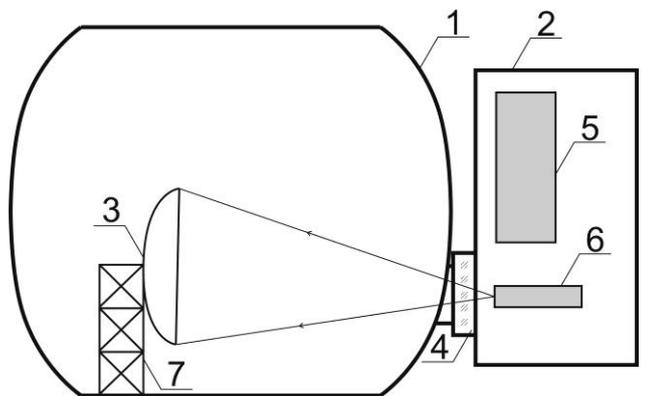
Поэтому, для работы СИ с большими объектами была рассчитана система с телецентрическим ходом лучей (не более 0,05°) в пространстве изображений (рисунок 7). В ней объект 1 имеет размер 1 м. Проекционным объективом (может быть использован любой стандартный объектив с  $f' = 25 - 100$  мм) 2 излучение от 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.



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

Рисунок 7 – Оптическая система регистрации объекта размером 1 м и с телецентрическим ходом лучей в пространстве изображений

В результате моделирования и экспериментальных исследований СИ с пространственным фазовым сдвигом получены величины ошибок при разных значениях телецентричности в пространстве предметов. Заключение, что при проектировании систем на основе метода СИ, требующих регистрации большого числа кадров (несколько тысяч), рекомендуется использовать объективы с высокой телецентричностью в пространстве изображений (не менее  $0,05^\circ$ ). Предложен пример подобной оптической системы, который будет использоваться в дальнейших исследованиях.



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

Рисунок 8 – Схематичное расположение измерительного комплекса и термовакуумной камеры

создавать внутри себя средний-высокий вакуум ( $10^{-5} - 10^{-2}$  Па), а для охлаждения внутреннего объема использует жидкий азот. Оптическое излучение для освещения объектов от лазера СИ 5 попадает внутрь камеры через оптический иллюминатор 4. Рассеянное излучение регистрируется фотоприемным блоком 6. Вокруг измерительного комплекса поддерживается заданная оператором температура, а все данные с него резервируются и сохраняются информационной системой комплекса.

Сам измерительный комплекс является СИ (рисунок 9), создан на основе мощного импульсного лазера (энергия в импульсе 1 Дж, длительность импульса 20 нс, длина когерентности 1 м, длина волны 694 нм) и реализует метод пространственного фазового сдвига. Импульсный лазер позволяет выполнять

мгновенную регистрацию объекта, что дает возможность в условиях вибраций (насосы термовакuumной камеры) или подвижности объекта корректно выполнять измерения.

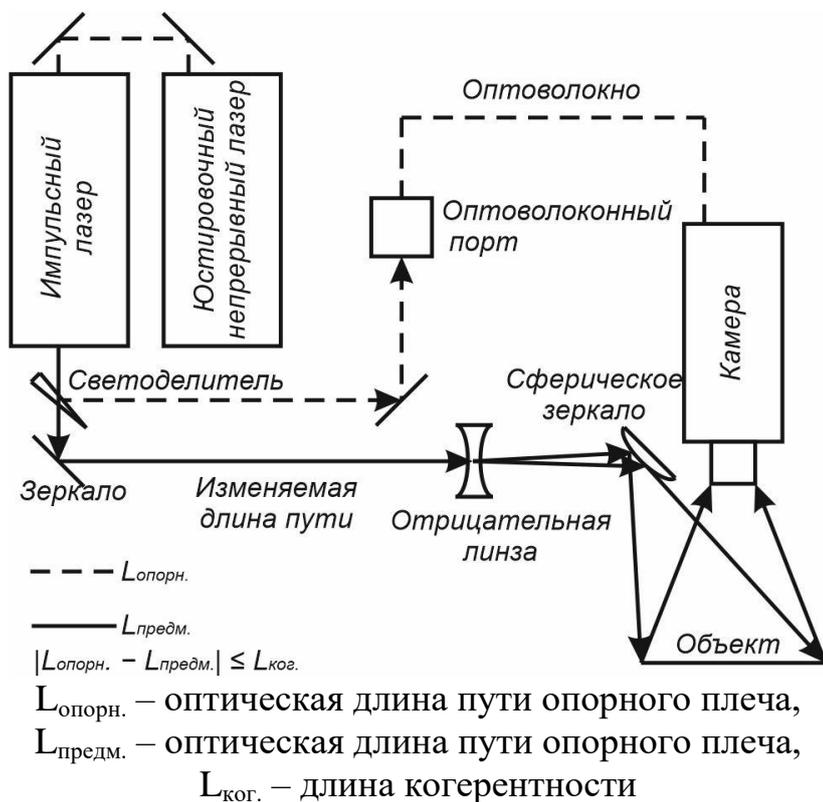


Рисунок 9 – Оптическая схема СИ

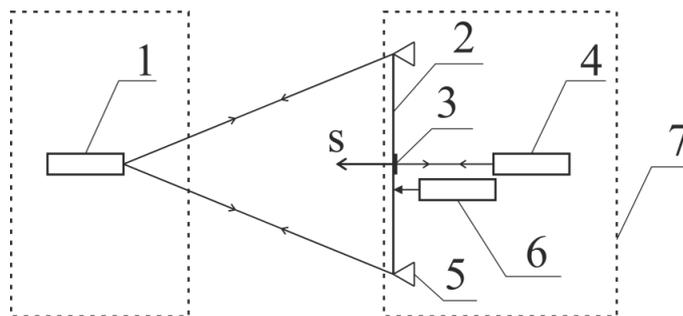
и направление измерения линейного перемещения Renishaw XL-80 совпадают.

В результате проведения аттестации СИ получены следующие его характеристики: максимальная измеряемая деформация между двумя последовательными измерениями (кадрами) не более 5 мкм (при большем шаге некорректно вычисляется величина деформации); максимальная суммарная деформация за весь период испытаний, при которой погрешность не превышает  $\pm 1$  мкм, не более 200 мкм.

Основной особенностью измерительного комплекса является наличие иллюминатора в оптической системе. Для оценки влияния изменений параметров среды и расчета допусков расположения оптических элементов было проведено математическое моделирование оптической системы СИ при измерении через оптический иллюминатор (выполнен из плавленого кварца КИ ГОСТ 15130-86) деформаций объекта, находящегося в термовакuumной камере.

измерения.

СИ испытан согласно разработанной и утвержденной методике утверждения типа средство измерения и внесен в Реестр средств измерений России под номером 81555-21. Стенд для проведения испытания представлен на рисунке 10. В качестве результатов измерений выполняется сравнение между перемещением, которое регистрирует контрольное средство измерения (Renishaw XL-80), и соответствующим измерением СИ, полученным с карты деформаций в заданной точке. Это возможно благодаря тому, что вектор чувствительности  $S$  СИ и



- 1 – СИ, 2 – плоский алюминиевый лист размером 1,5×1,5 м, 3 – угловой отражатель, 4 – интерферометр перемещений Renishaw XL-80, 5 – крепление алюминиевого листа, 6 – актуатор, 7 – массивное основание,  $S$  – вектор чувствительности СИ

Рисунок 10 – Схема стенда для испытаний СИ

На рисунке 11 представлена 3D-модель оптической системы, созданная в программном пакете Zemax OpticStudio. Анализ производился в последовательном режиме работы. При этом моделировались следующие оптические эффекты: преломление; отражение (в т.ч. френелевское); интерференция; дифракция; поляризационные эффекты, рассеяние и другие. Кроме того, моделировалось изменение геометрии оптических элементов и температурное изменение показателей преломления.

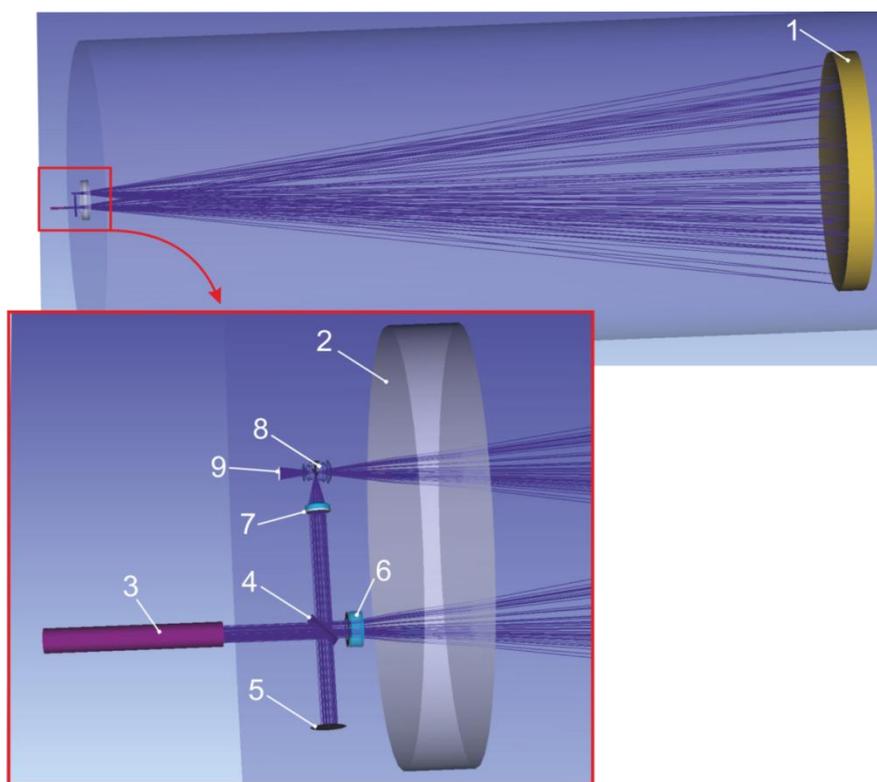
Используя возможности созданной модели оптической системы, промоделированы следующие ситуации: смещение, наклон, температурные изменения иллиминатора, изменение температуры среды вокруг измерительной системы; изменение атмосферного давления вокруг измерительной системы.

Полученные расчеты показали, что наиболее критичным является возникновение градиента температуры в окне иллиминатора, при котором ошибка достигает 0,7 мкм при градиенте около 50°C. Чтобы избежать возникновения этой ошибки, по периферии окна предусмотрен нагревательный элемент, с помощью которого выполняется поддержание температуры на уровне (20±1)°C. Ошибка при этом уменьшается до 10-15 нм.

Другим источником погрешности может являться оснастка

измеряемого объекта, из-за недостаточной жесткости которой в процессе измерения рефлектор может перемещаться, при этом не деформируясь. Показано, что при смещении на 2 мм сферического объекта радиусом 1,5 м и после выполнения аффинного преобразования получаем величину деформации до 2 мкм. Устранить программно данные деформации очень затруднительно, так как объект может перемещаться во всех трех координатах, при том, что перемещения эти могут быть цикличны. В таком случае отличить реальную деформацию объекта от ложной деформации, возникшей в результате смещений объекта, невозможно.

**Четвертая глава** посвящена измерению прототипов рефлекторов космических аппаратов, обработке экспериментальных данных и оценке погрешностей, возникающих при измерениях СИ на базе термовакуумной камеры.



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

Рисунок 11 – Модель СИ в программном обеспечении Zemax OpticStudio

Полученные в главе 3 результаты позволяют говорить о возможности применения данного измерительного комплекса для прецизионного контроля деформаций крупногабаритных объектов, таких как рефлекторы и элементы зеркальных систем космических аппаратов в условиях имитации факторов воздействия космического пространства на базе термовакуумной камеры. В рамках испытаний на территории АО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнёва» исследовано три объекта из углепластика. Объекты являются прототипами рефлекторов, имеют параболическую и гиперболическую формы поверхности и различаются по диаметру (от 600 до 1200 мм).

Измерительный комплекс работал на всех этапах термоциклирования (сушка, нагревание, охлаждение) и перенастраивался между разными объектами в процессе работы вакуумной камеры. На первых двух этапах испытания выполнены успешно, особенностей выявлено не было, результаты представлены на рисунках 12 а, 12 в, 12 д. При охлаждении же значительная часть данных была потеряна из-за высокой скорости перемещения/деформации объекта или его оснастки. Контроль объекта 3 выполнен при нагревании из охлажденного состояния, результаты представлены на рисунке 12 д. Аналогичные результаты получены с помощью лазерного радара серии MV350E (рисунки 12 б, 12 г, 12 е).

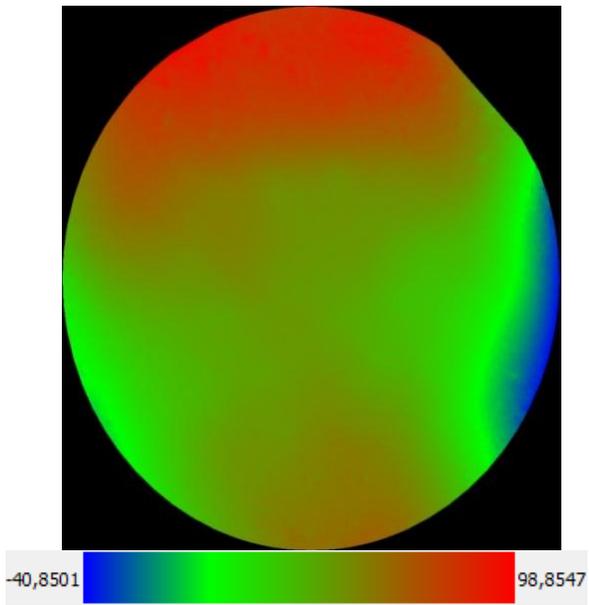
Видно, что характер деформаций в целом совпадает с данными измерительного комплекса. При этом можно наблюдать значительное количество локальных выбросов на измерениях радара. Они преимущественно связаны с погрешностью измерений радара, которая на расстоянии 5,5 м составляет порядка 125 мкм при измеряемой величине в диапазоне от минус 50 до плюс 100 мкм. Следовательно, радар позволяет только оценить примерную величину деформаций. Результаты измерения рефлекторов измерительным комплексом получены с интерферометрической точностью, и потому имеют более гладкий характер, плавные изменения деформации являются более информативными (видны мелкие детали). В России на базе термовакуумных камер такие данные получены впервые.

На базе полученных экспериментальных данных, выполнена оценка погрешности на основе реальных измерений. Вначале были исключены заведомо ошибочные кадры, возникшие из-за сложных условий измерений, которые привели к пропуску полос при расшифровке карты деформаций. Измерительный комплекс предполагает многократное измерение деформаций объекта (несколько тысяч измерений). Процесс испытаний достаточно длительный, происходит изменение внешних условий (температуры, давления, влажности воздуха) на пути луча, а также изменение температуры иллюминатора и расширение основания, на котором стоит оптическая система.

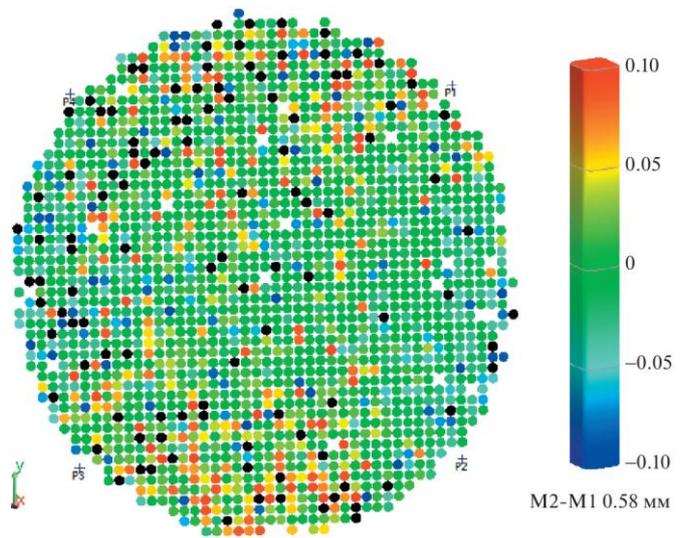
Измерительный комплекс, выполняя цикл обработки, вносит свой вклад в ошибку из-за несовершенства преобразования спекл-интерферограммы в карту деформаций и шумов на изображении. В результате в каждом пикселе изображения объекта осуществляется сложение измеренных небольших или почти нулевых деформаций (десятки нанометров):

$$D_s = \sum_{i=1}^N d_i, \quad (3)$$

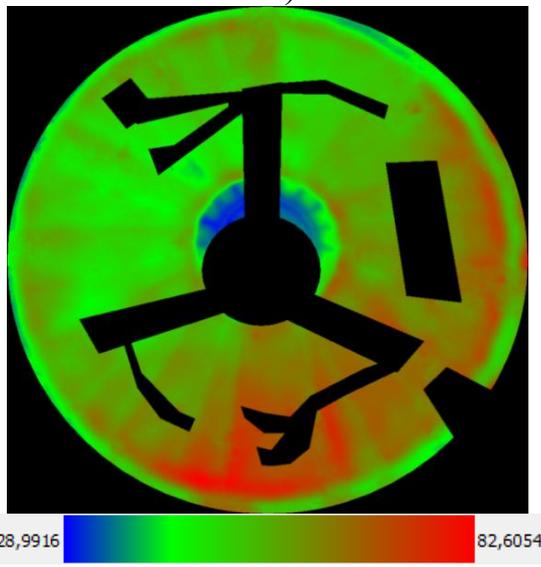
где  $D_s$  – суммарная деформация в каждом пикселе изображения объекта;  $N$  – число измерений;  $d_i$  – единичная деформация (с одного изображения) в каждом пикселе изображения объекта.



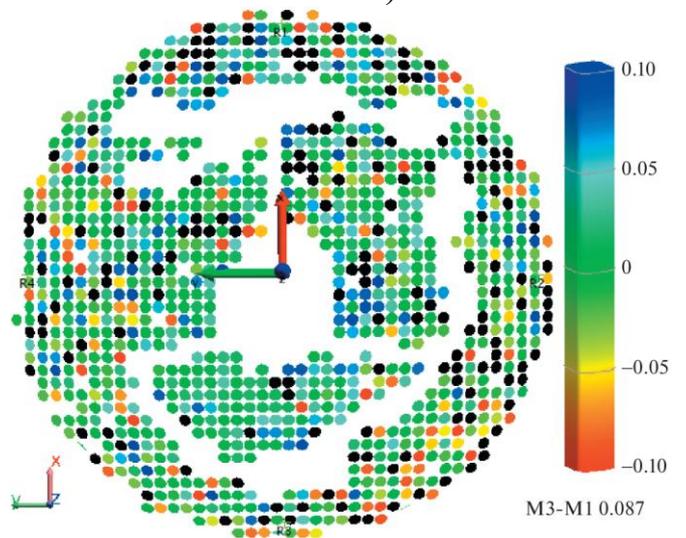
а)



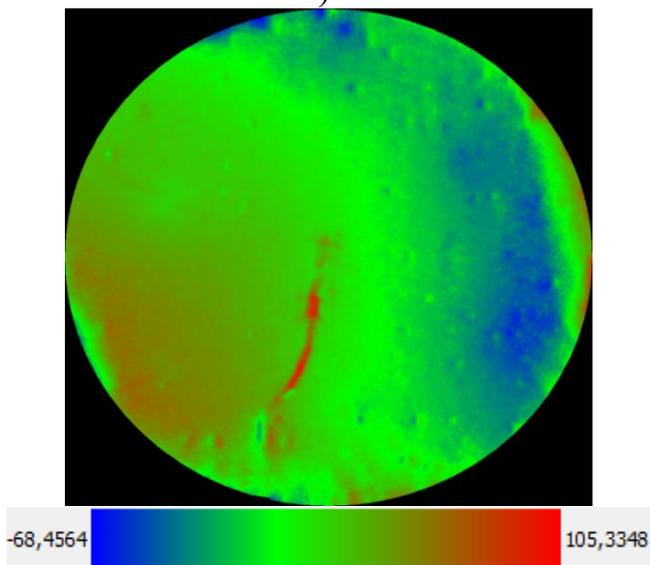
б)



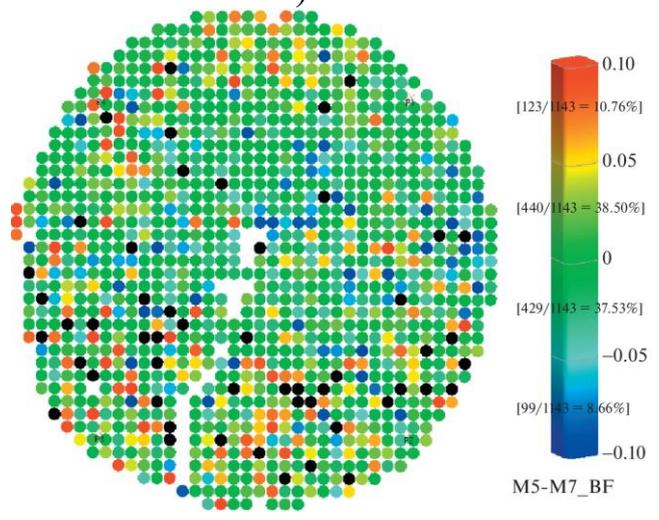
в)



г)



д)



е)

а), в), д) данные с измерительного комплекса для объектов 1, 2, 3 соответственно;  
 б), г), е) измерения выполненные лазерным радаром объектов 1, 2, 3 соответственно  
 Рисунок 12 – Карты деформаций рефлекторов из углепластика

Учтем, что у прибора имеется некоторая инструментальная погрешность единичного измерения –  $\delta d$ . Поскольку распределение ошибок единичных измерений является нормальным, суммарная погрешность всего измерения может быть вычислена по следующей формуле:

$$\delta D = \delta d \cdot \sqrt{N}. \quad (4)$$

Для расчета погрешности измерений необходимо вычислить погрешность единичного измерения  $\delta d$ . Её величину можно оценить по полученным картам деформаций (рис. 12 а, 12 в, 12 д). На суммарной картине деформаций были взяты срезы со всех трех объектов. При этом визуально выбирались следующие области: объект 1 со средним уровнем шума, объект 2 с низким уровнем шума, объект 3 с высоким уровнем шума (рисунок 13). Таким образом, при оценке погрешности учитывались данные со всех трех объектов и с участков разных по качеству полученных изображений с точки зрения помех. По срезу можно оценить уровень шума на карте деформаций между соседними точками измерений, взяв разницу значений деформации в срезе и бегущего среднего значения по срезам всех изображений.

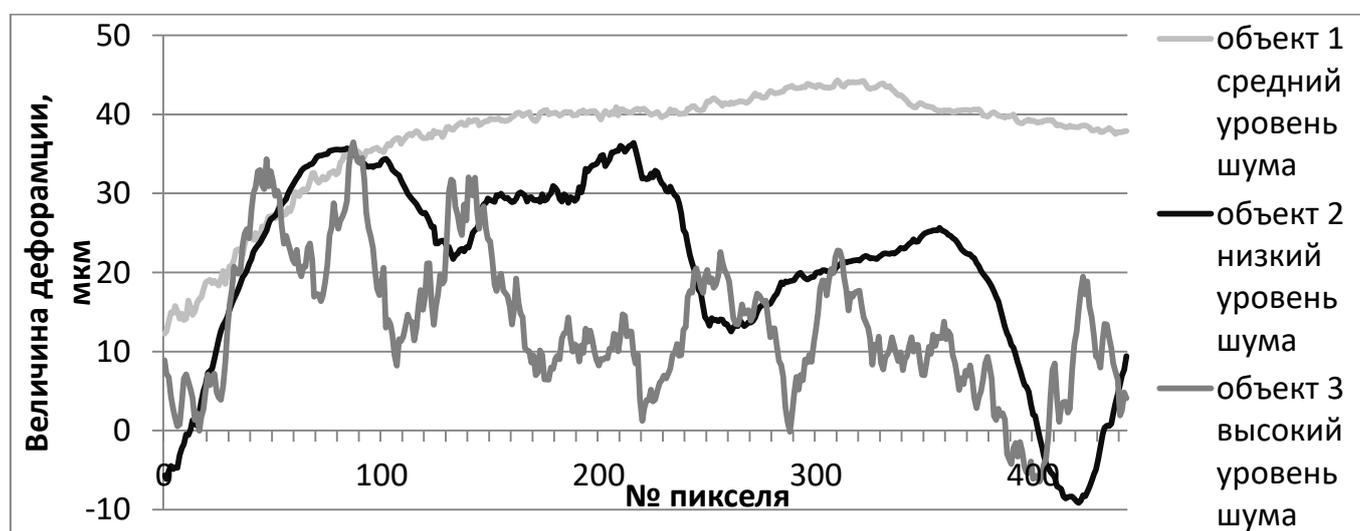


Рисунок 13 – Срезы по все трем объектам, выбранные из центральных частей карт деформаций

Для объекта 1 СКО суммарных деформаций составило 0,3 мкм на визуально гладких участках и 0,8 мкм на визуально шумных участках. Количество кадров при этом 788. У объекта 3 эти значения выше: от 0,8 до 1,5 мкм, но при этом количество кадров значительно больше – 2000.

Величина уровня шума принимается за итоговую погрешность  $\delta D$  для каждого объекта. Тогда погрешность единичного измерения можно вычислить по следующей формуле:

$$\delta d = \frac{\delta D}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

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 выражение 4, получим суммарную погрешность при испытаниях (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Погрешность, полученная при испытаниях

Номер объекта	Полученная погрешность, мкм	Количество измерений
1	0,7	800
2	0,64	600
3	1,11	2000

Полученные результаты говорят о том, что погрешность измерений зависит от количества зарегистрированных кадров. Так, при количестве кадров 2000 накапливается ошибка 1 мкм. Для её уменьшения необходимо снижать уровень шума на объекте за счет снижения вибрационной нагрузки, чтобы была возможность регистрации более гладких картин. Так же 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.

**В приложении А** представлен акт о внедрении результатов диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена задача измерения деформаций рефлекторов космических аппаратов на базе термовакуумной камеры с погрешностью  $\pm 1$  мкм методом цифровой спекл-интерферометрии.

Теоретически, с помощью математического моделирования в программном обеспечении Zemax OpticStudio, и практически, на лабораторном стенде, исследован метод пространственного фазового сдвига. Получены значения погрешности измерений в зависимости от ошибки задания угла наклона опорной волны (пространственный фазовый сдвиг). Обоснованы требования к точности задания пространственного фазового сдвига и предложен вариант оптической схемы СИ.

Разработан подход для оценки метрологических характеристик СИ. В нем измерения деформации СИ рассматривается как линейное перемещение каждой из точек объекта. Совместив вектор чувствительности СИ и эталонного линейного измерителя перемещений можно оценить метрологические характеристики. В результате проведенных испытаний спек-интерферометра получены значения: максимальная деформация поверхности между двумя последовательными измерениями (кадрами) составляет не более 5 мкм; максимальная суммарная деформация за весь период испытаний, при которой погрешность не превышает  $\pm 1$  мкм, не более 200 мкм. С полученными характеристиками СИ внесен в Реестр средств измерений России под номером 81555-21.

Выполнена теоретическая оценка погрешностей измерений. Произведена оценка влияния изменений параметров при измерении деформаций объекта, находящегося в термовакуумной камере, через окно иллюминатора. Ошибка может достигать 0,7 мкм при градиенте на окне иллюминатора около  $50^{\circ}\text{C}$ .

Впервые в России сделан и успешно апробирован комплекс измерения деформаций, который создан на основе СИ. Получены величины деформаций объектов всех представленных АО «Информационные спутниковые системы имени

академика М. Ф. Решетнёва» форм (в том числе плоской, параболической, гиперболической) и на всех этапах термоциклирования (сушка, нагревание, охлаждение). Диаметр контролируемых объектов достигал 1,5 м.

На основе реальных измерений в термовакуумной камере оценена погрешность измерений величины деформации прототипов рефлекторов параболической и гиперболической форм. Для объектов 1, 2, 3 она составила 0,7; 0,64; 1,11 мкм соответственно при количестве измерений 800, 600 и 2000 соответственно. На основе данных заключено, 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 и не его перемещение как твердого целого.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и приравненных к ним:*

1. Высокоточные измерения термдеформаций рефлекторов космических аппаратов / П. С. Завьялов, М. С. Кравченко, К. И. Савинов, М. В. Савченко, А. В. Белобородов // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 1. – С. 120-131. – DOI 10.31857/S0032816222060234.

Переводная версия журнала входит в базу данных Scopus и Web of Science: High Precision Measurements of Thermal Deformations of Spacecraft Reflectors / P. S. Zavyalov, M. S. Kravchenko, K. I. Savinov, M. V. Savchenko, A. V. Beloborodov // Instruments and Experimental Techniques. – 2023. – Vol. 66, No. 1. – P. 127-138. – DOI 10.1134/s0020441222060215.

2. Жимулева Е. С. Разработка телецентрических объективов для систем размерного контроля / Е. С. Жимулева, П. С. Завьялов, М. С. Кравченко // Автометрия. – 2018. – Т. 54. – № 1. – С. 61-70. – DOI 10.15372/AUT20180109.

Переводная версия журнала входит в базу данных Scopus: Zhimuleva, E. S. Development of Telecentric Objectives for Dimensional Inspection Systems / E. S. Zhimuleva, P. S. Zavyalov, M. S. Kravchenko // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2018. – Vol. 54. – No 1. – P. 52-60. – DOI 10.3103/S8756699018010090.

3. Завьялов П. С. Разработка системы контроля и юстировки рефлектора обсерватории "Миллиметрон" / П. С. Завьялов, М. С. Кравченко, Е. С. Жимулева // Автометрия. – 2020. – Т. 56. – № 4. – С. 48-60. – DOI 10.15372/AUT20200406.

Переводная версия журнала входит в базу данных Scopus: Zavyalov, P. S. Control and Positioning System for Reflector of "Millimetron" Observatory: Design and Development / P. S. Zavyalov, M. S. Kravchenko, E. S. Zhimuleva // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2020. – Vol. 56. – No 4. – P. 356-367. – DOI 10.3103/S8756699020040159.

4. Бесконтактная система измерения геометрических параметров решеток ионных двигателей / П. С. Завьялов, Е. В. Власов, А. В. Белобородов,

М. С. Кравченко, А. А. Гущина, Д. В. Скоков // Фотоника. – 2023. – Т. 17. – № 8. – С. 622-631. – DOI 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.8.622.631.

*Работы в других изданиях:*

5. Development of a two-channel system for monitoring the mirror elements of the Millimetron space observatory / P. S. Zavyalov, S. N. Makarov, A. V. Smirnov, S. D. Fedorchuk, M. F. Stupak, G. Verhoglyad, A. G. Elesin, M. A. Zavyalova, M. S. Kravchenko, D. V. Skokov, E. V. Vlasov, and A. V. Ermolenko // Applied Optics. – 2022. – Vol. 61. – No. 2. – P. 588-596. – DOI 10.1364/AO.441372.

6. Жимулева Е.С., Завьялов П.С., Кравченко М.С. Разработка и исследование телецентрических объективов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 5. – № 1. – с. 120-124.

7. Завьялов П.С., Кравченко М.С., Уржумов В.В., Куклин В.А., Михалкин В.М. Исследование метрологических характеристик системы PulsESPI применительно к прецизионному контролю термодетформаций // Решетневские чтения. – Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2018. – Т. 1. – с. 107-109.

8. Investigation of the metrological characteristics of the PulsESPI system applied to the precision inspection of thermal deformations / P. S. Zavyalov, M. S. Kravchenko, V. V. Urzhumov, V. A. Kuklin, V. M. Mikhalkin // Siberian Journal of Science and Technology. – 2019. – Vol. 20, No 2. – P. 210-218. – DOI 10.31772/2587-6066-2019-20-2-210-218.

9. Завьялов П.С., Кравченко М.С., Жимулева Е.С. Применение метода ножа Фуко для адаптации зеркальной системы обсерватории "Миллиметрон" // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020. – Т. 8. – № 1. – с. 27-34.

10. Approach to controlling the position of the space observatory "Millimetron" mirror elements by the high-precision system / Zavyalov P.S., Makarov S.N., Smirnov A.V., Fedorchuk S.D., Stupak M.F., Verhoglyad A.G., Elesin A.G., Zavyalova M.A., Kravchenko M.S., Skokov D.V., Vlasov E.V., Ermolenko A.V. // ITNT-2022 – Samara, 2022. – pp. 1-5, DOI 10.1109/ITNT55410.2022.9848723.

11. Высокоточная двухступенчатая система контроля положения зеркальных элементов космической обсерватории «Миллиметрон» / П. С. Завьялов, А. Г. Верхогляд, М. С. Кравченко, С. Н. Макаров, А. Г. Елесин, Д. С. Скоков, А. В. Ермоленко, М. Ф. Ступак, М. А. Завьялова, Е. В. Власов // ИТНТ-2022: сборник трудов. Т. 2. – Самара: Самарский университет, 2022. – С. 23002.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20 тел./факс. (383) 346-08-57

Формат 60×84/16, объем 1.1 п.л., тираж 100 экз.

Заказ № 187, подписано в печать 23 декабря 2025 г.