МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский государственный университет

Факультет радиофизики и компьютерных технологий

Кафедра _____

РЕФЕРАТ

по дисциплине «Основы информационных технологий»

(кандидатский минимум)

МЕТОДИКА И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ЛАЗЕРНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Выполнил: магистрант _____

Научный руководитель: _____

Проверил: _____

Минск — 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....3
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ.....5
1.1 Физические основы формирования интерференционного изображения.....5
1.2 Геометрические параметры и модели их восстановления.....6
1.3 Источники погрешностей и метрологическое обеспечение.....7
2 ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....9
2.1 Цифровая регистрация и предварительная обработка.....9
2.2 Методы выделения фазы и развёртки фазовой карты.....10
2.3 Программные средства и архитектура обработки.....12
2.4 Машинное обучение и направления развития.....14
3 АНАЛИТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....15
3.1 Выбор методики измерения и схема информационного процесса.....15
3.2 Имитационная модель восстановления микрорельефа.....16
3.3 Сравнительная оценка алгоритмов.....17
3.4 Оценка неопределённости и рекомендации.....20
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....22
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....24
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....26

ВВЕДЕНИЕ

Развитие прецизионного машиностроения, микроэлектроники, фотоники и аддитивных технологий сопровождается ростом требований к точности контроля геометрии деталей. В таких задачах традиционные контактные средства измерения не всегда обеспечивают достаточную производительность либо способны влиять на измеряемую поверхность. Лазерная интерферометрия предоставляет возможность получать информацию об изменении оптического пути без механического контакта с объектом. Однако само интерференционное изображение ещё не является готовым результатом измерения: геометрические параметры необходимо восстановить по цифровым данным с применением математических моделей, методов фильтрации, фазового анализа и калибровки измерительного тракта [1, 2].

Актуальность исследования определяется необходимостью перехода от визуального анализа интерференционных полос к автоматизированному и воспроизводимому вычислению высоты, формы, размеров локальных неоднородностей и деформаций объектов. Цифровая обработка позволяет использовать пространственную структуру полос, интенсивность, контраст, сдвиг фазы и показатели качества для восстановления численных параметров. Современные методы включают алгоритмы преобразования Фурье, фазосдвиговую интерферометрию, развёртку фазы, оценивание параметров по модели, а также методы машинного обучения. Последние активно исследуются для подавления шумов и обработки сложных интерферограмм, но требуют контроля обобщающей способности и метрологической достоверности [3–5].

Степень разработанности проблемы достаточно высока в части физической теории интерференции и классических алгоритмов фазового анализа. Метод выделения фазы из одиночной полосовой структуры посредством преобразования Фурье предложен М. Такедой и соавторами; фазосдвиговые подходы получили широкое развитие в современной

оптической метрологии [1, 6]. Вместе с тем остаются существенные ограничения: динамическое изменение объекта, неоднородная освещённость, низкая видность полос, спекл-шум, фазовые разрывы и неопределённость перехода от фазового изображения к абсолютному геометрическому параметру [2, 4, 7].

Цель реферата — проанализировать методы и программно-аппаратные средства цифровой обработки лазерных интерференционных изображений и обосновать технологическую последовательность оценки геометрических параметров объектов. Объект исследования — процессы цифрового получения и обработки интерференционных изображений при оптическом измерении геометрии. Предмет исследования — алгоритмы выделения интерференционной фазы, восстановления высотного рельефа и оценки точности полученных геометрических характеристик.

Для достижения цели поставлены задачи: рассмотреть механизм формирования интерференционной картины и её информационные признаки; сопоставить фазосдвиговые и пространственно-частотные алгоритмы; проанализировать этапы подавления помех и развёртки фазы; охарактеризовать современные программные средства; предложить структуру вычислительной системы; проверить выбранную последовательность на модельных данных и оценить основные факторы неопределённости. Используются методы теоретического анализа литературы, математического моделирования, цифровой фильтрации, численной оценки ошибок и сравнительного анализа.

Практическая значимость работы заключается в формировании воспроизводимого подхода к построению программного модуля, который принимает зарегистрированные интерферограммы и выдаёт карту рельефа, параметры локальных особенностей и показатели достоверности результата. Приведённый вычислительный пример является имитационным и не заменяет калибровку и экспериментальную проверку реальной измерительной установки.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

1.1 Физические основы формирования интерференционного изображения

Лазерная интерферометрия основана на суперпозиции когерентных световых волн. В измерительном интерферометре исходное излучение разделяется на опорный и измерительный каналы. После взаимодействия измерительной волны с объектом лучи вновь совмещаются, а камера регистрирует пространственное распределение интенсивности. Разность оптических ходов двух волн определяет относительную фазу и, следовательно, положение светлых и тёмных полос. Интерференционный рисунок представляет собой двумерное поле интенсивности, косвенно кодирующее сведения о высоте поверхности, перемещении или распределении показателя преломления [2, 6].

В идеализированной модели интенсивность изображения выражается суммой фоновой составляющей и гармонической модуляции. Для серии кадров с управляемым фазовым сдвигом модель имеет вид:

$$I_k(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cdot\cos[\varphi(x, y) + \delta_k] \quad (1)$$

Здесь $A(x, y)$ — фоновая интенсивность, $B(x, y)$ — амплитуда модуляции, $\varphi(x, y)$ — искомая фаза, δ_k — заданный фазовый сдвиг в k-м кадре. Наблюдаемость фазы зависит от контраста B/A, уровня шума, насыщения матрицы, качества оптики и устойчивости фазового сдвига. Простая бинаризация изображения приводит к потере части информации: граница полосы не является единственным носителем геометрических сведений. В метрологических задачах предпочтительно использовать оценку непрерывной фазы на каждом допустимом пикселе.

Тип оптической схемы определяет измеряемую величину. В интерферометре Майкельсона измерительный канал может содержать отражающую поверхность, а изменение её положения вызывает двойное изменение оптического пути при нормальном падении. В интерферометре Физо тестируемая поверхность сопоставляется с эталонной волновой поверхностью. В интерферометре Маха–Цендера удобно исследовать

фазовые изменения в проходящем объекте. Поэтому нельзя механически переносить формулу преобразования фазы в высоту между разными схемами: коэффициент масштабирования зависит от направления лучей, числа проходов, показателя преломления и геометрии установки [2, 8].

Для отражающей поверхности при нормальном падении и однократном отражении в измерительном плече интерферометра изменение высоты Δh вызывает фазовое изменение $\Delta\varphi$, описываемое соотношением:

$$\Delta\varphi = (4\pi / \lambda)\cdot\Delta h; \quad \Delta h = (\lambda / 4\pi)\cdot\Delta\varphi \qquad (2)$$

В выражении λ означает длину волны в среде распространения. В случае измерений в воздухе и при задании вакуумной длины волны необходимо учитывать показатель преломления. Период 2π соответствует изменению высоты $\lambda/2$, что объясняет неоднозначность определения абсолютной высоты по одному фазовому изображению. Для пропускающей среды фазовая задержка пропорциональна изменению оптической толщины, и вычисляемая величина необязательно совпадает с физической толщиной объекта. Эти различия принципиальны при разработке методики измерения геометрических параметров.

1.2 Геометрические параметры и модели их восстановления

Геометрические параметры, доступные интерферометрическому контролю, условно разделяются на три группы. К первой относятся высотные характеристики: относительное отклонение поверхности от опорной плоскости, глубина углубления, высота выступа, амплитуда и среднеквадратическое отклонение рельефа. Ко второй относятся латеральные характеристики: протяжённость особенностей, ширина, эквивалентный диаметр и координаты их центров. Третья группа описывает форму и деформацию: кривизну, отклонение от заданного профиля, пространственные градиенты, перемещение отдельных областей.

Для корректной оценки каждой группы параметров необходима собственная модель перехода от фазовой карты к физическим координатам. Для высотного профиля отражающей поверхности используется формула (2),

но только после калибровки нулевого уровня и устранения наклона. Для латеральных размеров необходимо определить масштаб изображения: например, измерить размер эталонной структуры с известным расстоянием и вычислить коэффициент пересчёта пикселей в миллиметры. Если масштаб s задан в миллиметрах на пиксель, то расстояние между двумя точками изображения в простейшей ортогональной модели равно:

$$L = s \cdot \sqrt{[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]} \quad (3)$$

Формула (3) справедлива при одинаковом масштабе по обеим осям, малой дисторсии и корректной ориентации камеры. В реальной системе могут потребоваться раздельные масштабы s_x и s_y, коррекция оптической дисторсии и преобразование координат. Для оценки ширины локального выступа по профилю может применяться ширина на половине высоты (FWHM). Такой показатель удобен для симметричных особенностей, но не заменяет габаритные размеры произвольного объекта. Выбор определения параметра должен фиксироваться в методике до проведения измерений.

Отдельную роль играет опорная поверхность. При оценке локальной структуры из полной карты высоты часто вычитают наклонную плоскость, аппроксимированную по участкам, которые считаются базовыми. Если в такую область попадает сам измеряемый выступ, оценка высоты систематически смещается. Альтернативой может быть совместное оценивание параметров модели объекта и базовой поверхности. Для объектов со сложной геометрией целесообразно предварительно выделять область интереса, затем применять соответствующий алгоритм восстановления и вычислять показатели качества.

1.3 Источники погрешностей и метрологическое обеспечение

Точность измерения формируется на всех этапах: от излучателя и оптической схемы до алгоритма реконструкции и процедуры вычисления параметра. К аппаратным причинам относятся нестабильность длины волны, вибрации, температурный дрейф, турбулентность воздуха, нелинейность камеры, квантование сигнала, дефокусировка и аберрации. Алгоритмические

причины включают недостаточное подавление фоновой интенсивности, потерю фазовой связности на областях с низким контрастом, неверный выбор фазового порядка и ошибки калибровочной модели [2, 9].

Измерительная информация в интерференционных кадрах неравномерно достоверна. В зонах, где модуляция B(x, y) близка к нулю, вычисленная фаза существенно чувствительнее к шуму. Поэтому система должна формировать карту качества, выделять недопустимые пиксели, фиксировать долю исключённых точек и не подменять отсутствующие наблюдения необоснованной интерполяцией. При необходимости результат дополняют маской достоверности и протоколом параметров получения изображений.

В метрологии необходимо различать погрешность восстановления на модельных данных и неопределённость реального измерения. В моделировании известна истинная поверхность, поэтому можно вычислить систематическое отклонение и среднеквадратическую ошибку. В эксперименте истинная поверхность, как правило, неизвестна: оценка выполняется по калибровочным образцам, повторным наблюдениям, документации средств измерения и модели распространения неопределённости. Руководство JCGM 100:2008 рекомендует выражать результат с обоснованной оценкой неопределённости измерения [10].

Для оптических систем измерения топографии поверхности применимы положения серии ISO 25178. Стандарт ISO 25178-600:2019 характеризует метрологические свойства средств измерения площадной топографии, а ISO 25178-700:2022 устанавливает общие процедуры калибровки и проверки этих характеристик [11, 12]. Указанные документы не задают готовую процедуру для любой лазерной схемы; они служат методической основой для выбора проверяемых характеристик, эталонов и правил документирования результатов. Вывод раздела состоит в том, что алгоритмическая точность является необходимым, но недостаточным условием метрологической пригодности измерительной системы.

2 ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

2.1 Цифровая регистрация и предварительная обработка

Информационная система интерферометрического контроля представляет собой совокупность датчика изображения, модуля синхронизации, средств хранения, библиотеки цифровой обработки, вычислительного ядра и интерфейса визуализации. На вход поступает одна интерферограмма либо серия кадров с известными условиями регистрации. На выходе формируются фазовая карта, численная модель геометрии и протокол измерения. На промежуточных этапах необходимо сохранять связи между изображениями, калибровочными данными и версиями алгоритмов. Такой подход позволяет воспроизвести результат и выяснить причины расхождений между сериями измерений.

Основная задача предварительной обработки — повысить отношение полезного сигнала к помехе, не уничтожая фазовую структуру. При коррекции тёмного кадра из измерения вычитается сигнал матрицы, зарегистрированный без освещения. Коррекция плоского поля компенсирует неоднородность чувствительности пикселей и освещения при наличии подходящей калибровочной серии. Для удаления случайного шума используют гауссову фильтрацию, медианную обработку и специальные алгоритмы, учитывающие направленность интерференционных полос. Выбор фильтра должен учитывать их пространственную частоту: сильное сглаживание может деформировать фазовые градиенты и уменьшить латеральную разрешающую способность [3, 5].

При работе с видеопотоком важна временная привязка. Если фазовые сдвиги формируются последовательным изменением оптического пути, то каждый кадр должен сохранять идентификатор шага и временную метку. Потеря кадра или нарушение порядка делает стандартную фазосдвиговую реконструкцию некорректной. Желательно сохранять необработанные изображения в исходной разрядности; использование JPEG с потерями или автоматического нелинейного повышения контрастности способно изменить

гармонический состав изображения. Для экспериментальных данных предпочтительны TIFF, PNG без потерь либо исходный формат камеры с отдельной записью метаданных.

Предварительная обработка должна включать алгоритмический контроль пригодности. Признаками неудовлетворительного кадра могут быть превышение доли насыщенных пикселей, недостаточная видность, смещение изображения относительно опорного кадра или значительное изменение средней яркости во время серии. В варианте реального времени контроль выполняется до дорогостоящего этапа развёртки фазы, предотвращая получение формально красивой, но недостоверной карты высоты.

2.2 Методы выделения фазы и развёртки фазовой карты

Методы выделения фазы можно разделить на временные, пространственные и комбинированные. Временные подходы используют несколько изображений одной поверхности с различными управляемыми фазовыми сдвигами. Пространственные подходы извлекают фазу по локальным частотным характеристикам одного кадра, обычно с введённой несущей частотой. Комбинированные системы могут дополнять фазосдвиговые измерения пространственным анализом или априорными сведениями о геометрии [2, 6].

Четырёхшаговая фазосдвиговая интерферометрия (PSI) использует четыре кадра со сдвигами 0, π/2, π и 3π/2. Подставляя эти сдвиги в уравнение (1), можно исключить фоновую интенсивность и найти свёрнутую фазу как угол комплексной величины:

$$\hat{\varphi}(x, y) = \operatorname{atan2}[I_3(x, y) - I_1(x, y), I_0(x, y) - I_2(x, y)] \quad (4)$$

Функция atan2 определяет угол с учётом знаков числителя и знаменателя и возвращает значение в интервале (−π; π]. Достоинства четырёхшагового метода — математическая простота, независимость от неизвестного постоянного фона и высокая эффективность при стабильных условиях. Недостаток — необходимость снять несколько согласованных по времени кадров. Механические колебания, движение объекта и ошибки

формируемых сдвигов нарушают предположения модели и вызывают фазовые артефакты. Обобщённые многошаговые схемы могут уменьшать влияние шума, но увеличивают объём данных и длительность наблюдения [2].

Метод пространственного преобразования Фурье, описанный Такедой и соавторами, использует один кадр с наклонными интерференционными полосами и выделенной пространственной несущей частотой [1]. После двумерного преобразования Фурье спектр содержит центральную составляющую и боковые полосы, связанные с комплексным фазовым сигналом. Выбор одной боковой полосы, её перенос к началу спектра и обратное преобразование позволяют получить оценку фазы. Метод эффективен при достаточном разделении спектральных компонент. При слишком высокой кривизне или большой пространственной полосе частот объекта боковая полоса перекрывается с другими компонентами, а частотное окно сглаживает мелкие детали рельефа.

В частотной области изображение I(x, y) преобразуется в спектр F(u, v); после введения полосового окна W(u, v) комплексный сигнал реконструируется обратным преобразованием:

$$C(x, y) = F^{-1}\{W(u, v)\cdot F[I(x, y)]\}; \quad \hat{\varphi} = \arg C \qquad (5)$$

При реализации формулы (5) необходима корректная обработка частотной сетки, расположения несущей и влияния границ изображения. Помимо классического Фурье-анализа используются оконное преобразование Фурье, локальные ориентированные фильтры, вейвлеты и вариационные методы. Они позволяют адаптироваться к изменениям направления полос, однако увеличивают вычислительные затраты и количество параметров настройки. Для двухмерных изображений интерференционной картины нельзя без проверки ограничиваться одномерной оценкой частоты по строке: при кривизне полос это приводит к смещению результата [3, 4].

Результат фазовой демодуляции неоднозначен с точностью до 2π. Необходима развёртка фазы, то есть восстановление непрерывного распределения Φ(x, y), согласованного с наблюдаемым $\hat{\varphi}(x, y)$:

$$\Phi(x, y) = \hat{\varphi}(x, y) + 2\pi \cdot m(x, y), \quad m \in \mathbb{Z} \tag{6}$$

В простейшем последовательном алгоритме соседние разности корректируются на целое число периодов при превышении ±π. Такой метод работоспособен на гладкой карте с высокой плотностью дискретизации, но чувствителен к локальным сбоям и разрывам, поскольку ошибка фазового порядка может распространяться по траектории обхода. Более устойчивые методы используют карту надёжности, поиск невязок, ограничение путей интегрирования либо глобальную минимизацию ошибки. В частности, развёртка по качеству отдаёт приоритет областям с большим контрастом и меньшими шумами. Для карты с изолированными областями и недоступными пикселями требуется отдельная стратегия согласования фазовых порядков [4, 13].

Таблица 2.1 — Сравнение методов анализа интерференционных изображений

Метод	**Необходимые данные**	**Сильная сторона**	**Ограничение**
Подсчёт и трассировка полос	1 изображение	Простота и наглядность	Слабая точность при сложной форме
Фурье-анализ	1 кадр с несущей	Без межкадровых ошибок	Спектральное перекрытие, потеря деталей
Четырёхшаговый PSI	4 кадра с фазовым шагом	Прямая оценка фазы в пикселе	Чувствительность к вибрациям
Качественно-управляемая развёртка	Свёрнутая фаза и карта качества	Устойчивость к локальным помехам	Сложность на разрывах и пропусках
Нейросетевой анализ	Данные и обученная модель	Быстрая обработка сложных структур	Нужны размеченные данные и проверка

2.3 Программные средства и архитектура обработки

Реализация методики цифрового интерферометрического контроля требует инструментов работы с массивами, цифровой фильтрации, спектрального анализа, оптимизации и визуализации. Выбор программного обеспечения целесообразно проводить по критериям воспроизводимости,

доступности исходного кода, поддержки приборов, производительности, удобства прототипирования и интеграции в измерительную установку.

Python является удобной средой построения исследовательского прототипа. Библиотека NumPy выполняет операции над массивами, SciPy предоставляет средства спектрального анализа и фильтрации, OpenCV применяется для обработки изображений и геометрических преобразований, а scikit-image содержит готовые алгоритмы, включая двумерную развёртку фазы. Наличие документированных функций FFT, GaussianBlur и unwrap_phase позволяет в короткий срок реализовать воспроизводимую последовательность операций [13–15]. Существенным преимуществом является возможность хранить параметры вычислений и версии программных зависимостей вместе с исходным набором данных.

MATLAB обладает развитой средой матричных вычислений, инструментами визуализации и моделирования. Для учебной исследовательской задачи его достоинство заключается в компактности реализации алгоритмов; ограничениями могут быть лицензирование и зависимость от установленных пакетов. Применение языка C++ и интерфейса OpenCV целесообразно в системе, где требуется низкая задержка обработки кадров и тесная интеграция с камерой и аппаратным управлением. При этом повышаются затраты на разработку, тестирование и сопровождение. Перенос части операций на графический процессор обеспечивает ускорение массовых вычислений, но не устраняет систематические ошибки модели и калибровки.

Для рассматриваемой предметной области предлагается модульная программная архитектура. Первый модуль управляет получением кадров, проверяет синхронизацию и записывает метаданные. Второй модуль выполняет коррекцию и оценку качества. Третий реализует выбранный способ фазовой демодуляции, четвёртый — развёртку фазы и преобразование в высоту. Пятый оценивает геометрические характеристики и рассчитывает диагностические показатели. Шестой формирует таблицу результатов, карту

рельефа и протокол с номером серии, параметрами и указанием использованной калибровки.

Таблица 2.2 — Программные технологии для интерферометрического анализа

Средство	Типовые задачи	Достоинство	Условие применения
Python + NumPy/SciPy	Моделирование, FFT, статистика	Открытая экосистема	Контроль версий и тестирование
OpenCV	Фильтры, регистрация, калибровка	Оптимизированная обработка	Проверка форматов и глубины данных
scikit-image	Развёртка фазы, анализ областей	Готовые алгоритмы	Проверка масок и граничных условий
MATLAB	Численные эксперименты, прототипы	Удобные матричные операции	Доступность лицензий
C++ / GPU	Высокопроизводительный поток	Низкая задержка	Повышенная сложность разработки

2.4 Машинное обучение и направления развития

В современных работах активно исследуются методы глубокого обучения для предварительной обработки интерферограмм, определения фазы, развёртки фазовых карт и компенсации ошибок. Обзор C. Zuo и соавторов показывает, что нейросетевые подходы могут применяться как отдельные вычислительные блоки внутри классического измерительного тракта, так и в виде последовательностей преобразований «изображение — фаза — рельеф» [3]. В 2024 году X. Zhu и соавторы рассмотрели нейросетевую предварительную обработку одиночных интерференционных изображений для подавления шума и нормализации структуры полос [5].

Нейросети привлекательны при сложной картине полос, низком контрасте, спекл-помехах и отсутствии возможности получить длинную серию фазовых сдвигов. В отличие от фиксированного пространственного фильтра обучаемая модель может учитывать контекст изображения и сложные закономерности искажения. В то же время обучающий набор определяет диапазон режимов, в которых вывод модели может считаться надёжным. Сеть, обученная на идеализированных синтетических полосах, необязательно сохраняет точность на данных камеры с другой спектральной

характеристикой, оптическими аберрациями или статистикой шумов [3, 4, 16, 17].

При критическом сравнении классических и нейросетевых методов важно разделять качество визуализации и качество измерения. Высокая структурная похожесть восстановленного изображения не доказывает отсутствия систематического смещения высоты. Особенно опасно неконтролируемое «дорисовывание» отсутствующих полос: результат может выглядеть правдоподобно, но содержать особенности, не подтверждённые первичным сигналом. В метрологической системе нейросетевой модуль следует проверять по калибровочным образцам, независимым наборам данных и распределению ошибки в пространстве. Необходимы также диагностические признаки выходов за область обучения.

3 АНАЛИТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 Выбор методики измерения и схема информационного процесса

Для обоснования вычислительной методики рассматривается типовая задача контроля локального выступа на отражающей поверхности. Требуется определить относительную высоту неровности, её пространственный профиль и параметры поперечного размера по интерференционным изображениям. Предполагается, что поверхность оптически доступна, движение объекта в процессе регистрации отсутствует, а система способна формировать известные фазовые сдвиги. При этих предпосылках наиболее прозрачной исходной методикой является четырёхшаговый фазосдвиговый анализ, сопровождаемый двумерной развёрткой фазы и переходом к высоте по формуле (2).

Информационный процесс целесообразно разделить на последовательные этапы: регистрация серии изображений; проверка полноты серии и метаданных; коррекция сигналов и маскирование непригодных пикселей; при необходимости фильтрация интенсивностей; вычисление свёрнутой фазы; двумерная развёртка; преобразование фазы в относительную высоту; устранение наклона базовой поверхности; выделение объекта и

вычисление геометрических параметров; формирование отчёта о качестве и неопределённости. На каждом этапе программа должна иметь возможность сохранить промежуточный массив, чтобы выявлять источник ошибки, а не только наблюдать итоговый дефект карты.

3.2 Имитационная модель восстановления микрорельефа

Для иллюстрации рассмотренной последовательности реализовано численное моделирование отражающей поверхности с плавным локальным выступом. Эксперимент с реальной камерой или лазерной установкой в рамках данного реферата не проводился. Используется модель интерферограмм по формуле (1), а исходная истинная геометрия известна заранее. Такая постановка позволяет отделить ошибки обработки изображений от погрешностей калибровки и экспериментальных возмущений.

Модельное поле содержит 256 × 256 отсчётов при масштабе 0,0125 мм/пиксель. Применена длина волны $\lambda = 632{,}8$ нм. Высота выступа задана двумерной гауссовой функцией с амплитудой 550 нм и характерными размерами $\sigma_x = 0{,}42$ мм, $\sigma_y = 0{,}34$ мм, на которую наложен небольшой линейный наклон базовой поверхности. Выражение для высоты имеет вид:

$$h(x,y) = H \cdot \exp\{-\tfrac{1}{2}[(x-x_0)^2/\sigma_x^2 + (y-y_0)^2/\sigma_y^2]\} \qquad (7)$$

В расчёте $H = 550$ нм, $x_0 = 0{,}06$ мм и $y_0 = -0{,}03$ мм. Для модельного выступа ширина на половине высоты составляет $\mathrm{FWHM}_x = 2\sqrt{(2\ln 2)}\sigma_x \approx 0{,}989$ мм и $\mathrm{FWHM}_y \approx 0{,}801$ мм. Эти величины аналитически определены исходной моделью и не являются результатами натурного измерения. Линейный наклон поверхности нужен для проверки того, что вычисление локальной высоты должно учитывать опорную плоскость.

Сформированы четыре независимые интерферограммы с фазовыми сдвигами 0, π/2, π и 3π/2, фоновой интенсивностью $A = 0{,}50$ и амплитудой модуляции $B = 0{,}38$ в нормированных единицах. К каждому кадру добавлен независимый гауссов шум с математическим ожиданием 0 и среднеквадратическим отклонением 0,035 единицы интенсивности. После

вычисления свёрнутой фазы по формуле (4) применена последовательная развёртка по двум координатам. Такой упрощённый способ развёртки выбран потому, что модель содержит гладкую поверхность и не имеет маскированных областей или истинных скачков высоты.

Полученная карта переведена в нанометры согласно формуле (2). Поскольку абсолютная фазовая константа при моделировании не фиксируется, для расчёта ошибки удалено постоянное смещение карты относительно известной исходной модели. Такая операция допустима только для численного сравнения: на реальном объекте неизвестная истинная высота не может использоваться для выравнивания, и опорный уровень должен быть задан физически. На рисунке 3.1 приведены пример синтезированной интерферограммы, свёрнутая фаза, исходная и восстановленная поверхности.

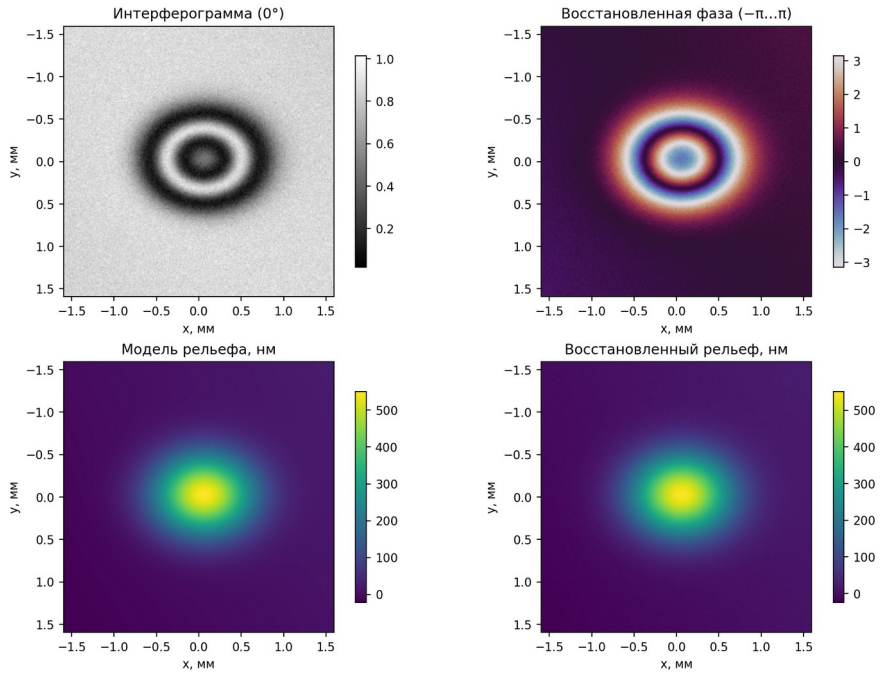

Рисунок 3.1 — Имитационная интерферограмма и этапы реконструкции рельефа (авторское моделирование)

3.3 Сравнительная оценка алгоритмов

Сравнение выполнено для трёх вариантов предварительной обработки одной и той же серии фазосдвиговых изображений. Первый вариант не предусматривает фильтрации. Во втором каждый кадр обрабатывается гауссовым фильтром с параметром σ = 0,8 пикселя. В третьем к каждому

кадру применяется медианный фильтр с окном 3 × 3 пикселя. Все последующие этапы фазового восстановления одинаковы, что позволяет оценить влияние именно выбранного способа подавления шума.

Для уменьшения зависимости вывода от конкретной реализации случайного шума сформировано 30 независимых серий интерферограмм; использовано фиксированное начальное зерно генератора 20261123. Для каждого варианта рассчитана среднеквадратическая ошибка (RMSE) восстановления высоты по полю N пикселей:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\{(1/N)\cdot\Sigma_i\,[\hat{h}_i - h_i]^2\}} \qquad (8)$$

В формуле (8) $\hat{h}_i$ и h_i — восстановленная и исходная высоты в точке i соответственно. Перед вычислением RMSE удалено только общее постоянное смещение фазы; наклон поверхности сохранён, так как он присутствует в истинной модели. В таблице 3.1 приведены средние значения RMSE по 30 реализациям шума, а также выборочное стандартное отклонение RMSE между реализациями. Полученные величины характеризуют именно эту имитационную конфигурацию.

Таблица 3.1 — Результаты компьютерного моделирования (30 реализаций шума)

Вариант обработки	**Среднее RMSE, нм**	**Стандартное отклонение RMSE, нм**	**Снижение RMSE**
Без предварительной фильтрации	3,289	0,009	—
Гауссов фильтр, σ = 0,8 пикселя	1,173	0,005	64,3 %
Медианный фильтр, 3 × 3	1,428	0,007	56,6 %

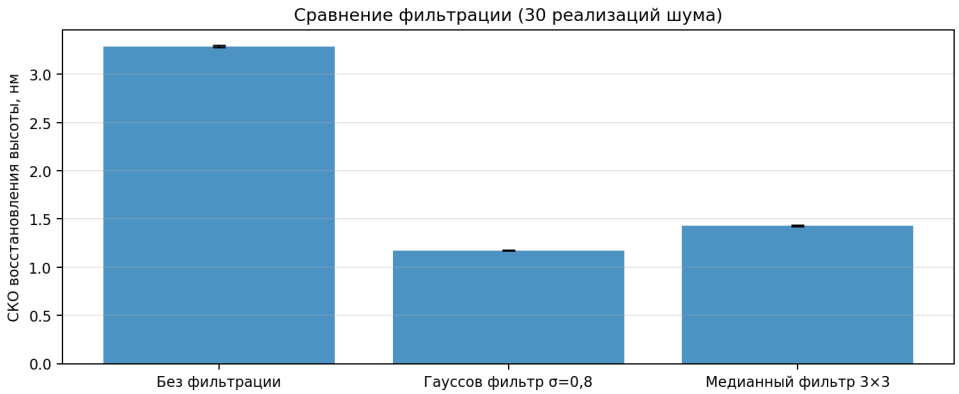

Рисунок 3.2 — Сравнение точности восстановления высоты при различных способах обработки

В исследуемой гладкой модели умеренное пространственное сглаживание повышает точность оценки высоты. Наименьшее среднее RMSE получено после гауссовой фильтрации: 1,173 нм против 3,289 нм без обработки. Медианный фильтр также снижает случайную составляющую ошибки, но уступает гауссову при заданном распределении шума. Это объясняется тем, что шум в модели аддитивный и гауссов, а измеряемая поверхность достаточно гладкая. При наличии импульсных выбросов, насыщенных пикселей или острых границ объектов сравнительное положение методов может измениться.

Для дополнительной проверки оценивалась ошибка усреднённой высоты в центральной области выступа размером 5 × 5 пикселей относительно известной высоты той же области. Среднее знаковое отклонение составило приблизительно +0,10 нм без фильтрации, −0,29 нм после гауссовой фильтрации и −0,28 нм после медианной обработки. Малость смещения не позволяет заключить, что фильтрация всегда несмещённа: наблюдаемое значение определяется гладкостью модели и выбранным малым ядром. Излишнее увеличение окна в реальном измерении неизбежно сгладит границы и может занизить высоту узких выступов.

Сопоставление следует интерпретировать с учётом принципиального ограничения: в эксперименте модельный шум не включает колебания фазового шага, оптические аберрации, неравномерность контраста и ошибки развёртки фазы. Поэтому нанометровые значения RMSE в таблице 3.1 не являются подтверждённой точностью реального интерферометра. Вместе с тем имитационная проверка показывает корректный способ сравнения алгоритмов на общей тестовой поверхности с известной истиной и одинаковыми реализациями входных помех. При внедрении методики необходимо дополнить тестовые поверхности наборами с уступами, неоднородным контрастом, сдвигом кадров и различными уровнями шума.

3.4 Оценка неопределённости и рекомендации

Неопределённость геометрического параметра должна включать как случайные колебания фазовой оценки, так и систематические компоненты масштабирования, калибровки и оптической модели. Для относительной высоты отражающей поверхности при нормальном падении выражение (2) задаёт функцию $h(\lambda, \Phi)$. Если входные величины независимы, то приближённое стандартное комбинированное неопределённости можно получить по закону распространения неопределённости:

$$u^2(h) \approx (\Phi/4\pi)^2 u^2(\lambda) + (\lambda/4\pi)^2 u^2(\Phi) \qquad (9)$$

Если фазовая ошибка коррелирована с ошибкой длины волны, в формулу (9) добавляется ковариационный член. Для реальной установки потребуются также вклады ошибок опорной плоскости, показателя преломления воздуха, угла падения, масштаба камеры, фазового сдвига и алгоритма развёртки. При наличии доминирующих нелинейностей и неоднозначностей целесообразно применять моделирование Монте-Карло согласно подходам JCGM [10]. Простая подстановка RMSE из таблицы 3.1 вместо полной неопределённости даёт необоснованно оптимистический результат.

Для латерального параметра L, определяемого в пикселях l и калибровочным коэффициентом s, функция измерения имеет вид $L = s \cdot l$. При отсутствии корреляции основных вкладов получаем:

$$u^2(L) \approx l^2 u^2(s) + s^2 u^2(l) \qquad (10)$$

Соотношение (10) подчёркивает необходимость отдельной оценки неопределённости масштабирования и выделения геометрической границы. Даже фазовая реконструкция высокого качества не гарантирует точность ширины, если масштаб камеры не откалиброван. Вывод относится и к сравнению объектов при разных увеличениях: перевод к общим физическим координатам должен предшествовать вычислению размеров.

С учётом проведённого анализа рекомендуемая последовательность разработки программно-аппаратного решения включает три этапа. Сначала

следует реализовать физически обоснованную базовую методику с четырьмя фазосдвиговыми кадрами и проверить корректность знака фазы, масштабирования, развёртки и нулевой привязки на синтетических данных. Затем необходимо провести экспериментальную верификацию на эталонных объектах, включая ступенчатые меры высоты и объекты с известным латеральным размером, выполнить серию повторных измерений и сформировать бюджет неопределённости. После этого имеет смысл добавлять однокадровые методы, ускорение на GPU и обучаемые модули, сравнивая их не только по быстродействию, но и по метрологическим показателям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненной работы проанализированы физические и информационно-технологические основы определения геометрических параметров объектов по лазерным интерференционным изображениям. Показано, что зарегистрированное распределение интенсивности не даёт высоту непосредственно: необходима последовательность цифровых преобразований от подготовки кадров и выделения фазы до её развёртки, метрологической калибровки и вычисления геометрических характеристик. При этом содержание и применимость используемой формулы зависят от оптической схемы и режима взаимодействия света с объектом.

Выявлена необходимость связывать обработку интерферограммы с конкретной метрологической задачей. Восстановление высотного рельефа требует выбора опорного уровня, а измерение поперечных размеров — независимой пространственной калибровки. Низкая ошибка восстановления синтетической фазы не эквивалентна подтверждённой точности реальной измерительной установки. Неопределённость результата должна учитывать как фазовые шумы, так и свойства аппаратуры, оптики, калибровочных мер и выбранной измерительной модели.

Практическая часть включала численное моделирование четырёх фазосдвиговых интерферограмм гладкого выступа с известными параметрами и аддитивным шумом. Проведено сравнение трёх вариантов предварительной обработки по 30 реализациям. В принятых условиях средняя среднеквадратическая ошибка восстановления высоты уменьшилась с 3,289 нм без фильтрации до 1,173 нм после гауссовой обработки и 1,428 нм после медианной. Результаты характеризуют только рассмотренную синтетическую модель и не претендуют на статус натурных измерений.

Поставленная цель достигнута: систематизированы современные информационные технологии обработки интерференционных изображений, проведён сравнительный анализ методов и предложена воспроизводимая вычислительная последовательность оценки относительного микрорельефа.

Перспективами дальнейшего исследования являются экспериментальная верификация методики на эталонах, изучение объектов с резкими перепадами высоты, оценка точности латеральных размеров, разработка надёжной двумерной развёртки при фазовых разрывах и сравнительные испытания нейросетевых и классических алгоритмов в условиях, близких к реальной лабораторной установке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry // Journal of the Optical Society of America. — 1982. — Vol. 72, No. 1. — P. 156–160. — DOI: 10.1364/JOSA.72.000156.

2. Zhang S., Zhang W., Fu H. et al. Progress in High-Speed and High-Precision Laser Interferometric Surface-Figure Analysis // Applied Sciences. — 2026. — Vol. 16, No. 16. — Art. 8118. — DOI: 10.3390/app16168118.

3. Zuo C., Qian J., Feng S. et al. Deep learning in optical metrology: a review // Light: Science & Applications. — 2022. — Vol. 11. — Art. 39. — DOI: 10.1038/s41377-022-00714-x.

4. Jiang W., Ren T., Fu Q. Deep Learning in the Phase Extraction of Electronic Speckle Pattern Interferometry // Electronics. — 2024. — Vol. 13, No. 2. — Art. 418. — DOI: 10.3390/electronics13020418.

5. Zhu X., Zhang D., Hao Y. et al. A Deep Learning-Based Preprocessing Method for Single Interferometric Fringe Patterns // Photonics. — 2024. — Vol. 11, No. 3. — Art. 226. — DOI: 10.3390/photonics11030226.

6. Zuo C., Feng S., Huang L. et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review // Optics and Lasers in Engineering. — 2018. — DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.04.019.

7. Muhamedsalih H., Tang D., Kumar P., Jiang X. Carré Phase Shifting Algorithm for Wavelength Scanning Interferometry // Machines. — 2022. — Vol. 10, No. 2. — Art. 116. — DOI: 10.3390/machines10020116.

8. A Comprehensive Review of Optical Metrology and Perception Technologies // Sensors. — 2025. — Vol. 25, No. 22. — Art. 6811. — URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/25/22/6811 (дата обращения: 23.11.2026).

9. Metrological-Characteristics-Based Calibration of Optical Areal Surface Measuring Instruments and Evaluation of Measurement Uncertainty for Surface Texture Measurements // Instruments. — 2025. — Vol. 9, No. 2. — Art. 11. — DOI: 10.3390/instruments9020011.

10. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. — BIPM, 2008. — URL: https://www.bipm.org/en/doi/10.59161/jcgm100-2008e (дата обращения: 23.11.2026).

11. ISO 25178-600:2019. Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 600: Metrological characteristics for areal topography measuring methods. — ISO, 2019. — URL: https://www.iso.org/standard/67651.html (дата обращения: 23.11.2026).

12. ISO 25178-700:2022. Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 700: Calibration, adjustment and verification of areal topography measuring instruments. — ISO, 2022. — URL: https://www.iso.org/standard/78204.html (дата обращения: 23.11.2026).

13. scikit-image. skimage.restoration.unwrap_phase: справочная документация [Электронный ресурс]. — URL:

https://scikit-image.org/docs/stable/api/skimage.restoration.html (дата обращения: 23.11.2026).

14. SciPy. scipy.fft.fft2: справочная документация [Электронный ресурс]. — URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.fft.fft2.html (дата обращения: 23.11.2026).

15. OpenCV. Image Filtering: GaussianBlur [Электронный ресурс]. — URL: https://docs.opencv.org/4.5.1/d4/d86/group__imgproc__filter.html (дата обращения: 23.11.2026).

16. Zhong B., Yi H., Miao F. Phase Unwrapping via Deep Learning for Surface Shape Measurement by Using Wavelength-Tuning Interferometry // Applied Sciences. — 2026. — Vol. 16, No. 13. — Art. 6687. — DOI: 10.3390/app16136687.

17. Pixel-wise phase unwrapping of fringe projection profilometry based on deep learning // Measurement. — 2023. — Art. 113323. — DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113323.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ниже приведён сокращённый воспроизводимый пример вычислительного эксперимента на Python с использованием NumPy и SciPy. Он показывает принцип получения модельных интерферограмм, восстановления фазы и сравнения RMSE. Для точного воспроизведения таблицы 3.1 следует использовать 30 реализаций, генератор PCG64 с зерном 20261123 и параметры фильтрации, указанные в основном тексте. Данные являются синтетическими.

```
import numpy as np
from scipy.ndimage import gaussian_filter, median_filter

N, lam, step = 256, 632.8, 0.0125
axis = (np.arange(N) - (N-1)/2) * step
x, y = np.meshgrid(axis, axis)
h = 550*np.exp(-.5*((x-.06)/.42)**2 - .5*((y+.03)/.34)**2)
plane = 28*x/3.2 - 17*y/3.2
z = h + plane
phi = 4*np.pi*z/lam
base = np.array([.50+.38*np.cos(phi+k*np.pi/2)
                 for k in range(4)])

def recover(imgs):
    wrapped = np.arctan2(imgs[3]-imgs[1], imgs[0]-imgs[2])
    return np.unwrap(np.unwrap(wrapped, axis=0), axis=1)*lam/(4*np.pi)

rng = np.random.default_rng(20261123)
errors = np.zeros((3, 30))
for j in range(30):
    noisy = base + rng.normal(0, .035, base.shape)
    variants = [noisy,
                gaussian_filter(noisy, sigma=(0,.8,.8)),
                median_filter(noisy, size=(1,3,3))]
    for k, images in enumerate(variants):
        restored = recover(images)
        restored -= np.mean(restored-z)  # только для модельной оценки
        errors[k,j] = np.sqrt(np.mean((restored-z)**2))
print(errors.mean(axis=1), errors.std(axis=1, ddof=1))
```