

На правах рукописи

Гужов Владимир Иванович

УДК 681.518.3+681.782.473

МЕТОДЫ РАСШИРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА И
ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В
АВТОМАТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Специальности

05. 11.07-Оптические и оптико-электронные приборы

05.11.16 - Информационно-измерительные системы

(в промышленности)

Диссертация на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук,

профессор А.Г. Козачок

НОВОСИБИРСК-1999

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КАРТИН...	14
1.1. Методы получения интерферограмм.....	14
1.1.1. Базовое уравнение интерферометрии.....	14
1.1.2. Голографическая интерферометрия.....	16
1.1.3. Спекл-интерферометрия.....	17
1.2. Методы расшифровки интерференционных картин.....	20
1.3. Методы удаления фазовой неоднозначности.....	30
1.4. Интерференционные измерительные системы для анализа оптически чистых поверхностей.....	36
1.5. Выводы.....	40
2. РАСШИФРОВКА ИНТЕРФЕРОГРАММ МЕТОДОМ ПОШАГОВОГО ФАЗОВОГО СДВИГА.....	42
2.1. Влияние погрешностей измерений интенсивности и задания сдвига на точность определения поля фаз.....	42
2.2. Коррекция линейных ошибок при задании фазового сдвига.....	54
2.2.1. Коррекция линейных ошибок с помощью усредня- ющей технологии.....	55
2.2.2. Коррекция линейных ошибок с помощью усред- нения углов сдвига.....	60
2.3. Коррекция нелинейных ошибок.....	67

2.3.1. Коррекция нелинейных ошибок методом наименьших квадратов.....	68
2.3.2. Алгоритм для высокоточных измерений фазы.....	71
2.4. Выводы.....	80
3. МЕТОДЫ РАСШИФРОВКИ ЦИФРОВЫХ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОГРАММ.....	82
3.1. Формирование корреляционных полос.....	84
3.2. Методы расшифровки с использованием управляемого фазового сдвига.....	91
3.3. Методы расшифровки, основанные на рассмотрении спекл-структуры как информационной части сигнала.....	94
3.4. Алгоритмы расшифровки устойчивые к линейным ошибкам при задании сдвига.....	105
3.5. Использование усреднения на элементе детектора	105
3.6. Выводы.....	113
4. РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	115
4.1. Использование теоремы об остатках для восстановления полной фазы.....	116
4.2. Сравнение с двухчастотным методом.....	122
4.3. Влияние эффектов квантования и дискретизации на определение полной фазы.....	126
4.4. Погрешности от неопределенности задания длины волны	131
4.5. Коррекция ошибок.....	132
4.6. Устранение относительного постоянного сдвига исходных фазовых полей.....	150

4.7. Компьютерное моделирование целочисленного алгоритма восстановления полной фазы.....	154
4.8. Определение полной фазы при изменении угла между интерферирующими пучками.....	161
4.9. Выводы.....	165
5. РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВА- НИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТ- ТЕМ.....	167
5.1. Структура и основные элементы автоматизированной интерференционной системы.....	167
5.1.1. Фазовые модуляторы.....	170
5.1.2. Устройства ввода оптической информации.....	173
5.1.3. Программное обеспечение.....	180
5.2. Анализ напряженно-деформированного состояния объек- тов при использовании голографических накладных интерферометров.....	184
5.3. Определение отклонений от плоскости поверхности опти- ческих элементов.....	191
5.4. Определение поля прогиба и рельефа поверхности.....	197
5.5. Система для определения внеплоскосных деформаций методом цифровой спекл-интерферометрии.....	203
5.6. Разработка измерителя абсолютных линейных перемеще- ний.....	208
5.7. Выводы.....	217
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	219

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	221
ПРИЛОЖЕНИЯ	244
Приложение А. Необходимые условия для однозначного определения разности фаз.....	244
Приложение Б. Нахождение границ окрестности грубых сбоев.....	248
Приложение В. Материалы, подтверждающие внедрение и использование результатов диссертации.....	253

Введение

Актуальность. Современный уровень развития промышленных технологий и научных исследований требует применения высокоточных методик контроля и измерений.

За последние годы произошел значительный прогресс в развитии интерференционных методов. С их помощью проводятся измерения напряженно-деформированного состояния объектов, вибрационных характеристик, параметров рельефа, анализ качества обработки поверхностей, дефектов структуры, параметров оптических элементов, оптических характеристик сред и т.п. С высокой точностью возможно получение информации одновременно по всей поверхности изучаемого объекта при решении как статических, так и динамических задач.

Разработка интерференционных измерительных систем - перспективное направление информационно-измерительной техники, требующее серьезного внимания и дальнейшего развития. Однако при решении этой задачи возникает ряд проблем, сдерживающих широкое распространение интерференционных методик в экспериментальной практике.

Классическая интерферометрия применима для измерения небольших изменений хода световых лучей, т.е. исследуемые объекты должны создавать волны, близкие к эталонным фронтам, обычно плоским или сферическим. Это условие выполняется при исследовании полированных и зеркально отражающих поверхностей.

Появление в 60-х годах лазеров привело к возникновению методов голографической и спекл-интерферометрии, которые являются расширением классических методов интерферометрии. После изобретения голографии появилась возможность распространения

интерференционных измерений на диффузно отражающие объекты, имеющие сложную форму. Применение интерференционных систем для исследования промышленных деталей и конструкций в заводских условиях сдерживается необходимостью записи промежуточных голограмм на внешний фотоноситель. Попытки заменить фотографические пластинки другими регистрирующими средами приводили к уменьшению точности измерений и не давали существенного упрощения аппаратуры. При непосредственном вводе оптических картин в компьютер упрощается технология обработки. Для записи голограммы в дискретном виде необходимо разрешение 1000-2000 мм⁻¹. Ограниченная разрешающая способность современных устройств ввода не позволяет производить непосредственный анализ голографических изображений.

В спекл-интерферометрии требования к разрешающей способности регистрирующей среды являются более низкими и телевизионное разрешение является вполне достаточным. Этот способ является наиболее подходящим для создания промышленных измерительных систем. Но в настоящее время они значительно уступают по точности классической и голографической интерферометрии.

Интерференционная картина содержит большой объем измерительной информации об исследуемом объекте. Это, с одной стороны, является несомненным преимуществом интерференционных методов, а с другой - значительно усложняет разработку измерительных систем из-за высокой сложности количественной расшифровки.

Анализ современного состояния методов анализа интерферограмм показывает, что в настоящее время резко возрастает функциональная нагрузка на вычислительный комплекс, который превратился в один из основных элементов интерференционных систем. Интерферометр в

таких системах является первичным преобразователем поля измеряемых величин в интерференционную картину, которая с помощью электронно-оптических устройств вводится в компьютер для дальнейшей обработки. ЭВМ выполняет функции сбора и обработки данных. Использование компьютера еще и для управления параметрами оптической схемы позволяет реализовать ряд новых методик, характеристики которых значительно превосходят традиционные, и дают возможность полностью автоматизировать процесс измерений.

Разработка эффективных высокоточных способов получения и расшифровки оптических интерференционных полей в голографической и спекл-интерферометрии является актуальной задачей, решение которой позволяет создать качественно новые интерференционные измерительные системы для использования не только в лабораторных, но и в производственных условиях.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование эффективных методов получения, обработки и расшифровки интерференционных картин для создания нового класса интерференционных измерительных систем, обеспечивающих высокое быстродействие, точность, широкий динамический диапазон, возможность полной автоматизации и работы в реальных производственных условиях.

Для достижения этой цели необходимо провести анализ методов определения характеристик оптических волновых полей с целью получения количественной информации об измеряемых параметрах; разработать новые эффективные алгоритмы получения и расшифровки интерференционных картин; способы повышения динамического диапазона фазовых методов; оценить достоверность полученных результатов; разработать и изготовить электронные и механические

узлы для управления параметрами оптической установки; программно-алгоритмическое обеспечение, и на этой основе создать автоматизированные интерференционные измерительные системы для решения ряда научных и инженерно-технических задач.

Связь с государственными программами и НИР. Работы по теме диссертации выполнялись в соответствии с Единой целевой комплексной научно-технической программой О.Ц.047, задание 06.21 (№№ гос.рег.74029772, 01820090029, У88871, У17700, 01840035541); научно-технической программой ГКНТ 080.03, задание 06.15А (№№ гос.рег.81029971, 1850038872); координационными планами АН СССР по проблемам «Измерительные процессы и системы» (№№ гос.рег.76028712, 81044795, У00197) и «Оптика. Квантовая электроника» (№№ гос.рег.74050015, 77050215, 79000614); федеральной программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского направления» на 1996-2000 годы (подпрограмма «Наукоемкие технологии»); плану комплексных исследований РАН по проблеме «Неразрушающие физические методы контроля».

Методы исследований. В работе использовались методы волновой оптики, прикладной математики, функционального и спектрального анализа, теории чисел, а также компьютерное моделирование и физический эксперимент.

Научная новизна. В представленной работе предложены, обоснованы и разработаны новые методы получения и расшифровки интерферограмм, новые способы расширения динамического диапазона фазовых методов, показана возможность построения интерференционных измерительных систем с повышенными метрологическими характеристиками на основе внесения управляющих воздействий.

Впервые предложены высокоточные способы расшифровки классических и голографических интерферограмм, устойчивые к случайным ошибкам при задании фазового сдвига, и высокоточные методы получения и расшифровки спекл-интерферограмм, основанные на рассмотрении модельных уравнений при получении спеклограмм, устойчивые к линейным ошибкам при задании фазового сдвига.

Разработан метод расширения фазовой однозначности, основанный на использовании целочисленной арифметики. Предложен новый способ коррекции ошибочных значений, позволяющий использовать этот метод при практических измерениях полной фазы. Разработаны и реализованы быстрые алгоритмы коррекции.

Разработано универсальное алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее использовать существующие способы расшифровки для анализа интерференционных картин, полученных методами классической, голографической или спекл-интерферометрии.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Использование интерференционных измерительных систем, разработанных на основе предложенных методов, существенно расширяет область применения систем, увеличивает точность и диапазон измерений, упрощает технику эксперимента. При этом достигается полная автоматизация процесса измерений.

Созданные интерференционные измерительные системы на качественно новом уровне решают задачи экспериментальной механики и оптического приборостроения, в том числе, в реальных производственных условиях: при решении задач фазометрии в НПО "Астрофизика", в НИИТО для анализа рентгенологических данных, в НПО "Новосибирский приборостроительный завод" для анализа отклонений поверхности изделий от плоскости и сферы. Совместно с

НПО "НПЗ" разработан новый измеритель абсолютных перемещений.

Полученные результаты использованы при выполнении 14 научно-исследовательских работ.

Основные положения выносимые на защиту:

- высокоточный способ расшифровки интерферограмм устойчивый к линейным и нелинейным ошибкам при задании сдвига;

- способ расшифровки спекл-интерферограмм, позволяющий приблизить точность метода цифровой корреляционной спекл-интерферометрии к интерференционной;

- метод увеличения динамического диапазона интерференционных измерений на основе расширения области фазовой однозначности при использовании нескольких измерений с различными ценами полос;

- способ коррекции ошибок при определении полной фазы по фазовым значениям в пределах периода, измеренным при различных ценах интерференционных полос;

- алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированных интерференционных измерительных систем;

- измеритель перемещений, позволяющий по серии локальных измерений определять абсолютную величину перемещений.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 6-й Всесоюзной конференции "Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ" (Новосибирск, 1981), на 16-ой Всесоюзной школе по автоматизации научных исследований (Горький, 1982), на 19-ой Всесоюзной школе по автоматизации научных исследований (Новосибирск, 1985), на Всесоюзном семинаре "Интерференционно-оптические методы механики твердого тела и механики горных пород" (Новосибирск, 1985), на Пятой Всесоюзной конференции по голографии (Рига, 1985), на Всесоюзном семинаре

"Методы контроля формы оптических поверхностей" (Москва, 1989), на Международной конференции "Interferometry'89" (Warsaw, 1989) на Всесоюзном симпозиуме "Методы и применение голографической интерферометрии" (Куйбышев, 1990), на Международном симпозиуме "Sino-Soviet symposium on astronautical science and technology" (Harbin, China, 1991), на конференции с международным участием "Проблемы электротехники. Автоматика." (Новосибирск, 1993), на Всероссийской научно-практической конференции "Высшая школа России и конверсия" (Москва, 1993), на Международной конференции "Измерительные информационные системы" (Москва, 1994), на 3-й Международной конференции "Измерения, контроль и автоматизация производственных процессов" (Барнаул, 1994), на Международной конференции "Photomechanics'95" (Новосибирск, 1995), на III Международной научно-технической конференции "Микропроцессорные системы автоматики" (Новосибирск, 1996), на Втором и Третьем Сибирских Конгрессах по Прикладной и Индустриальной Математике (Новосибирск, 1996, 1998) на Международной конференции "Прикладная оптика-98" (Санкт-Петербург, 1998) .

Основное содержание диссертации опубликовано в 52 печатных работах.

Личный вклад. Постановка задач, способы решения и полученные при этом основные научные результаты принадлежат лично автору. Экспериментальные исследования, разработка измерительных систем и их практическая реализация выполнялась сотрудниками научного коллектива под руководством и при участии автора.

Структура и объем диссертации. Содержание диссертации изложено во введении, пяти главах и заключении. В первой главе приведен анализ интерференционных методов определения фазовых характеристик

волновых полей, полученных при отражении от исследуемых объектов, и рассмотрены существующие методы расшифровки. Во второй главе проведена классификация способов расшифровки интерференционных картин на основе пошагового фазового сдвига, исследованы метрологические характеристики, предложены новые методы коррекции линейных и случайных ошибок при внесении фазового сдвига. В третьей главе рассмотрены новые методы получения и расшифровки спекл-интерферограмм, основанные на анализе модельных уравнений образования спеклограмм. Четвертая глава посвящена методам расширения фазовой однозначности, особое внимание уделяется быстрым алгоритмам коррекции ошибок при использовании метода устранения фазовой неоднозначности, основанного на решении систем сравнений. В пятой главе рассмотрены основные составляющие части автоматизированных интерференционных измерительных систем, описаны измерительные системы, разработанные для решения ряда инженерных и научных задач.

Автор благодарен профессору, д.т.н. Козачку А.Г. за советы и поддержку на различных этапах проведенных исследований, профессору, д.т.н. Солодкину Ю.Н. за обсуждение и совместную работу по разработке методик устранения фазовой неоднозначности, профессорам д.т.н. Дубнищеву Ю.Н., д.т.н. Клисторину И.Ф., д.т.н. Борукаеву Т.Б. за полезные советы при написании работы.

Настоящая работа выполнена в Лаборатории автоматизации экспериментальных исследований Новосибирского государственного технического университета. Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории за помощь при выполнении и обработке результатов экспериментов.

1. Методы анализа интерференционных картин

Развитию методов измерений, основанных на интерференционных принципах, способствовало изобретение лазеров. Благодаря высокой степени когерентности лазерных источников, получение интерференционных картин относительно просто, однако извлечение из них фазовой информации является сложной задачей.

В этой главе представлены основные методы получения голографических и спекл-интерферограмм и способы их расшифровки. Большой вклад в развитие этих методов внесли зарубежные исследователи - Р.Пауэлл, К.Стетсон, М.Франсон, Д.Уянт, К.Крис, Д.Робинсон, С.Накадэйт, М.Такеда, П.Карре, Р.Крейн и российские ученые - Е.Б.Александров, А.М.Бонч-Бруевич, Ю.И.Островский, Г.В.Островская, М.М.Бутусов, В.М.Гинзбург. В работах сотрудников лаборатории голографии НГТУ А.Г.Козачка, Ю.Н.Солодкина, А.В.Логинова рассмотрены основные принципы построения и функционирования голографических измерительных систем.

1.1. Методы получения интерферограмм

Исходной информацией для получения распределения разности фаз в интерференционных методах исследований является картина интерференционных полос - интерферограмма.

1.1.1. Базовое уравнение интерферометрии

При разработке когерентно-оптических измерительных систем. Наиболее часто используются двухлучевые интерферометры.

Падающая электромагнитная волна делится на два когерентных пучка: на объектную (предметную) волну и опорную (эталонную) волну. В качестве делителя луча обычно используется полупрозрачное зеркало. После прохождения соответствующих путей и накопления фазовых задержек происходит суперпозиция объектной и опорной волн на втором светоделителе.

Так как в оптическом диапазоне волн существуют только квадратичные низкочастотные детекторы, они реагируют на суммарную интенсивность, которая определяется как /4/

$$I(x, y) = I_0(x, y)(1 + V(x, y)\cos(\varphi_p(x, y) - \varphi_r(x, y))) , \quad (1-1)$$

где $(\varphi_p - \varphi_r)$ - разность фаз между объектной и опорной волнами, $I_0(x, y)$ - средняя интенсивность, $V(x, y)$ - модуляции интенсивности или видность. Это базовое уравнение двухлучевой интерферометрии.

Поскольку опорный (эталонный) пучок в большинстве случаев может быть только плоским или сферическим, то классическая интерферометрия применима для измерения небольших изменений хода световых лучей, а это значит, что и исследуемые объекты должны создавать волны с фронтами близкими эталонным. Это условие выполняется при исследовании оптически совершенных объектов - зеркал, линз, пластин с полированными и зеркально отражающими поверхностями.

После изобретения голографии в интерферометрии произошел качественный скачок. Использование голографических методов позволило регистрировать как угодно сложный комплексный волновой фронт, запоминать и восстанавливать его в любой момент времени.

1.1.2. Голографическая интерферометрия

Голография расширила функциональные возможности интерферометрии, позволив проводить измерения диффузно отражающих объектов /1, 5, 76, 77, 89/. Оптические свойства поверхности, сложность формы объектов практически перестали играть роль ограничивающего фактора, поэтому методы голографической интерферометрии оказались пригодными для исследования промышленных деталей и конструкций в заводских условиях /14, 63, 168, 209/.

Различают три основных способа получения голографических интерферограмм /63, 71, 78/.

Двухэкспозиционная голографическая интерферометрия. На одну и ту же пластинку до проявления производят запись голограмм объекта в двух состояниях, например до и после приложения статической нагрузки.

Голографическая интерферометрия с усреднением по времени. Метод усреднения по времени основан на длительной экспозиции объекта, испытывающего циклическое вибрационное воздействие, во время которого происходит интерференция между совокупностью отдельных изображений. Наиболее четко на интерферограмме проявляются стационарные полосы, записанные при скорости объекта равной нулю, т.е. в крайних амплитудных положениях.

Голографическая интерферометрия в реальном масштабе времени. Производится запись голограммы неподвижного объекта, после чего полностью обработанная фотопластинка возвращается на то же место в оптической установке. Затем исследуемый объект наблюдается сквозь голограмму. Любая деформация поверхности объекта приводит к

возникновению интерференционных полос, наблюдаемых в реальном масштабе времени.

Отдельную группу образуют голографические методы получения топографических интерферограмм. Эти методы были развиты сотрудниками лаборатории голографии НГТУ. Такие интерферограммы получают, используя две экспозиции, но перед второй экспозицией меняется не объект, а один из параметров интерферометра: направление освещающей объект световой волны (метод смещенного источника), показатель преломления среды (иммерсионный метод) или длина волны лазера (двухдлинноволновый метод) /53, 54, 74/. В этом случае интерференционные полосы являются линиями равных высот точек поверхности и позволяют определить параметры рельефа /11, 12, 13, 55/.

1.1.3. Спекл-интерферометрия

Необходимость регистрации промежуточных голограмм на внешний фотоноситель является сдерживающим фактором при использовании голографических измерительных систем в условиях реального производства. Попытки заменить фотографические пластинки другими регистрирующими средами приводили к уменьшению точности измерений и не давали существенного упрощения аппаратуры.

Непосредственный ввод оптических картин в компьютер существенно упрощает технологию обработки. Однако, для записи голограммы в дискретном виде необходимо разрешение порядка 1000-2000 линий на один мм. Недостаточная разрешающая способность современных устройств ввода оптических изображений затрудняет непосредственный анализ голографических изображений без регистрации на промежуточный фотоноситель /15, 64/.

Спекл-интерферометрия относится к методам, для которых телевизионное разрешение является достаточным /55, 62, 82, 90/.

В спекл-интерферометрии различают спекл-фотографию и корреляционную спекл-интерферометрию. В каждом из этих методов оптически шероховатая поверхность наблюдается в начальном и смещенном относительно него положениях. В зависимости от способа регистрации и наблюдения интерференционной картины можно добиться, чтобы расстояние между полосами было чувствительным к локальным смещениям поверхности, или либо к первым или вторым производным этих смещений.

Метод спекл-фотографии /55/ основан на последовательной фотографической регистрации световых пучков, рассеянных диффузно-отражающей поверхностью при когерентном освещении до и после деформации объекта. В результате на фотопластинке фиксируются две идентичные спекл-структуры. Они смещены по отношению друг к другу на некоторое расстояние. Если осветить проявленную фотопластинку плоской волной, то в фурье-плоскости возникает картина дифракционных полос. Расстояние между этими полосами совпадает с интервалами между интерференционными полосами при дифракции на двух щелях. Поэтому их часто называют полосами Юнга /90/.

Метод спекл-фотографии имеет свои достоинства, заключающиеся в простоте и доступности оборудования. К недостаткам метода относится сложность получения полностью сфокусированного по всей плоскости фотопластинки изображения. Кроме того, чувствительность измерений ограничивается величиной смещений, превышающей размеры спеклов.

Корреляционная спекл-интерферометрия /55/ основана на сравнении спеклограмм исходной и деформированной поверхности объекта. Спеклограммы формируются в результате интерференции объектного и

опорного пучков. При этом образуется картина корреляционных полос, несущих информацию о поле смещения или деформации на поверхности объекта.

Требования к разрешающей способности регистрирующей среды по сравнению с голографическими методами являются более низкими. Возможность регистрации спеклограмм непосредственно с помощью телевизионных систем обеспечивается простотой получения спекл-картин с размером спеклов в пределах 5-100 мкм. Поэтому можно использовать обычные телевизионные камеры, обладающие относительно низкой разрешающей способностью.

В электронной спекл-интерферометрии для сравнения спеклограмм применяется видеозапись. Сравнение осуществляется с помощью процедуры сложения или вычитания видеосигналов. Цифровая спекл-интерферометрия основана на использовании компьютерных систем обработки изображений для корреляционного сравнения спеклограмм исходной и деформированной поверхностей объекта. Этот способ оказывается наиболее приспособленным к условиям промышленного производства.

Для получения количественных данных необходимо выполнять расшифровку корреляционных полос при определении деформаций поверхности объекта. Точность результатов из-за высокого уровня спекл-шума значительно уступает голографической интерферометрии [110]. Однако потенциальные возможности метода спекл-интерферометрии значительно выше. В диссертации представлены новые методы получения и расшифровки спекл-интерферограмм, которые позволяют приблизить точность измерения смещений и деформаций поверхности к методам голографической интерферометрии (Глава 3).

1.2. Методы расшифровки интерференционных картин

Задача расшифровки - выделение из интерференционной картины фазовых значений волнового фронта.

Рассмотрим интерференцию двух когерентных волн. Комплексную амплитуду неизвестного поля в плоскости регистрации можно определить, изменяя опорную волну в плоскости регистрации при неизменном объектном волновом поле. Базовое уравнение двухлучевой интерферометрии (1-1) может быть представлено в виде

$$I(x,y) = I_0(x,y) \{1 + V(x,y) \cos(\Phi(x,y) - f)\} , \quad (1-2)$$

где $\Phi(x,y) = \varphi_p(x,y) - \varphi_r(x,y)$, а f - некоторая известная фазовая добавка.

Из уравнения (1-2) видно, что кроме разности фаз $\Phi(x,y) = \varphi_p(x,y) - \varphi_r(x,y)$ есть еще два неизвестных: средняя интенсивность - $I_0(x,y)$ и видность - $V(x,y)$.

Существует два подхода к цифровой обработке интерференционных картин [8]. Первый подход основывается на предположении об интерференционном сигнале как реализации случайного процесса. Второй предполагает детерминированный характер интерференционных измерений. При этом задача сводится к синтезу относительно простых операторов обработки, реализующих обратные тригонометрические функции и устойчивых к вносимым помехам.

Отсюда различные методы определения разности фаз по интерференционным картинам можно разделить на две группы [2, 115].

К первой группе относятся статические методы. Расшифровка ведется по одной интерферограмме. Значения средней интенсивности и видности определяются сглаживанием и последующей аппроксимацией

для устранения влияния шумов. Для реализации этих методов не требуется модификация известных интерферометров, однако, точность расшифровки недостаточна. Детальный анализ шумов в интерференционной системе трудоемок, и выполнить его на практике не всегда возможно.

Другую группу составляют динамические методы. Расшифровка производится по серии интерферограмм, каждая из которых получена при некотором известном изменении параметров интерферометра. Определяются все параметры интерференционного сигнала (разность фаз, средняя интенсивность, и модуляция интенсивности). Эти методы позволяют значительно увеличить точность расшифровки, но при этом возникает необходимость в модификации известных оптических систем или в разработке новых.

К статическим можно отнести: методы, основанные на выделении центров полос и методы, основанные на разделении частотных составляющих в спектральной плоскости.

Расшифровка интерферограмм с выделением центров полос. Это первый способ, нашедший применение для получения количественной информации. Он заключается в измерении координат центров полос, и определении их порядка. Разность фаз в промежутках между полосами определяется с помощью различных методов аппроксимации, которые выбираются так, чтобы результаты наиболее полно соответствовали априорной информации о поведении искомой разности фаз. В механике, например, широко распространена аппроксимация сплайнами, в оптике - полиномами Цернике /201/. Способ не требует модификации оптической схемы интерферометра, что позволяет использовать его для автоматизации расшифровки интерферограмм во всех существующих схемах классических и голографических интерферометров.

Развитие систем автоматизации связано с появлением устройств ввода оптической информации в компьютер и с разработкой алгоритмов выделения центров полос по картинам интерференционных полос [175, 176, 211]. В настоящее время разработаны алгоритмы, которые достаточно уверенно выделяют центры полос для различных классов изображений. Однако полностью универсального алгоритма, способного обрабатывать все виды интерференционных картин, не существует. Наиболее приемлемым представляется сочетание автоматических алгоритмов с визуальной интерпретацией и интерактивной коррекцией результатов оператором.

К недостаткам методов расшифровки на основе выделения центров полос можно отнести следующее:

- без участия оператора невозможно определить знак приращения фазы в интерференционных картинах сложной формы;
- точность выделения центров полос снижается из-за вариаций амплитуд интерферирующих волновых полей, вызванными спекл-шумами, вибрациями, воздушной турбулентностью;
- аппроксимация вносит произвол при определении фазы в промежутках между центрами полос;
- трудно определить и скомпенсировать дефекты интерферометра.

В большинстве систем, использующих этот метод расшифровки, точность выделения центров полос не превышает десятой доли полосы, алгоритмы обработки достаточно сложны и недостаточно эффективны, полное время обработки велико, требуется участие оператора в процессе обработки и расшифровки.

Расшифровка интерферограмм с использованием спектрального анализа. Если частоты средней интенсивности, вариации интенсивности, и фазы намного меньше, чем пространственная частота

интерференционных полос, то полезная часть сигнала, содержащая информацию о фазе, может быть выделена с помощью фильтрации в частотной области или с применением цифровых фильтров непосредственно в пространственной области. Способы расшифровки, основанные на Фурье-преобразовании, описаны в [150, 179, 197]. Использование цифровой фильтрации рассмотрено нами, например, в [35, 38].

Методы, основанные на анализе спектральных составляющих, более точны и легко реализуемы по сравнению с методами, основанными на выделении центров полос. Однако область применения ограничена пространственным разрешением спектров интерференционных картин.

Динамические методы можно разделить на три группы по способу внесения фазового сдвига: фазо-фиксирующая интерферометрия; гетеродинная интерферометрия; и пошаговая или фазо-сдвигающая интерферометрия.

Фазо-фиксирующая интерферометрия. В этом методе [149, 161] фаза опорной волны модулируется по времени

$$f(x,y;t) = \alpha \sin(\omega t) + \varphi'(t) . \quad (1-3)$$

Гармоническая компонента модуляции $\alpha \sin(\omega t)$ осуществляется за счет колебания плоского зеркала с амплитудой α и частотой ω в опорном плече. Непериодическая составляющая φ' определяется поступательным движением этого же зеркала [159]. Могут использоваться и другие устройства для внесения фазового сдвига, например, зеркальный гальванометр [153]. В последнее время появилось много работ, использующих свойство фотодиодных лазеров изменять длину волны излучения при изменении тока накачки. Такие

интерферометры не содержат механически перемещающихся элементов. Поэтому их точность не зависит от свойств механических преобразователей, и определяется лишь параметрами электронной управляющей системы /193/.

Коэффициентами разложения выражения (1-2) в ряд с учетом опорной фазы типа (1-3) являются функции Бесселя. Изменяющиеся со временем составляющие U_W и U_{2W} с частотой ω и 2ω могут быть выделены электронными фильтрами. Можно показать, что при разности фаз $(\Phi - \varphi') = n\pi$ составляющая U_W равна нулю, а компонента U_{2W} достигает максимального значения. Управление производится так, чтобы меняя фазу φ' зафиксировать положение при котором $U_W = 0$. Отсюда название этого вида интерферометров - фазо-фиксирующие. Изменение Φ для различных точек (x, y) контролируется на мониторе синхронно с отклонениями φ' .

Основной проблемой фазо-фиксирующей интерферометрии является высокая чувствительность процесса к фазовым дрейфам всей аппаратуры. Поэтому, погрешность измерений обычно не превышает $\lambda/30$.

Гетеродинная интерферометрия основана на введении известного частотного сдвига $\Delta\omega$ между опорным и объектным когерентными пучками /152/.

В результате фотосмещения пучков переменная компонента фотоэлектрического сигнала с выхода фотоприемника, помещенного в стационарную точку интерференционного поля имеет вид:

$$i_s \approx I_1 \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi_s), \quad (1-4)$$

Для фотоприемника, помещенного в другой точке интерференционного

поля

$$i_r \approx I_2 \cos (\Delta\omega t + \Delta\phi_r) . \quad (1-5)$$

Сигналы (1-4) и (1-5) поступают на фазовый компаратор, фиксирующий разность фаз, соответствующих сдвигу фаз между пространственно разнесенными точками интерференционного поля.

В гетеродинной интерферометрии для высокоскоростных измерений необходимо создавать системы, состоящие из набора параллельно работающих детекторов. Для измерений медленно меняющихся процессов подходят электронно-сканирующие детекторы (например, электронно-лучевая трубка типа диссектора). Системы детектирования с механическим сканированием подходят только для стационарных объектов.

Гетеродинная интерферометрия обеспечивает наибольшую из всех известных методов точность. Однако использование такой технологии требует сложной и специализированной аппаратуры.

Методика определения фазовых разностей в интерферометрах, у которых объектная волна модулируется по синусоидальному закону, описана в [179, 182]. В отличие от обычной гетеродинной методики в таких системах может использоваться более простой модулятор.

Метод пошагового фазового сдвига основан на регистрации нескольких интерферограмм при изменении фазы опорной волны на известные значения:

$$f_r = (r-1) \delta_0 \quad (1-6)$$

Существует два способа внесения фазового сдвига: дискретный и непрерывный. Дискретный сдвиг изменяет фазу светового пучка на некоторую величину. Затем осуществляется ввод установившегося

значения интерференционной картины в компьютер. При непрерывном сдвиге фаза меняется линейно во времени. Значения интенсивности считываются с помощью интегрирующего детектора, который усредняет значения по мере изменения фазы. Усреднение происходит за временной интервал, при котором фаза меняется на заданную величину.

В последние годы этот метод наиболее часто используется при создании измерительных интерференционных систем. Это вызвано простотой задания отдельных значений фазового сдвига, достаточно простыми алгоритмами и высокой точностью расшифровки. При этом существующие схемы интерферометров достаточно просто модифицируются.

При различных фазовых сдвигах интенсивность интерферограммы со сдвигом δ_i можно представить в виде

$$I_i = I_0(x,y) \{1 + V(x,y) \cos[\phi(x,y) + \delta_i]\}, \quad (1-7)$$

где $i=1,2, \dots, m$, m - число фазовых сдвигов и $\delta_1=0$. Если фазовые сдвиги одинаковы в интервале от 0 до π , т.е. $\delta_i=2\pi(i-1)/m$, то фаза ϕ может быть определена [97] как

$$\phi = \arctan \frac{\sum_{i=1}^m I_i \sin \delta_i}{\sum_{i=1}^m I_i \cos \delta_i} . \quad (1-8)$$

Алгоритмы, полученные при различных значениях m , называются m -точечными алгоритмами или алгоритмами с m -шагами. При трех произвольных сдвигах, решая тригонометрическую систему, состоящую из трех уравнений типа (1-7), имеем

$$\phi = \arctan \frac{(I_2 - I_3)\sin \delta_1 + (I_3 - I_1)\sin \delta_2 + (I_1 - I_2)\sin \delta_3}{(I_3 - I_2)\cos \delta_1 + (I_1 - I_3)\cos \delta_2 + (I_2 - I_1)\cos \delta_3} . \quad (1-9)$$

При $\delta_1 = 0^\circ$, $\delta_2 = 120^\circ$, $\delta_3 = 240^\circ$ выражение (1-9) примет вид:

$$\phi = \arctan \sqrt{3} \frac{I_3 - I_2}{2I_1 - I_2 - I_3} . \quad (1-10)$$

Такой способ расшифровки использовался в работах /79, 134/. Еще более простая формула была получена для $\delta_1 = \pi/4$, $\delta_2 = 3\pi/4$, $\delta_3 = 5\pi/4$ в /209/:

$$\phi = \arctan \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} . \quad (1-11)$$

При четырех фазовых сдвигах $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = \pi/2$, $\delta_3 = \pi$ и $\delta_4 = 3\pi/2$ /207/ получается такое же простое выражение:

$$\phi = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} . \quad (1-12)$$

Эта формула часто используется при компьютерной обработке, т.к. математические операции, необходимые для ее реализации, являются очень простыми и могут быть реализованы с помощью основных команд процессора.

Функция \arctan определена в пределах от $-\pi/2$ до $\pi/2$. Можно показать /29/, что знаки числителя и знаменателя в каждом из приведенных выше алгоритмов эквиваленты знакам синуса и косинуса от искомой фазы. Таким образом, анализируя знаки числителя и знаменателя можно расширить область определения функции от

0 до 2π .

Сдвиг фаз между интерферирующими пучками может меняться не дискретно, а непрерывно. Интенсивность суммируется в течение определенного временного интервала. При этом должна поддерживаться точная синхронизация между временем интегрирования на детекторе и перемещением пьезоэлектрически сдвигающегося зеркала. Если фазовый сдвиг изменяется в виде пилы, то формулы расшифровки совпадают с формулами пошагового фазового сдвига.

Помимо приведенных выше существует достаточно много алгоритмов с большим числом фазовых сдвигов. Еще несколько лет назад ограничивающими факторами при использовании таких алгоритмов являлись: объем памяти для запоминания промежуточных кадров и время, необходимое для обработки. Лучшими считались те, которые использовали наименьшее число сдвигов и, соответственно, меньшее число кадров для хранения интерферограмм. Наиболее часто применялись трех и четырехточечные алгоритмы /16, 26, 28/. Повышение компьютерной мощности позволило применять алгоритмы с большим числом сдвигов. Обычно такие алгоритмы более устойчивы к ошибкам, возникающим при изменении освещенности, вследствие механических вибраций, и к погрешностям установки фазового сдвига.

Можно сконструировать алгоритмы с достаточно большим числом шагов. В качестве примера приведем 15-точечный алгоритм /124/, использующий вещественные числа в качестве коэффициентов:

$$\phi = \arctan \frac{-0.006(I_1 - I_{15}) + 0.166(I_3 - I_{13}) - 0.87(I_5 - I_{11}) + 1.828(I_7 - I_9)}{-0.0434(I_2 + I_{14}) + 0.435(I_4 + I_{12}) - 1.392(I_6 + I_{10}) + 2I_8} .$$

(1-13)

Для определения числа сдвигов, достаточного для достижения заданной точности, автором проведен анализ основных источников погрешностей измерений, возникающих при использовании метода пошагового фазового сдвига, и рассмотрено их влияние на алгоритмы с различным числом шагов (Глава 2).

Ошибки при внесении фазового сдвига существенно сказываются на результатах измерения, что является недостатком метода. Для повышения точности автором предложены алгоритмы, позволяющие корректировать линейные и случайные ошибки при установке фазового сдвига (Глава 2).

1.3. Методы устранения фазовой неоднозначности

Поскольку косинус является периодической функцией, значения фаз могут быть восстановлены только с точностью до периода, поэтому все интерференционные методы измерений обладают фазовой неоднозначностью.

Измерительные системы на основе интерференционных принципов имеют диапазон, ограниченный несколькими длинами волн. При использовании систем для контроля промышленных изделий необходимо расширить диапазон измерений. Другими словами, требуется увеличивать область однозначного определения фазовых значений, или, что то же самое, устранять фазовую неоднозначность в требуемом диапазоне.

Для решения этой задачи необходима некоторая дополнительная информация об исследуемом волновом поле.

Алгоритмы, основанные на разворачивании фаз. Наибольшее число алгоритмов устранения фазовой неоднозначности основано на анализе пространственной структуры поля фаз. Полная фаза определяется разворачиванием фазы, т.е. последовательным добавлением или вычитанием 2π в соседних точках. Решение о существовании фазового перехода в точке принимается в зависимости от результатов анализа ее окрестности. Процедура добавления 2π может рассматриваться как экстраполяционный процесс. Используется информация о предыдущих восстановленных точках для определения волнового фронта в следующих точках.

Первые работы по фазовому разворачиванию строились на сравнении соседних значений в столбцах и строках /165/. Если соседние значения по столбцам

$$I_W(i,j+1) - I_W(i,j) \approx 2\pi, \text{ то } I_{n1}(i,j+1) = I_W(i,j+1) \pm 2\pi, \quad (1-14)$$

и по строкам

$$I_{n1}(i+1,j) - I_{n1}(i,j) \approx 2\pi, \text{ то } I_n(i+1,j) = I_{n1}(i+1,j) \pm 2\pi, \quad (1-15)$$

то в идеале должно получиться непрерывное фазовое распределение $I_{n1}(i,j)$.

Однако при практическом использовании этого алгоритма возникают серьёзные проблемы, связанные с влиянием различных источников шума. Поскольку процесс зависит от предыдущих вычислений, единичная ошибка приводит к лавинообразному нарастанию погрешности.

Лучшие результаты даёт модификация этого метода, разработанная автором, с использованием анализа по областям /23/. При этом подходе каждая точка связана с определенной областью, в которой не должно быть фазовых скачков. Каждая область ограничена линиями фазовых разрывов. Фазовая неоднозначность удаляется сравнением координат исходной точки с границами области. При переходе к соседним областям добавляется или вычитается 2π . Этот метод более устойчив, чем метод анализа по строкам и столбцам. Однако не существует способа определения резких скачков для случаев порогообразного изменения фазы, а при высоком уровне шумов не удастся отследить четкие границы областей.

Если можно определить разности фазовых значений в соседних точках для двух направлений (по x и y) в узлах прямоугольной решетки, то можно получить оценку распределений фаз суммированием предыдущих значений. Как правило, набор фазовых разностей

представлен зашумленными разностями в узлах прямоугольной сетки. Естественный подход к решению этой проблемы - оценивание распределений фаз по методу наименьших квадратов (МНК), т.е. минимизация суммарной квадратичной ошибки и получение оценки волнового фронта. Система нормальных уравнений по своему виду совпадает с системой, получаемой при решении уравнения Пуассона на прямоугольной сетке с использованием стандартной пятиточечной конечно-разностной аппроксимации и граничных условий Дирихле. Известны эффективные прямые алгоритмы решения уравнения Пуассона, основанные на быстром преобразовании Фурье [118, 119]. Автором разработано программное обеспечение для реализации этой методики [34, 44/].

Существенным недостатком подобных методов являются ограничения на пространственное распределение исследуемого поля фаз. Алгоритмы развертывания работают в случае, если фазовая картина плавная, т.е. перепады в соседних точках не превышают π и можно проследить пространственную границу переходов через период. Условие, ограничивающее величину перепадов в соседних точках величиной π , эквивалентно ограничению наклона волнового фронта на половину длины волны (или четверть волны при измерении рельефа поверхности в оптических схемах, работающих на отражении).

Использование априорной информации о величине скачка.

Интерференционные методы обычно не используются для измерения волновых фронтов, которые имеют резкие скачки, превышающие по величине половину длины волны. Использование априорной информации о величине скачка позволяет применять интерференционные методики в случае одиночных скачков [123/].

Если предварительное значение скачка может быть измерено с

точностью не хуже половины длины волны, то с помощью интерференционных измерений имеется возможность найти уточненные значения в пределах от нуля до половины длины волны. Точные значения h определяются как

$$h = h_0 + n \lambda / 2 , \quad (1-16)$$

где h_0 измеренный интерференционным способом профиль, n - целое. Использование информации, полученной из других измерений, делает возможным выбор подходящей величины n .

Этот способ использует интерференционную методику только для уточнения данных, полученных из других измерений (например, результатов, полученных с помощью механических профилометров).

Использование непрерывного изменения длины волны. В [198] описан метод для определения абсолютных значений профиля объектов. При этом, в отличие от традиционных способов, возможен анализ объектов ступенчатого профиля.

Основу метода составляет непрерывное изменение длины волны когерентного диодного лазера, использующегося в качестве источника освещения. Значения оптического хода в опорном и объектном плечах интерферометра должны существенно отличаться. Используя анализ в частотной области, можно определить макроскопический профиль объекта, выделяя центр частотной области, соответствующей объекту.

Диапазон изменения длины волны в диодных лазерах между модами менее 1 nm. В этом случае разрешение метода ограничено величиной ~ 500 мкм.

Основным достоинством является отсутствие подвижных частей в схеме интерферометра и исключение эффектов затенения при

определении трехмерного профиля диффузных объектов. Однако точность метода невелика.

Измерения с помощью эквивалентной длины волны. Измерения при двух длинах волн - еще один из способов расширения области фазовых измерений. Метод заключается в вычислении разности фазовых значений, измеренных при разных значениях волны источника освещения /100, 107, 206/.

В качестве априорной используется информация о величине длин волн используемых источников освещения.

Оптические разности хода волн (ОРХ) в любой точке поля (x,y) определяются из выражений

$$\Phi_a + 2\pi n_a = \frac{2\pi}{\lambda_a} \text{ОРХ}, \quad (1-17)$$

при длине волны λ_a и

$$\Phi_b + 2\pi n_b = \frac{2\pi}{\lambda_b} \text{ОРХ}, \quad (1-18)$$

при длине волны λ_b . Вычитая (1-18) из (1-17) и выделяя ОРХ, получим

$$\text{ОРХ} = \frac{\Phi_a - \Phi_b}{2\pi} \lambda_{\text{eq}} + (n_a - n_b) \lambda_{\text{eq}}, \quad (1-19)$$

где λ_{eq} равно

$$\lambda_{\text{eq}} = \frac{\lambda_a \lambda_b}{|\lambda_a - \lambda_b|}. \quad (1-20)$$

Таким образом, можно определить фазовый фронт с периодом, равным эквивалентной длине волны λ_{eq} . Чем ближе длины используемых волн, тем больше длина эквивалентной волны. Например,

при измерениях с двумя длинами волн 488нм и 514нм, λ_{eq} равно 9.47мкм; при $\lambda_a = 633$ нм и $\lambda_b = 529$ нм - $\lambda_{eq} = 3.22$ мкм.

Для получения эквивалентной длины волны может использоваться три способа: метод двух источников, иммерсионный и двухволновой.

Основные недостатки этого метода следующие: для того, чтобы эквивалентная длина волны была максимальной, необходимо выбирать близкие длины волн, а это резко увеличивает погрешность измерений; невозможно использовать более двух измерений при разных длинах волн, что ограничивает возможный диапазон измерений.

Автором предложен новый метод (Глава 4), основанный на использовании целочисленной арифметики, позволяющий на порядок расширить динамический диапазон измерений.

1.4. Интерференционные измерительные системы для анализа оптически чистых поверхностей

Современный уровень развития технологии позволяет создавать мобильные измерительные системы, основанные на интерференционных принципах. Наиболее часто такие системы разрабатываются на основе методов пошагового фазового сдвига. В качестве примера рассмотрим измерительные системы выпускаемые фирмами Zygo и WYKO.

Фирма Zygo была основана в 1970 Paul Forman, Carl Zanoni, и Sol Laufer при финансовой поддержке Canon Inc. и университета Wesleyan. Основная цель создания компании - разработка инструментальных средств для изготовления оптических изделий мирового класса.

В 1978 Zygo выпустила систему Mark II, которая включала полуавтоматическую микропроцессорную систему обработки информации ZAPP (Zygo Automatic Pattern Processor). В состав Mark II входила телевизионная система ввода и отображения. Mark II была первой интерференционной системой, специально разработанной для использования в промышленности [213]. Процессор ZAPP был предназначен для автоматической расшифровки интерферограмм. ZAPP-система сканировала телевизионное изображение для выделения центров полос. Затем с помощью метода наименьших квадратов определялся наиболее подходящий фронт, и вычислялись наибольшее и среднеквадратичное отклонение в каждой точке от найденной поверхности. Возможность быстро и точно анализировать интерференционную картину позволила значительно увеличить эффективность системы и снизить требования к оператору. Для увеличения точности, разрешения, скорости обработки система была сопряжена с

компьютером PDP-11 /03.

Интерференционная система Mark III была выпущена фирмой Zygo в 1980 году. Эта система предназначалась для промышленного и лабораторного контроля параметров оптических изделий /213/. Фазовая информация определялась с помощью управляемого фазового сдвига. Такие методы измерения фазы дают более высокую точность и способны анализировать волновые фронты более сложной формы по сравнению с методом выделения центров полос, благодаря большей пространственной плотности измеряемых значений. Фазовый сдвиг вносится с помощью специального устройства, объединенного с опорной поверхностью интерферометра Физо. Устройство ввода, выполненное на основе фотодиодной матрицы 100x100 элементов, синхронизировано с устройством внесения сдвига. Полный оптический анализ производится в микропроцессорных системах на основе компьютеров PDP-11/03, HP 9816, HP 9836 в зависимости от комплектации.

В 1985 Zygo Mark III заменяется интерферометрической системой Zygo Mark IV, которая управлялась другим компьютером, и обладала более мощным программным обеспечением. Mark IV была также первой системой, обеспечивающей возможность самостоятельно применять предоставляемые пакеты программ.

В 1993г., Zygo начинает выпускать семейство GPI интерферометров, которые заменяют системы "Mark". Семейство GPI обладает дополнительными возможностями измерений, более высокой точностью и меньшей стоимостью.

Интерферометры GPI обеспечивают бесконтактное измерение качества плоских или сферических поверхностей, а также измерение волнового фронта, проходящего через оптические элементы. Возможен широкий диапазон операций при анализе данных: от простого визуального контроля

до автоматического высокоточного измерения методом управляемого фазового сдвига.

Все GPI модели имеют, по существу, ту же самую цель, но они отличаются разным объемом возможностей при обработке и анализе данных.

Корпорация WYKO была основана в декабре 1982 на основе Оптического Научного Центра Университета Аризоны. Основное направление деятельности: разработка и изготовление бесконтактных цифровых интерференционных систем, необходимых при производстве оптических изделий, лазерных, магнитных носителей, полупроводниковых, металлических, керамических, пластиковых материалов.

В 1985 был разработан IR3 (инфракрасный интерферометр). IR3 предназначен для контроля качества оптических или подвергаемых механической обработке поверхностей (включая небольшую асферику) с шероховатостями от 1 мкм до полировки. Возможен контроль пропускающих инфракрасное излучение оптических элементов. IR3 - представляет собой интерферометр с управляемым сдвигом фаз. Используемая длина волны 10.6 мкм. Точность измерения 1/50 длины волны.

В 1988 появился WYKO 6000, а 1991 WYKO 400. Измерительной частью интерференционных систем WYKO 6000 и WYKO 400 является интерферометр Физо с управляемым фазовым сдвигом. Алгоритм расшифровки позволяет обеспечить точность 0.01 длины волны.

Анализ цен на системы Zygo показал, что стоимость устройств управления фазовым сдвигом, электронных блоков ввода изображений и программного обеспечения составляет от 46 до 66% от общей стоимости систем. Т.е. стоимость оптической установки и механических узлов составляет не более половины общей цены. В настоящее время

наблюдается тенденция к дальнейшему увеличению доли электронных блоков и программного обеспечения. При этом оптическая часть систем практически не меняется.

В настоящее время эти фирмы не единственные поставщики автоматизированных измерительных систем. Основная ориентация систем - контроль изделий с оптически чистой поверхностью. Контролироваться могут: стеклянные или пластиковые плоские пластины, линзы, объективы, призмы, металлические изделия, требующие большой точности при изготовлении (например, компьютерные диски), полированные керамические пластины, контактные линзы. Для анализа объектов с небольшой шероховатостью поверхности используются инфракрасные источники освещения. Такие системы имеют большую стоимость и не могут обеспечить всех потребностей, возникающих при высокоточном контроле промышленных изделий.

Большинство деталей имеет форму отличную от плоскости или сферы и шероховатую поверхность. Поэтому разработка измерительных систем, способных анализировать как оптически чистые, так и шероховатые поверхности, представляет актуальную задачу современной техники. В Главе 5 рассмотрен ряд разработанных нами систем, способных анализировать как оптически чистые, так и шероховатые поверхности

1.5. Выводы

Существующие методы получения интерференционных картин, методы их расшифровки и обработки, алгоритмическое и программное обеспечение обладают рядом недостатков, сдерживающих широкое распространение интерференционных измерительных систем в условиях производства.

Методы классической интерферометрии не пригодны для исследования объектов с шероховатой поверхностью. Методы голографической интерферометрии решают эту проблему, но им присущи значительные сложности в получении интерферограмм, а голографические измерительные системы могут эксплуатироваться, как правило, в лабораторных условиях. Измерительные системы для промышленности могут создаваться на основе методов спекл-интерферометрии, но они значительно уступают по точности методам классической и голографической интерферометрии. Все интерференционные методы обладают фазовой неоднозначностью, что приводит к ограничению динамического диапазона измерений.

Это подтверждает актуальность разработки и исследований новых методов получения и расшифровки интерферограмм, создания на их основе измерительных систем, свободных от отмеченных недостатков. Для достижения этих целей в представленной диссертационной работе:

- исследованы существующие и разработаны новые алгоритмы расшифровки интерферограмм, устойчивые к линейным и случайным ошибкам при задании фазового сдвига;

- разработаны новые способы получения и расшифровки спекл-интерферограмм, имеющие характеристики, сравнимые с интерференционными;

-разработан метод устранения фазовой неоднозначности для увеличения динамического диапазона интерференционных методов;

-разработан комплекс программных средств, способный эффективно применять весь набор существующих алгоритмов и предусматривающий автоматический режим обработки и расшифровки;

-разработана общая структура, исследована эффективность интерференционных измерительных систем на примере решения конкретных экспериментальных задач.

2. Расшифровка интерферограмм методом пошагового фазового сдвига

Наибольшее применение при построении интерференционных систем в последние годы получили методы получения и расшифровки интерферограмм на основе пошагового сдвига.

В этой главе исследованы характеристики существующих алгоритмов, предложены новые высокоточные алгоритмы, позволяющие корректировать линейные и случайные ошибки при задании фазового сдвига.

Материал этой главы в основном опубликован в /16, 26, 28, 29, 32, 33, 48, 72, 132/.

2.1. Влияние погрешностей измерений интенсивности и задания сдвига на точность определения поля фаз

Для однозначного определения фазовых значений необходимо три или более линейно независимых уравнения типа (1-1). Независимость уравнений может быть достигнута изменением разности фаз между опорным и объектным пучками на известную величину (приложение А).

Фазовый сдвиг между интерферирующими пучками может быть реализован различными способами. На рис.2.1. показана принципиальная схема оптической установки, в которой фазовый сдвиг задается перемещением зеркала, закрепленного на пьезокерамике.

Пучок света от когерентного источника излучения, попадая на делительный куб, разделяется на опорный и объектный пучки. В опорном плече находится зеркало, закрепленное на пьезокерамике,

предназначенное для внесения эталонных фазовых сдвигов. Конфигурация объектного плеча зависит от задачи измерения и от формы поверхности тестируемого объекта. В выходной плоскости располагается массив детекторов для регистрации интенсивности в каждой точке поля. После каждого фазового сдвига информация о поле интенсивностей повторно вводится в компьютер.

Такая схема использовалась нами в [32, 48, 72, 132].

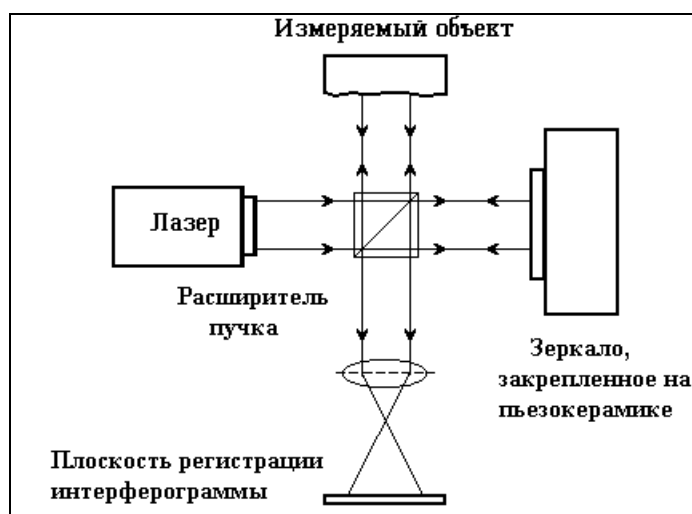


Рис.2.1. Схема интерферометра Тваймана-Грина с перемещением зеркала, закрепленного на пьезокерамике.

На рис.2.2 показан процесс расшифровки с помощью четырехточечного алгоритма (1-12). Исходные интерферограммы - идеальные синусоиды с 4-мя периодами. Фазовые сдвиги между ними 0 , $\pi/2$, $3\pi/2$, π . В этом случае, результирующие фазовые значения - пилообразные функции.

Информация о фазе с помощью пошаговых алгоритмов расшифровки однозначно восстанавливается только в пределах периода.

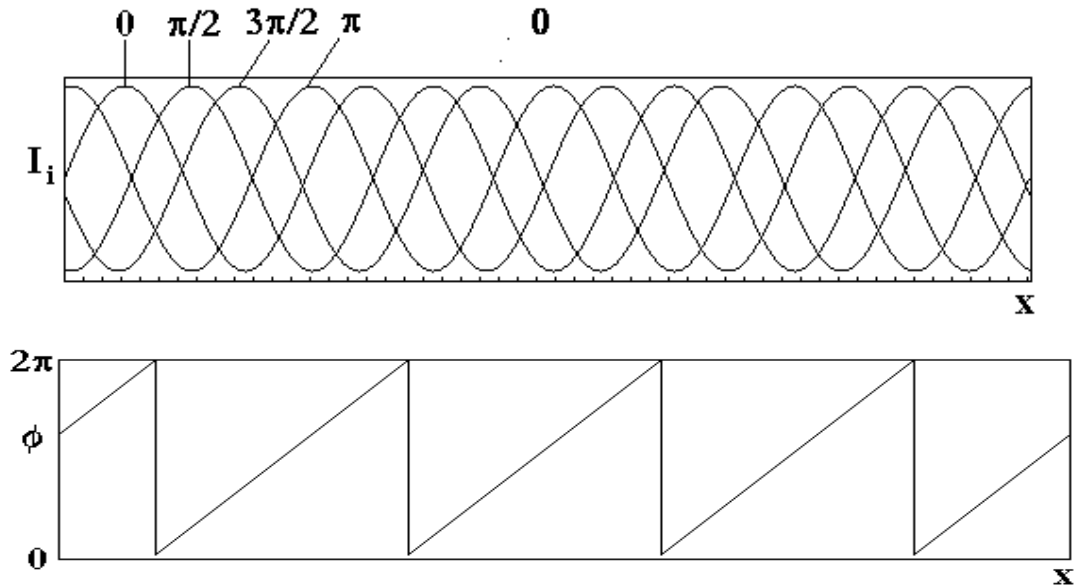


Рис.2.2. Определение фазы по 4 интерферограммам.

- а) четыре синусоиды, сдвинутые по фазе на $\pi/2$;
- б) восстановленная по ним фаза в пределах от 0 до 2π .

Основное выражение для измерения волнового фронта методом пошагового фазового сдвига имеет вид:

$$\phi = \arctan \frac{\sum_{i=1}^N I_i \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^N I_i \cos \varphi_i}, \text{ где } \varphi_i = 2\pi(i-1)/N. \quad (2-1)$$

Как видно из выражения (2-1) погрешность измерения фазы зависит от погрешности при задании фазового сдвига и погрешности при измерении интенсивности. В [29] автором было получено выражение для оценки абсолютной погрешности при условии $\Delta\varphi \ll \varphi_i$ и $\Delta I \ll I_i$:

$$\Delta\phi \approx \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial\phi}{\partial\varphi_i} \right| (\pm\Delta\varphi_i) + \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial\phi}{\partial I_i} \right| (\pm\Delta I_i), \quad (2-2)$$

где N - число сдвигов, а

$$\frac{\partial \phi}{\partial \varphi_i} = \frac{I_i \cos \varphi_i \sum_{n=1}^N I_n \cos \varphi_n + I_i \sin \varphi_i \sum_{n=1}^N I_n \sin \varphi_n}{\left(\sum_{n=1}^N I_n \sin \varphi_n \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N I_n \cos \varphi_n \right)^2}, \quad (2-3б)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial I_i} = \frac{\sin \varphi_i \sum_{n=1}^N I_n \cos \varphi_n - \cos \varphi_i \sum_{n=1}^N I_n \sin \varphi_n}{\left(\sum_{n=1}^N I_n \sin \varphi_n \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N I_n \cos \varphi_n \right)^2}. \quad (2-3в)$$

J.Schwider /186/ получил выражение для погрешности определения фазы от абсолютной ошибки при установке сдвига:

$$\Delta \phi = \arctan \frac{\sum_{i=1}^N \Delta \varphi_i - C \cos 2\phi - S \sin 2\phi}{N - C \sin 2\phi - S \cos 2\phi}, \quad (2-4)$$

$$\text{где } C = \sum_{i=1}^N \Delta \varphi_i \cos 2\varphi_i, \quad S = \sum_{i=1}^N \Delta \varphi_i \sin 2\varphi_i.$$

В /73/ Б.В.Карпюком получено выражение для погрешности определения фазы от суммарных ошибок при измерении интенсивности и установки сдвига

$$\Delta \phi = \arctan \frac{\sum_{i=1}^N \Delta \varphi_i - C \cos 2\phi - S \sin 2\phi - 2C_d \cos \phi + S_d \sin \phi}{N - C \sin 2\phi - S \cos 2\phi + 2C_d \cos \phi + S_d \sin \phi}, \quad (2-5)$$

$$\text{где } C_d = \sum_{i=1}^N \Delta I_i \cos \varphi_i, \quad S_d = \sum_{i=1}^N \Delta I_i \sin \varphi_i.$$

Аналитические выражения приводят к приближенным и трудным для анализа выражениям. Рассмотрим результаты статистических испытаний метода на компьютере.

Для определения зависимости фазы от $\Delta\varphi_i$ используем следующее выражение для интенсивности

$$I_i(x) = 1 + \cos[2\pi kx / N_x + \varphi_i + \Delta\varphi_i] , \quad (2-6)$$

где k - число синусоид, $\Delta\varphi_i$ - случайная ошибка при задании фазы, $i=1,2, \dots, N$, $x=1,2, \dots, N_x$, N_x - число точек по x .

Результаты расшифровки при отсутствии помех показаны на рис.2.2. В этом случае распределение фазы - идеальная пилообразная функция. На рис.2.3. приведены результаты компьютерного моделирования фазовой погрешности от ошибок при установке фазового сдвига.

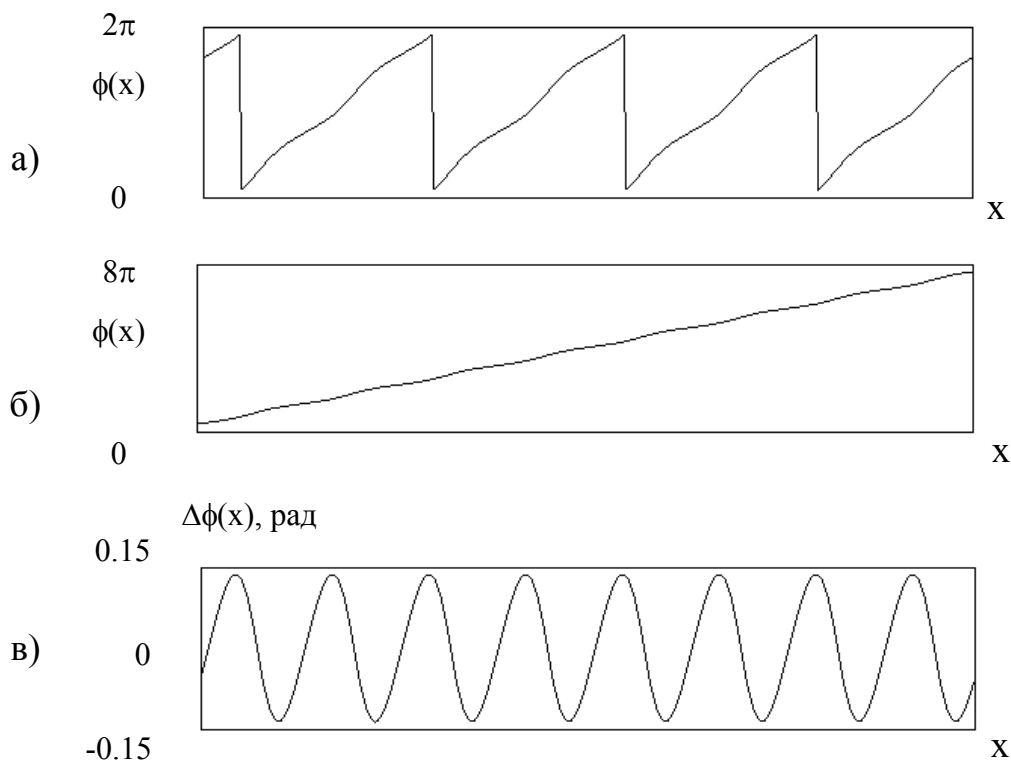


Рис.2.3. Фазовая погрешность от ошибок при установке сдвига.

На рисунке 2.3. - а) восстановленная фаза; б) фазовые значения после удаления 2π неоднозначности; в) отклонения результирующих значений

от идеальных.

Число фазовых сдвигов в алгоритме (2-1) $N=4$, случайная ошибка $\Delta\varphi_i$ - меняется в диапазоне $\approx \pm\pi/16$ (3% от 2π), синусоида имеет 4 периода.

Для приведенной на рисунке реализации случайной ошибки размах фазовых погрешностей равен 0.3. Для 100 случайных выборок минимальный размах 0.01, максимальный размах 0.6. Видно, что погрешность имеет период в два раза меньший, чем период исходного сигнала. Это следует и из выражения для определения погрешности в зависимости от абсолютной ошибки установки сдвига (2-4).

Для моделирования зависимости фазы от случайных ошибок при регистрации интенсивности используем следующее выражение:

$$I_i(x) = 1 + \cos[2\pi kx / N_x + \varphi_i] + \Delta I_x . \quad (2-7)$$

На рис.2.4 приведена фазовая погрешность при случайных ошибках ΔI_x , составляющих 3% от максимального значения интенсивности.

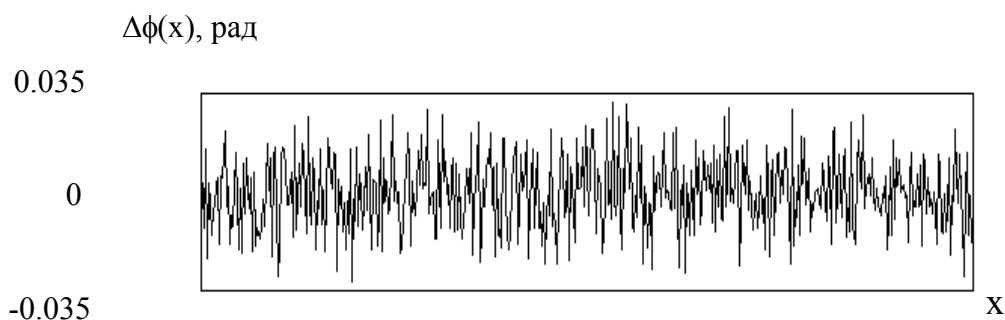


Рис.2.4. Фазовая погрешность при измерениях интенсивности.

На рис.2.5 - фазовая погрешность при той же величине случайных ошибок установки сдвига и измерений интенсивности. Для 100 случайных выборок минимальный размах погрешности 0.04,

максимальный размах 0.7.

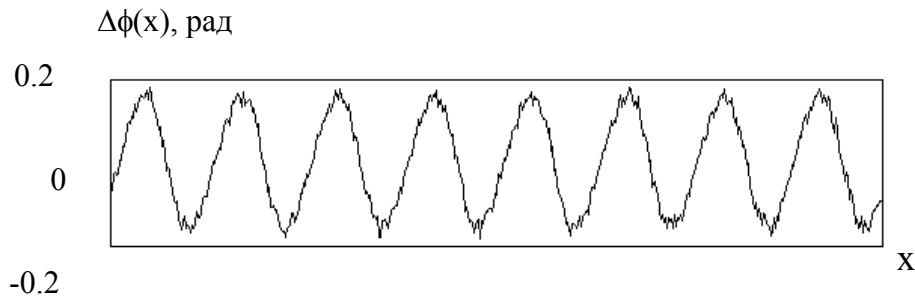


Рис.2.5. Фазовая погрешность при измерениях сдвига и интенсивности.

Из рисунков 2.3-2.5 видно, что фазовая погрешность определяется в основном ошибками в задании сдвига. Это следует и из аналитических выкладок. В выражении (2-5) $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\varphi_i$ превосходит все другие члены. Поэтому максимальная ошибка при определении разности фаз имеет тот же порядок, что и ошибка при задании сдвига.

Погрешность измерения поля интенсивности зависит от конкретного типа устройств регистрации. Средняя величина шума определяется экспериментально и составляет около 2%-3% для различного типа устройств.

Неравномерность освещения и средняя яркость учитываются при нахождении фазы этим методом и не влияют на результат. Однако резкие выбросы необходимо устранить.

Общее выражение для произвольного числа фазовых сдвигов можно переписать в следующем виде:

$$\varphi(x,y) = \arctan(Y/X) , \quad (2-8)$$

где X и Y значения числителя и знаменателя в выбранной формуле расшифровки. В этом случае модуляцию интенсивности в точке (x,y) можно определить как

$$V(x, y) = \arctan(1 / I_0) \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2-9)$$

Если $V(x, y)$ меньше определенного порога, то такие точки отмечаются как ошибочные и в дальнейших вычислениях не используются. На рис.2.6 показаны четыре интерферограммы, полученные с фазовым сдвигом $\pi/2$, и соответствующее им распределение функции видности.

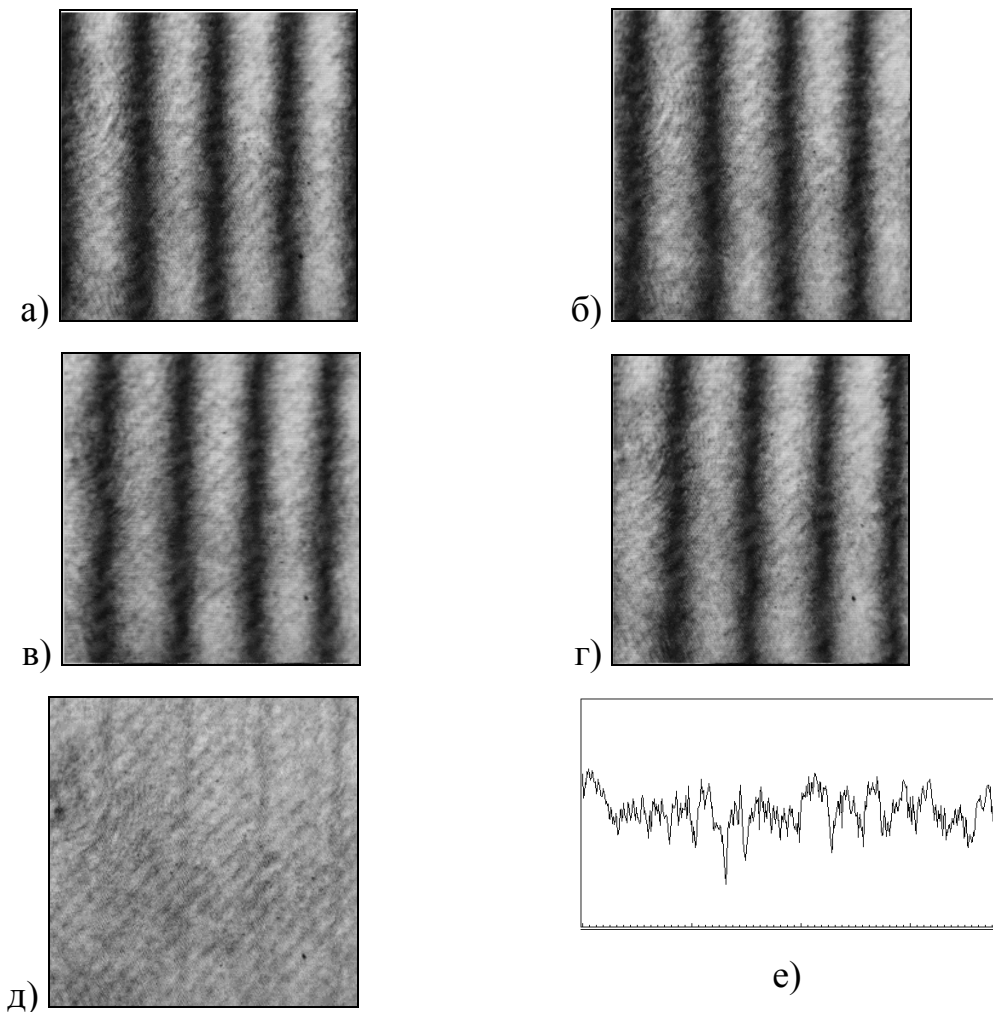


Рис.2.6. Интерферограммы с фазовым сдвигом $\pi/2$ (а-г), распределение функции видности (д) и график по центральной строке (е).

Величина порога определяется экспериментально так, чтобы общее количество отбрасываемых точек не превышало 1-5% от всех

используемых значений.

При вводе интерференционной картины в компьютер возникают погрешности, вызванные эффектами квантования. Рассмотрим влияние количества уровней квантования при измерении интенсивности интерференционной картины на погрешность определения фазовых значений /33/.

Если значения числителя и знаменателя в выражении (2—1) отложить по оси абсцисс и ординат, то распределение исходных данных будет иметь следующий вид (рис.2.7).

При непрерывном сдвиге фазы на 2π , значения числителя и знаменателя являются координатами точек, расположенных на некоторой окружности.

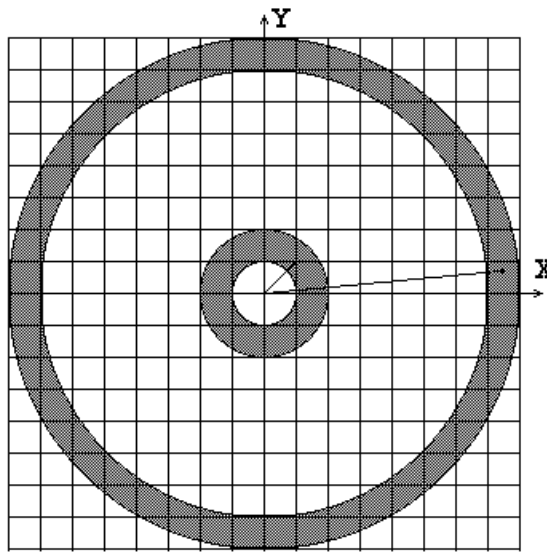


Рис.2.7. Влияние погрешности при квантовании интенсивности интерференционной картины.

Множитель - видность полос интерферограммы в измеряемой точке, задает радиус этой окружности (Рис.2.7). Из рисунка видно, что фазовая ошибка увеличивается при приближении к центру координатной

плоскости (при плохой видности) и может достигать $\pi/4$ при ошибке измерения всего на один квант. Погрешность определения фазы при максимальной ошибке не превышает

$$\Delta\Phi \leq \arctan \frac{1}{M-1} \quad , \quad (2-10)$$

где M - максимальное значение, которое может принимать числитель или знаменатель. При квантовании на n двоичных разрядов значения числителя и знаменателя принимают значения, зависящие от используемой формулы расшифровки. Так, для четырехточечной формулы (1-12) значения меняются от -2^n до 2^n . Приведем абсолютные погрешности для четырехточечной формулы (1-12) при различных значениях числа уровней квантования n (Таб.2.1).

n	6	7	8	9	10
$\Delta\Phi$	0.016	0.008	0.004	0.002	0.001

Таб.2.1. Зависимость абсолютной погрешности от числа уровней квантования.

При увеличении числа шагов в формуле расшифровки число возможных уровней, которые могут принимать значения числителя и знаменателя, увеличиваются. Тем самым снижается влияние ошибки при неправильном измерении интенсивности на один квант.

Неполное использование диапазона при регистрации поля интенсивности оказывает то же влияние, что и уменьшение числа уровней квантования при полном диапазоне. На рис.2.8 показаны

распределения точек, соответствующие значениям числителя и знаменателя в выбранной формуле расшифровки, на плоскости (X-Y) при реальных измерениях.

Приведенные распределения могут являться косвенной оценкой качества эксперимента. Радиус и ширина колец определяют величину и распределение динамического диапазона яркости по полю интерференционной картины. Эллипсовидность картины показывает, что сдвиги в выбранной формуле расшифровки не соответствуют реальным фазовым сдвигам.

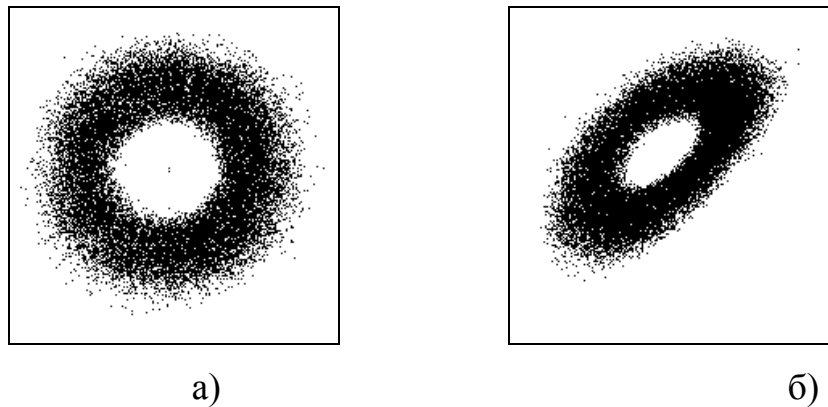


Рис.2.8. Распределение точек, соответствующих числителю и знаменателю в формуле расшифровки.

а) при правильном задании фазового сдвига;

б) при 20% линейной ошибке в задании сдвига.

Таким образом, основным источником погрешностей в фазосдвигающей интерферометрии являются ошибки при задании сдвига. Учесть такие ошибки сложно, поскольку они проявляются косвенно через измеряемую интенсивность. Устройства внесения фазы должны обеспечивать высокую точность сдвига, что приводит к усложнению аппаратуры. Перед проведением измерений необходимо проводить калибровку устройств, что значительно усложняет процедуру

измерений.

Ниже рассмотрены способы уменьшения погрешности определения фазы от ошибок при определении или задании фазового сдвига. Такие алгоритмы особенно полезны в случаях, когда калибровочные операции невозможны или нежелательны.

2.2. Коррекция линейных ошибок при задании фазового сдвига

В этом разделе рассматривается устойчивость алгоритмов расшифровки к линейным ошибкам при установке фазового сдвига. Устройства внесения фазового сдвига имеют достаточно высокую линейность. Линейные ошибки возникают из-за неправильной калибровки или неправильного определения необходимого угла сдвига.

Действительный фазовый сдвиг может быть выражен

$$\alpha = \frac{\pi}{2}(1 + \varepsilon) \quad , \quad (2-11)$$

где $\pi/2$ требуемый фазовый сдвиг и ε - линейная часть ошибки при установке фазы. Интенсивность i -ой интерферограммы будет иметь вид

$$I_i(x,y) = I_0(x,y) \{1 + V(x,y)\cos[\phi(x,y) + i\alpha]\} \quad . \quad (2-12)$$

На рис.2.9 показаны типичные искажения фазового фронта при линейной ошибке в задании фазового сдвига. Для расшифровки использовался алгоритм (1-12).

Из рисунка видно, что погрешность определения фазовых значений соответствует двойной частоте исходных интерференционных полос. Т.к. результирующая фазовая ошибка имеет большой период, ее невозможно отделить от полезного сигнала методами цифровой фильтрации. Поэтому необходимо использовать алгоритмы, устойчивые к линейным ошибкам.

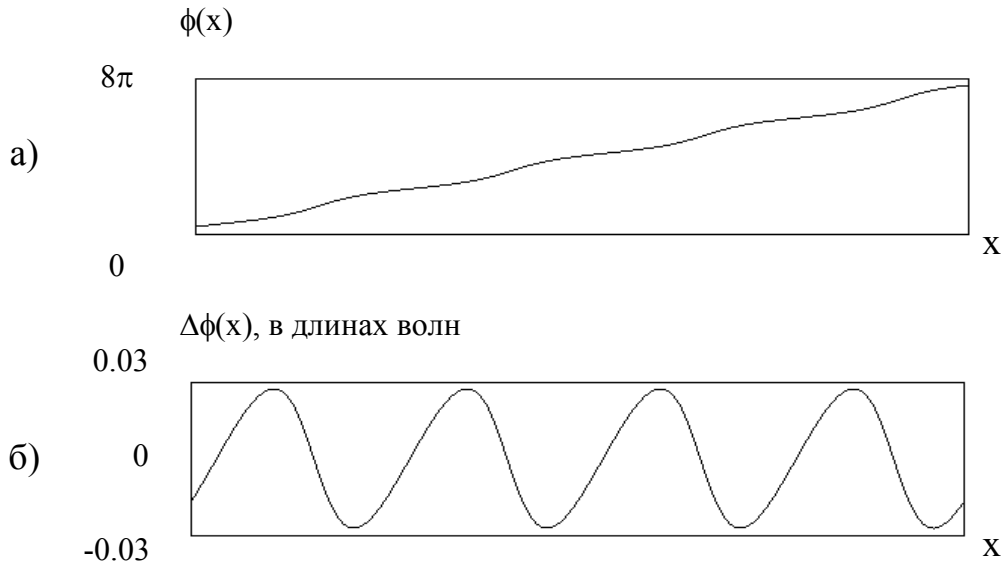


Рис.2.9. Фазовая погрешность от 20% линейной ошибки при установке сдвига. а) Фазовые значения после удаления 2π неоднозначности. б) Отклонения результирующих значений от идеальных.

2.2.1. Коррекция линейных ошибок с помощью усредняющей технологии

Для уменьшения ошибки можно проводить две серии измерений и усреднять результирующие фазовые значения. В [186] J.Schwider показано, что тот же эффект достигается, если объединить исходные данные и проводить расшифровку по следующей формуле:

$$\phi = \arctan \frac{N_1 + N_2}{D_1 + D_2} \quad , \quad (2-13)$$

где N_j и D_j числитель и знаменатель выражения, используемого при расшифровке для каждого набора данных.

Можно уменьшить число необходимых интерферограмм, если использовать алгоритмы со сдвигом на $\pi/2$. В этом случае необходимо

только одно добавочное измерение. При использовании m -точечного алгоритма необходимы две последовательности из m интерферограмм, сдвинутые на $\pi/2$, или $(m+1)$ интерферограмма. Эту процедуру можно продолжить для построения более сложных алгоритмов. Если взять две последовательности по $m+1$ интерферограммы, сдвинутые на $\pi/2$, получим $(m+2)$ -точечный алгоритм с еще меньшей величиной ошибки.

Имея два основных выражения, (1-11) для трехточечного (таб.2.2) и (1-12) для четырехточечного алгоритма (таб.2.3), можно получить два класса уравнений расшифровки /185/ (J.Schmit, K.Creath). Алгоритмы класса А основаны на трехточечном алгоритме, алгоритмы класса В на четырехточечном.

Число точек	$-\tan\phi$	$-\tan(\phi+\pi/4)$
3	$\frac{-I_1+2I_2-I_3}{I_1-I_3}$	$\frac{I_2-I_3}{-I_2+I_1}$
4	$\frac{-I_1+3I_2-I_3-I_4}{I_1-3I_3+I_2+I_4}$	$\frac{2(I_2-I_3)}{I_1-I_2-I_3+I_4}$
5	$\frac{-I_1+4I_2-4I_4+I_5}{I_1+2I_2-6I_3+2I_4+I_5}$	$\frac{3I_2-3I_3-I_4+I_5}{I_1-I_2-3I_3+3I_4}$
6	$\frac{-I_1+5I_2+2I_3-10I_4+3I_5+I_6}{I_1+3I_2-10I_3+2I_4+5I_5-I_6}$	$\frac{4(I_2-I_3-I_4+I_5)}{I_1-I_2-6I_3+6I_4+I_5-I_6}$

Таб.2.2. Таблица алгоритмов класса А.

Число точек	$-\tan\phi$	$-\tan(\phi+\pi/4)$
4	$\frac{I_2-I_4}{I_1-I_3}$	$\frac{I_1+I_2-I_3-I_4}{I_1-I_2-I_3+I_4}$
5	$\frac{2(I_2-I_4)}{I_1+I_5-2I_3}$	$\frac{I_1+2I_2-2I_3-2I_4+I_5}{I_1-2I_2-2I_3+2I_4+I_5}$
6	$\frac{3I_2-4I_4+I_6}{I_1-4I_3+3I_5}$	$\frac{I_1+3I_2-4I_3-4I_4+3I_5+I_6}{I_1-3I_2-4I_3+4I_4+3I_5-I_6}$

Таб.2.3. Таблица алгоритмов класса В.

Сравним фазовые ошибки, возникающие при использовании этих алгоритмов. Рассмотрим результаты работы алгоритмов при одинаковой линейной ошибке в задании фазового сдвига (рис.2.10).

Погрешность при использовании алгоритма 4В существенно больше, чем при использовании алгоритмов 4А и 5В. Лучшие результаты у алгоритмов 5А и 6В. Наименьшая погрешность у алгоритма 6А.

Из графиков видно, что алгоритмы класса А, полученные из трехточечных алгоритмов, дают такую же ошибку, что и алгоритмы класса В при числе точек в формуле расшифровки на единицу больше.

При выборе алгоритма расшифровки необходимо учитывать следующие факторы: число регистрируемых интерферограмм, быстродействие и обеспечиваемую этим алгоритмом точность.

Алгоритмы, приведенные в Таб.2.2, реализуются с помощью простых операций вычитания, сложения и поразрядного сдвига. Поэтому при цифровой реализации этих алгоритмов достигается

высокая скорость расшифровки.

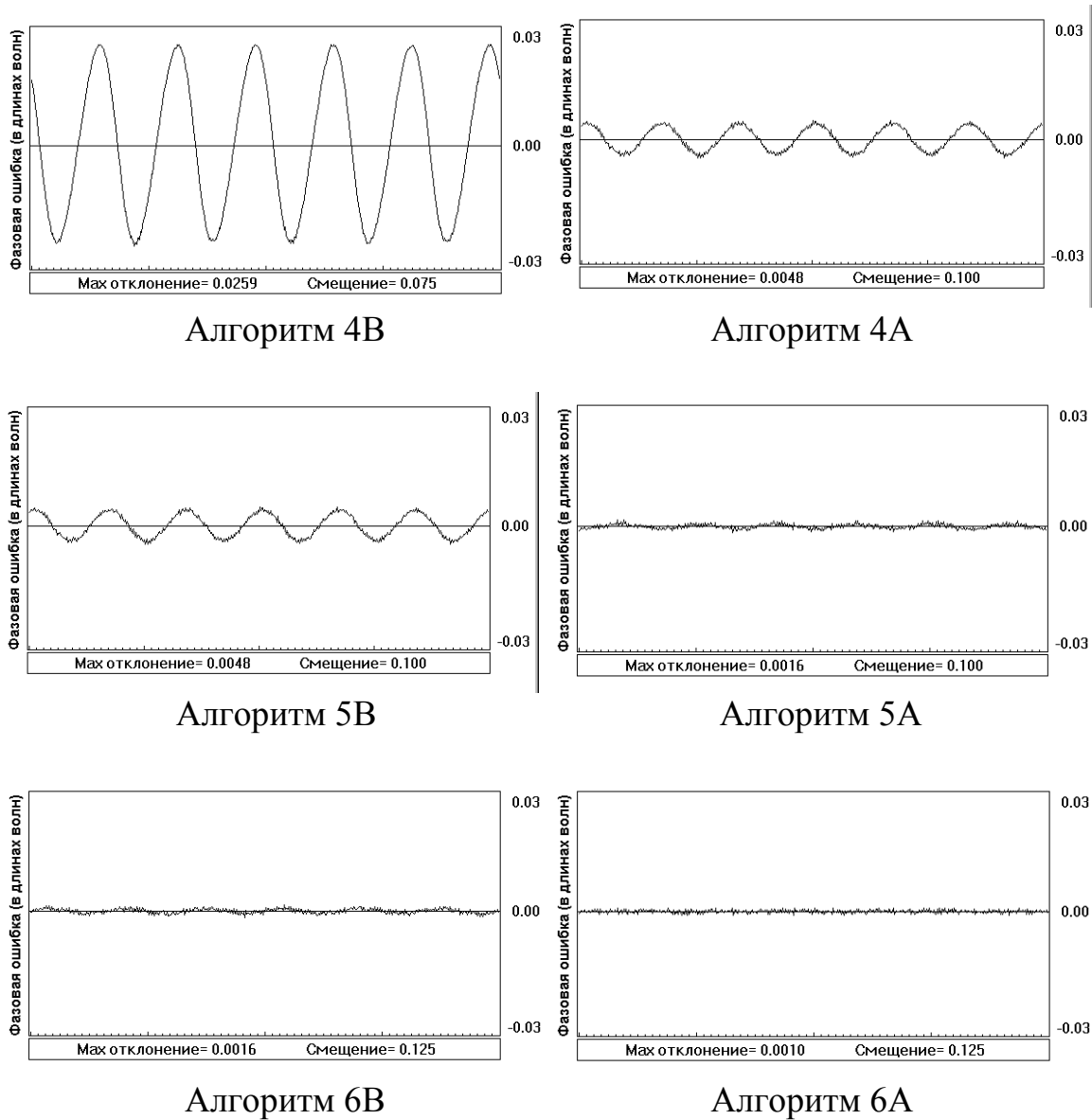


Рис.2.10. Фазовые ошибки при 20% линейной ошибке установки фазового сдвига.

При фиксированном числе интерферограмм, полученных при различных фазовых сдвигах, наиболее быстрыми являются алгоритмы класса В. При том же числе сдвигов, большую точность обеспечивают алгоритмы класса А.

Использование числа сдвигов более шести нецелесообразно,

поскольку уровень корректируемых ошибок становится меньше, чем погрешности, вызванные другими системными ошибками. Так, ошибки от квантования интенсивности при вводе в компьютер зависят от возможного диапазона распределения числителя и знаменателя в выбранной формуле расшифровки. Приведем максимальные амплитуды изменений значений числителя и знаменателя и величины абсолютных ошибок для различных алгоритмов при квантовании на 8 двоичных разрядов или на 256 уровней интенсивности (Таб.2.4).

Алгоритм	3А	4А	4В	5А	5В	6А	6В
Диапазон изменения	±184	±364	±256	±728	±512	±1456	±1024
ΔФ	±0.006	±0.003	±0.004	±0.001	±0.002	±0.001	±0.001

Таб.2.4. Диапазон дискретных значений числителя и знаменателя и значение абсолютной погрешности в зависимости от выбранной формулы расшифровки при 256 уровнях квантования.

При увеличении количества шагов число возможных уровней, которые могут принимать числитель и знаменатель, увеличивается. Тем самым снижается влияние погрешности при ошибке в измерении интенсивности на один квант. Из таблицы видно, что шеститочечные алгоритмы обеспечивают коррекцию линейных ошибок, при которой погрешность от неправильного задания фазы меньше, чем от квантования поля интенсивностей интерферограммы на 8 двоичных разрядов.

Для достижения высокой точности при обеспечении высокого быстродействия наиболее оптимальным является использование алгоритма 6А.

2.2.2. Коррекция линейных ошибок с помощью усреднения углов сдвига

Рассмотрим алгоритм, полученный при допущении, что последовательные фазовые сдвиги отличаются на одну и ту же величину. В этом случае нет необходимости в точном определении вносимых фазовых сдвигов, достаточно, чтобы разница между последовательными сдвигами была одинаковой. Этот алгоритм был предложен Р.Сарге в 1966г. /98/. Пусть $\delta_1 = -3\alpha$, $\delta_2 = -\alpha$, $\delta_3 = \alpha$ и $\delta_4 = 3\alpha$, тогда с помощью тригонометрических преобразований из системы (1-9) можно получить

$$\operatorname{tg}\alpha = \sqrt{\frac{3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)}{(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)}} \quad , \quad (2-14)$$

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \operatorname{tg}\alpha \quad , \quad (2-15)$$

$$\phi = \arctan \frac{\sqrt{[(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)][3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)]}}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \quad . \quad (2-16)$$

При использовании этого выражения для расширения диапазона от 0 до 2π необходимо анализировать не знаки числителя и знаменателя, а знаки следующих выражений:

$$(I_3 - I_2) = [2 DV \sin\alpha] \sin(\phi) \quad (2-17)$$

$$(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4) = [2 DV \cos\alpha \sin^2\alpha] \cos(\phi) \quad . \quad (2-18)$$

Поскольку значения множителей, заключенных в квадратные скобки положительны, левые части этих равенств определяют квадрант, в котором находится искомый фазовый угол.

Ошибки от неправильной калибровки такие же, как и у алгоритма 6А (Рис.2.11). Алгоритм (2-16) часто применяется при измерениях с разными длинами волн, поскольку в этом случае не нужно вводить калибровочные множители для фазовых сдвигов. Алгоритм получен с учетом коррекции линейных ошибок при установке фазы. Так как в результирующий алгоритм входит операция определения квадратного корня, то его можно определить как нелинейный алгоритм.

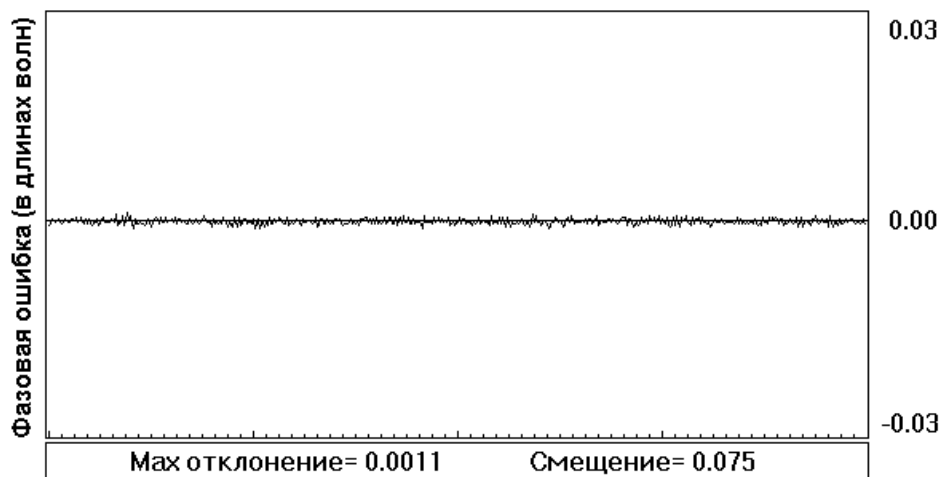


Рис.2.11. Фазовые ошибки алгоритма (2-16).

Однако использование этого алгоритма в реальных условиях не позволяет достичь его предельных характеристик. Это объясняется тем, что в формулу расшифровки неявно входит угол сдвига, определяемый выражением (2-14). При расшифровке этот угол определяется с большой погрешностью в областях близких к 0 , π , 2π . Покажем это на примере расшифровки реальных интерференционных картин (рис.2.12).

Интерференционные картины, по которым проводилась

расшифровка, получены при интерференции плоских волновых фронтов, отраженных от поверхности контролируемого и эталонного плоских зеркал. Фазовый сдвиг равен 95° . На рис.2.12 показано поле разности фаз, определенное в результате расшифровки с помощью нелинейного алгоритма.

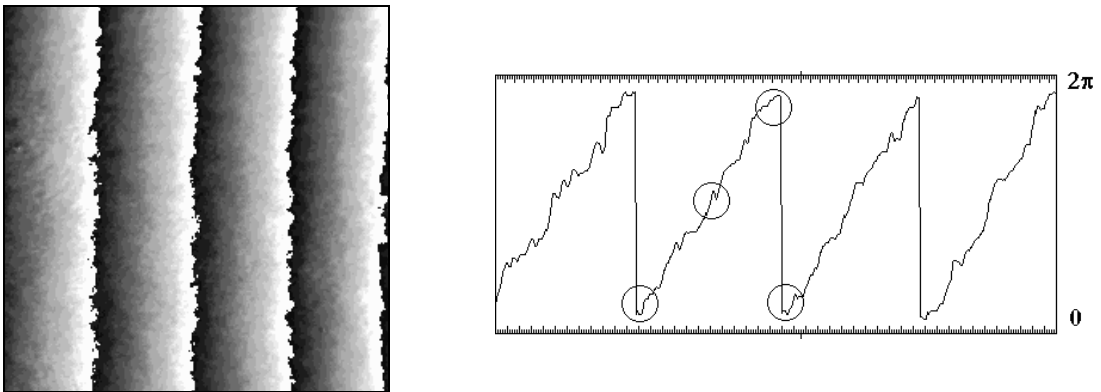


Рис.2.12. Распределение разности фаз и график по центральной строке.

На рис.2.13 показано распределение угла сдвига по полю. Из рисунка видно, что при диапазоне распределения фазы от 0 до 2π погрешность определения угла сдвига велика в областях близких к 0, π , 2π . Поэтому и погрешность определения исходной разности фаз между интерферирующими волнами будет велика в этих областях. На графике рис.2.12 кружками показаны эти области.

Для уменьшения погрешности нами предложена следующая модификация алгоритма.

Поскольку сдвиг задается перемещением плоского эталонного зеркала, угол должен быть одинаков по всему полю. Необходимо каким-либо образом найти этот угол. Затем подставить полученное значение в

выражение (2-15) и найти искомое значение фазовой разности.

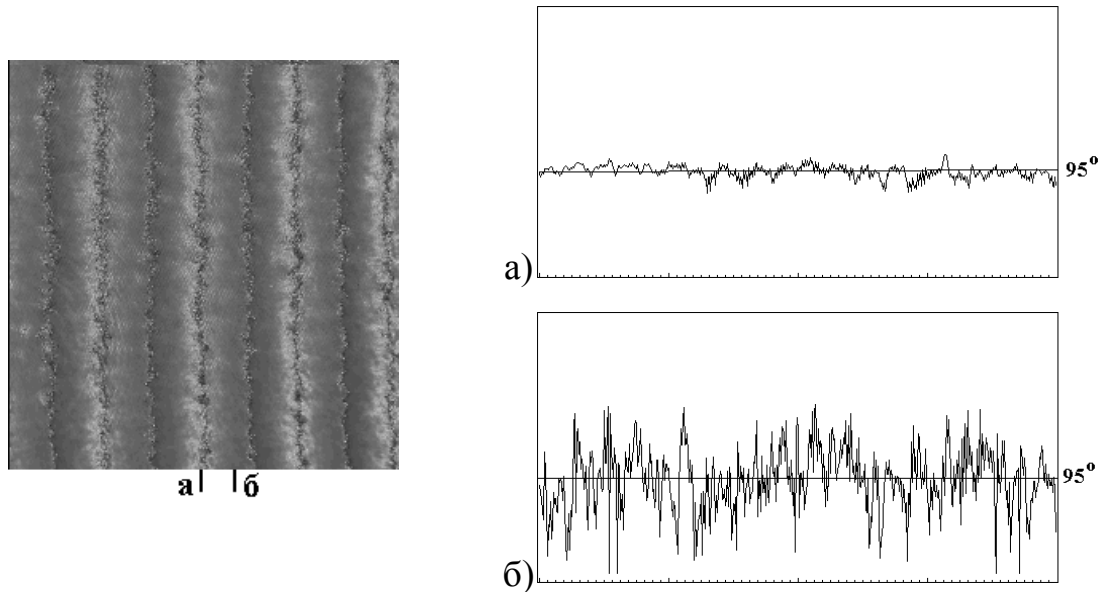


Рис.2.13. Распределение угла сдвига, полученного по формуле (2-15) и графики по указанным столбцам.

Определение угла простым усреднением по полю приводит к ошибке, поскольку погрешность в сбойных областях достаточно велика. Поэтому угол сдвига находился усреднением по всему полю кроме областей, в которых значения фаз удовлетворяют следующим соотношениям

$$\phi < 0 + \Delta\phi ; \quad (2-19a)$$

$$\phi > 2\pi - \Delta\phi ; \quad (2-19б)$$

$$\pi - \Delta\phi < \phi < \pi + \Delta\phi . \quad (2-19в)$$

Средний угол сдвига, найденный по всему полю (рис.2.13), равен 101° , угол сдвига, определенный с исключением рассмотрения сбойных

областей, равен 95° . Выбор размера окрестности $\Delta\varphi$ (в рассматриваемом примере $\Delta\varphi = \pm\pi/8$) определялся опытным путем.

Сравнение результатов расшифровки по модифицированному и обычному алгоритму Carre показано на следующих рисунках.

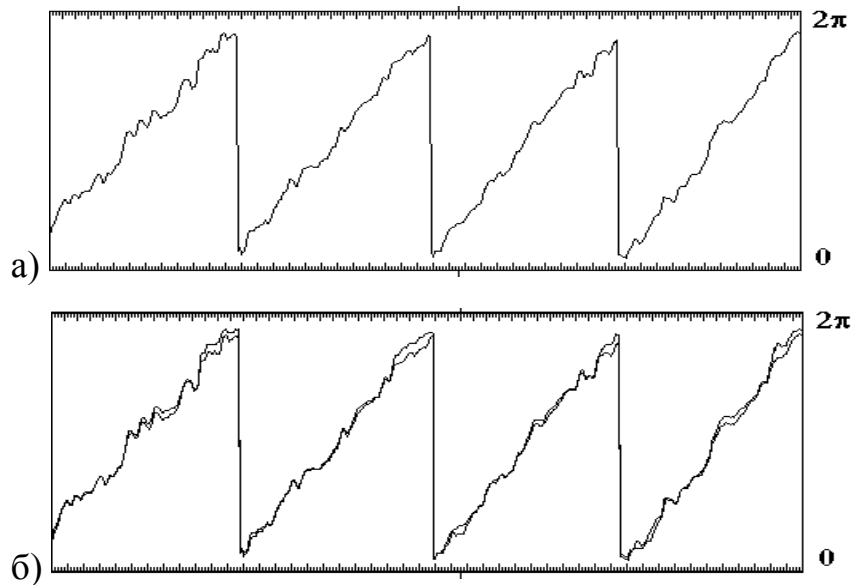


Рис.2.14. Сравнение фазовых значений, определенных по алгоритму Carre и модифицированному алгоритму.

На рис.2.14а показан график поля фаз, определенных с помощью модифицированного алгоритма по реальным интерферограммам. Аналогичный ему график фазовых значений, полученный с помощью обычного алгоритма, показан на рис.2.12. На рис.2.14б эти графики совмещены.

Алгоритм наиболее явно исправляет ошибочные значения вблизи точек перехода через 2π . Из рисунка видно, что в этой области фазовые значения, определенные по модифицированному алгоритму, имеют более резкий переход. Это позволяет использовать простые схемы устранения фазовой неоднозначности.

Максимальная величина отклонения составила $2\pi/25$. Поскольку в интерферометре Тваймана-Грина цена полосы равна $\lambda/2$, где λ -длина волны используемого источника освещения, то максимальное отклонение фазовых значений, полученных в результате работы этих алгоритмов - $\lambda/50$. Распределение абсолютных величин отклонений результатов работы двух алгоритмов по полю показано на рис.2.15.

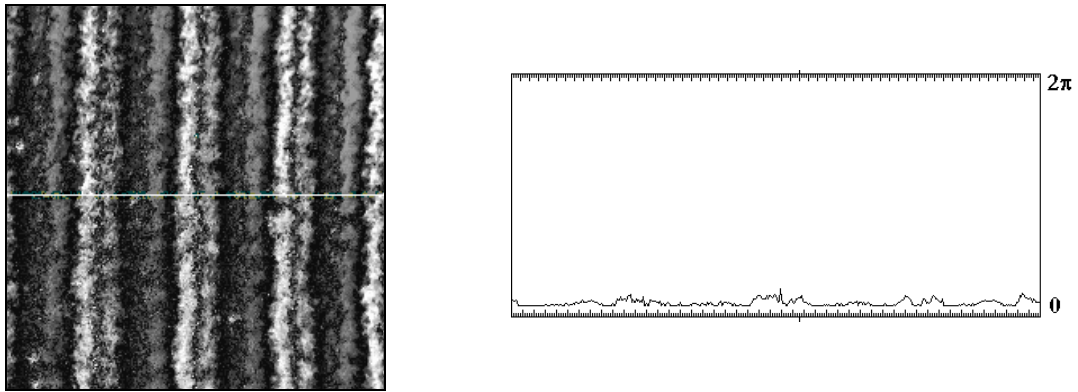


Рис.2.15. Распределение отклонений фазовых значений, найденных обычным и модифицированным алгоритмами.

Среднеквадратичное отклонение результатов равно $\lambda/100$. Максимальные величины отклонений - в областях, близких к фазовому переходу через 2π .

Поскольку расшифровка проводилась по серии интерферограмм, полученных при интерференции двух плоских пучков, для оценки характеристик алгоритмов использовалась величина отклонения результирующего поля фаз от плоскости. После удаления наклона находилось максимальное и среднеквадратическое отклонения. Для алгоритма 6А максимальное отклонение составило $\lambda/20$, для модифицированного алгоритма $\lambda/30$, среднеквадратичное отклонение

для алгоритма 6А - $\lambda/50$, для модифицированного алгоритма - $\lambda/60$.

Таким образом, использование предложенного автором модифицированного алгоритма позволяет снизить погрешность определения разности фаз при линейной ошибке в задании фазового сдвига. Алгоритм исправляет ошибки в области фазового перехода через 2π , поэтому его применение приводит к более устойчивой работе алгоритмов развертки. Экспериментальное моделирование показало, что максимальное отклонение от действительных значений составляет $\lambda/30$, среднеквадратичное отклонение - $\lambda/60$.

2.3. Коррекция нелинейных ошибок

Все вышеприведенные алгоритмы основаны на допущении, что фазовый сдвиг известен точно или могут вноситься лишь линейные ошибки. Влияние нелинейных ошибок, возникающих при внесении фазового сдвига, не учитывалось. Нелинейность может быть вызвана, например, гистерезисом, вибрациями при движении пьезокерамики или вибрациями установки при проведении эксперимента.

Алгоритмы, рассмотренные в предыдущем разделе, способны устранять только линейные ошибки, связанные с погрешностью задания фазового сдвига, случайные или нелинейные ошибки такие алгоритмы не устраняют.

В этом разделе рассмотрен предложенный нами алгоритм, способный корректировать случайные ошибки.

В [160] рассмотрен способ, основанный на коррекции нелинейных ошибок методом наименьших квадратов. Ниже показано, что подобные алгоритмы неустойчивы при расшифровке реальных интерферограмм и могут корректировать только небольшие отклонения от действительных значений. Нами предложен способ, основанный на поиске минимаксной функции [48, 132]. Показано, что выбор минимаксной функции значительно расширяет область возможной ошибки при задании фазового сдвига, которая может быть скорректирована.

2.3.1. Коррекция нелинейных ошибок методом наименьших квадратов

Для уменьшения погрешности, значения сдвига могут быть определены из уже имеющихся интерферограмм. Из выражения (1-9)

видно, что к трем неизвестным I_0 , V и ϕ добавляется еще и неизвестный угол сдвига δ . Если допустить, что в различных точках сдвиг фаз примерно одинаков, можно получить добавочное уравнение из соотношений, полученных в соседних точках. Выражение (1-9) примет вид (для упрощения выражений обозначим среднюю интенсивность I_0 через D):

$$\begin{aligned} I_{ij} &= D_i + D_i V_i \cos(\phi_i + \delta_j) = \\ &= D_i + D_i V_i \cos\phi_i \cos\delta_j - D_i V_i \sin\phi_i \sin\delta_j = \\ &= D_i + C_i \cos\delta_j - S_i \sin\delta_j, \end{aligned} \quad (2-20)$$

где индекс i обозначает значения, взятые в i -ой точке детектора; $C_i = D_i V_i \cos\phi_i$, $S_i = D_i V_i \sin\phi_i$.

В каждой точке $3+m-1$ неизвестных $D, V, \phi, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m$ ($\delta_0 = 0$). Если n - число взятых точек, то общее число неизвестных $3n+m-1$ при $(n \times m)$ уравнениях. Решение можно найти, если общее число уравнений больше, чем число неизвестных, т.е.:

$$nm \geq 3n + m - 1 \text{ или } n \geq 1 + \frac{2}{m-3}. \quad (2-21)$$

В этом случае неизвестные могут быть найдены методом наименьших квадратов. Неизвестные находятся при минимизации функции ошибки

$$\epsilon = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (I_{ij} - \hat{I}_{ij})^2, \quad (2-22)$$

где \hat{I}_{ij} - действительно измеренные значения j -ой интерферограммы в i -ой точке. Решения для D_i , C_i и S_i получены в форме 3×3 матричных

уравнений

$$\begin{bmatrix} D_i \\ C_i \\ -S_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & \sum \cos \delta_j & \sum \sin \delta_j \\ \sum \cos \delta_i & \sum (\cos \delta_j)^2 & \sum \cos \delta_j \sin \delta_j \\ \sum \sin \delta_i & \sum \cos \delta_j \sin \delta_j & \sum (\sin \delta_j)^2 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \sum \hat{I}_{ij} \\ \sum \hat{I}_{ij} \cos \delta_j \\ \sum \hat{I}_{ij} \sin \delta_j \end{bmatrix}, \quad (2-23)$$

где $\Sigma = \sum_{j=1}^m$. Решения для δ_j находятся из уравнения

$$A_{1j} \cos \delta_j + A_{2j} \sin \delta_j + A_3 \cos 2\delta_j + A_4 \sin 2\delta_j = 0, \quad (2-24)$$

в котором коэффициенты A_1, A_2, A_3, A_4 определяются как

$$A_{1j} = \sum_{i=1}^n (\hat{I}_{ij} - D_i) S_i, \quad A_{2j} = \sum_{i=1}^n (\hat{I}_{ij} - D_i) C_i, \quad (2-25a)$$

$$A_3 = \sum_{i=1}^n (-C_i S_i), \quad A_4 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (S_i^2 - C_i^2). \quad (2-25b)$$

Неизвестные могут быть определены с помощью нескольких итераций следующим способом. Пусть индекс k номер итерации тогда:

Шаг 1: Задание начального значения для δ_j^k .

Шаг 2: Вычисление D_i^k, C_i^k, S_i^k подстановкой δ_j^k в систему (2-23).

Шаг 3: Подставляем значения D_i^k, C_i^k, S_i^k полученные на предыдущем шаге в уравнение (2-18) для определения δ_j^{k+1} .

Находим решение уравнения.

Шаг 4: Если выполняется условие $|\delta_j^{k+1} - \delta_j^k| < \epsilon$, где ϵ малая величина, заканчиваем вычисления. В противном случае переходим к шагу 2.

Для изучения возможности реального использования алгоритма нами исследовалась его сходимость /48/. На Рис.2.16 показаны графики решений уравнения (2-24) при сдвигах фаз на $0^\circ, 85^\circ, 178^\circ, 265^\circ$.

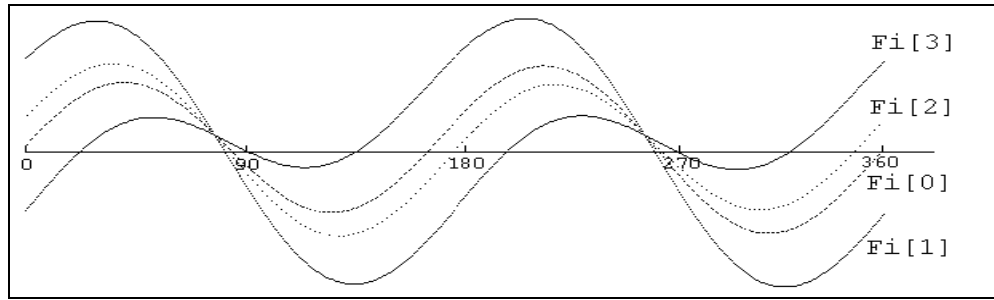


Рис.2.16. Уравнение (2-24) на первой итерации при начальных углах $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ и действительных $0^\circ, 85^\circ, 178^\circ, 265^\circ$.

Коэффициенты находились при начальных углах $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$. Решением уравнения будут пересечения соответствующих для каждого угла кривых с осью x . Подставляя найденные углы в систему (2-23), через несколько итераций можно определить действительные значения углов сдвига.

Проведенное моделирование алгоритма показало существенное расхождение найденных значений с действительными сдвигами в зависимости от начальных значений. Это вызвано тем, что существует очень много локальных минимумов, каждый из которых удовлетворяет соотношениям (2-23)-(2-24). Попадание в тот или иной минимум зависит от выбора начальных значений. На рис.2.17 показан случай, при котором выбор начальных значений приводит к неправильному определению действительных фазовых сдвигов. Уже на первой итерации система начинает сходиться к значениям, отличным от действительных.

Таким образом, для коррекции нелинейных ошибок при фазовом сдвиге необходимо выбирать исходные значения фазовых сдвигов близкими к действительным значениям. В случае значительных отклонений фазовые сдвиги определяются неправильно. Таким образом,

при использовании метода наименьших квадратов возможна коррекция только небольших, в пределах нескольких градусов, фазовых ошибок при задании фазового сдвига.

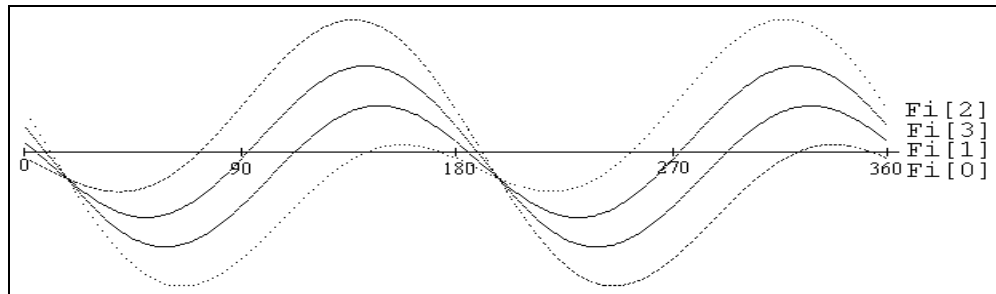


Рис.2.17. Уравнение (2-18) на первой итерации при начальных углах $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ и действительных $0^\circ, 80^\circ, 190^\circ, 260^\circ$.

В следующем разделе рассмотрен, разработанный нами алгоритм, который устойчиво корректирует как линейные, так и нелинейные ошибки порядка $10^\circ\text{-}20^\circ / 48, 132/$.

2.3.2. Алгоритм для высокоточных измерений фазы

Основная идея алгоритма, основанного на коррекции ошибок методом наименьших квадратов, состоит в том, что при использовании пошагового фазового сдвига достаточно информации для точного нахождения всех параметров уравнения (1-9). Обычно в этом уравнении неизвестными считаются средняя интенсивность $I_0(x,y)$, средняя видимость $V(x,y)$, разность фаз между опорным и объектным пучками $\phi(x,y)$. Однако, если неизвестными считать и фазовые сдвиги δ_i , то для нахождения единственного решения просто необходимо большее число уравнений.

При четырех фазовых сдвигах в каждой произвольной точке для нахождения неизвестных можно составить четыре уравнения, в которых будет 6 неизвестных - I_0 , V , ϕ , δ_1 , δ_2 , δ_3 ($\delta_0 = 0$). Если допустить, что фазовый сдвиг одинаков в некоторой окрестности, то в двух произвольных точках, принадлежащих этой окрестности - 9 неизвестных и 8 уравнений, в трех точках 12 неизвестных и 12 уравнений. Следовательно, при числе точек больше трех можно найти все неизвестные. Найти решения системы тригонометрических уравнений в аналитическом виде пока не удалось. Ниже рассмотрен предлагаемый нами алгоритм, основанный на поиске экстремумов минимаксной функции.

Выбор минимаксной функции определяется следующими соображениями. В какой-либо точке (x,y) делаются четыре измерения при фазовых сдвигах 0 , δ_1 , δ_2 , δ_3 . Но в действительности реальные фазовые сдвиги могут отличаться от предполагаемых. Значения фаз определяются по трехточечной формуле (1-11) при некоторых начальных значениях сдвигов. Так как формула расшифровки трехточечная, а уравнений четыре, то существует четыре возможных решения при значениях индексов $(0,1,2)$, $(0,1,3)$, $(0,2,3)$ и $(1,2,3)$. В каждой из троек индексы указывают на фазовый сдвиг и на соответствующее ему значение интенсивности.

Если четыре фазы, найденные по трехточечным формулам, одинаковы, то предполагается, что определены действительные значения фаз. Если они отличаются, то эти значения могут не соответствовать реальным. В этом случае находится разница между максимальным и минимальным значениями.

На рис.2.18 и 2.19 показан процесс нахождения фаз и отличий между найденными фазами при значениях индексов $(0,1,2)$ и $(1,2,3)$ для

тестовых интерферограмм с фазовыми сдвигами $\delta_0=0$, $\delta_1=80^\circ$, $\delta_2=190^\circ$, $\delta_3=260^\circ$.

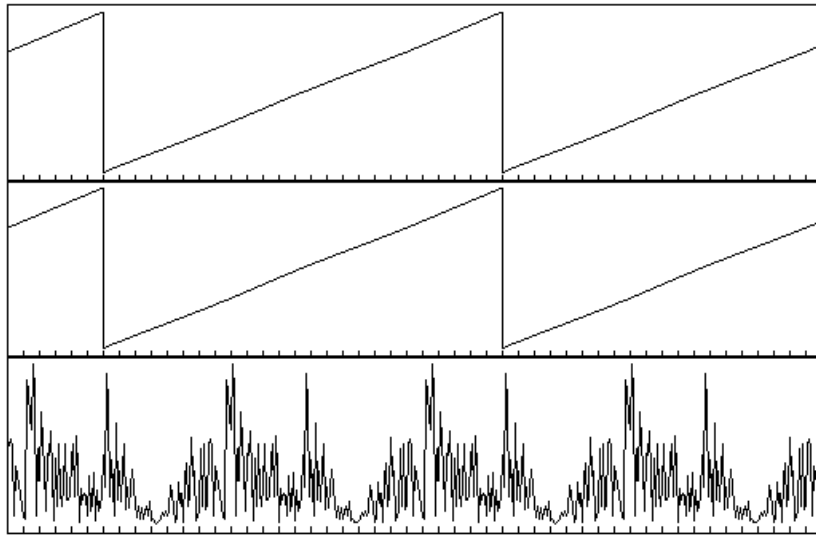


Рис.2.18. Определение отличий при фазовых сдвигах

$$\delta_0=0, \delta_1=88^\circ, \delta_2=182^\circ, \delta_3=269^\circ.$$

Максимальное значение абсолютной величины разности $s=0.002568$.

Для нахождения количественной характеристики отличий использовалась следующая функция

$$s = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^N \frac{|\phi(\delta_1, \delta_2, \delta_3) - \phi(\delta_1, \delta_2, \delta_3)|}{\frac{1}{2} \sum_{x=0}^N (\phi(\delta_0, \delta_1, \delta_2) + \phi(\delta_1, \delta_2, \delta_3))} \quad (2-26)$$

В качестве тестовых интерферограмм использовались идеальные синусоиды, сдвинутые относительно друг друга на заданный фазовый угол. Вносилась случайная ошибка при задании фазы. Для графиков на рис.2.18 - 1%, для графиков на рис.2.19 - 20%.

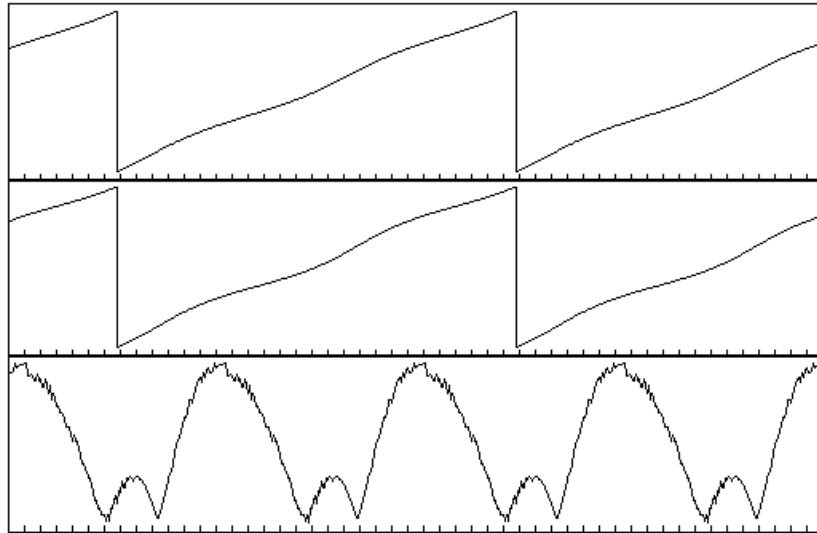


Рис.2.19. Определение отличий при фазовых сдвигах

$$\delta_0=0, \delta_1=77^\circ, \delta_2=191^\circ, \delta_3=258^\circ.$$

Максимальное значение абсолютной величины разности $s=0.05375$.

На графиках:

верхний график - фазовые значения, определенные по трехточечной

формуле из интерферограмм с фазовыми сдвигами $\delta_0, \delta_1, \delta_2$;

средний график - фазовые значения, определенные по трехточечной

формуле из интерферограмм с фазовыми сдвигами $\delta_1, \delta_2, \delta_3$;

нижний - график абсолютных значений разности фаз на верхнем и среднем графиках.

Из графиков видно, что максимальная величина разности при приближении к правильным фазовым сдвигам уменьшается.

Для поиска действительных значений сдвига фаз предлагается искать значения экстремумов минимаксной функции $R()$ в некоторой окрестности предполагаемых фазовых сдвигов /48, 132/ (считается, что фазовый сдвиг в этих точках одинаков). Минимаксная функция определяется как

$$R(0, \delta_1, \delta_2, \delta_3) = \frac{1}{N} \sum_{(x,y)} \frac{\left| \max_{s=0..3} \phi^s(x,y) - \min_{s=0..3} \phi^s(x,y) \right|}{\frac{1}{4} \sum_{s=0..3} \phi^s(x,y)}, \quad (2-27)$$

где надстрочный индекс s у фазы указывает, что \max и \min находятся по четырем значениям фазы из возможных троек, сумма находится по N точкам окрестности.

Для поиска минимума этой функции можно использовать любой из вычислительных методов наискорейшего спуска. Однако для исследования характера поведения локальных максимумов и минимумов нами использовался перебор всех возможных значений.

Средний размах находится для всех допустимых значений фазовых сдвигов

$$\delta_j^i = \delta_j \pm ik, \quad i=0,1, \dots, n. \quad (2-28)$$

Набор фазовых сдвигов $0, \delta_1^i, \delta_2^j, \delta_3^k$, при которых достигается глобальный минимум (2-27), считается действительным. Чем больше взято точек (x,y) , для которых определена функция $R()$, тем больше вероятность, что в результате будут найдены действительные значения фаз.

Математическое моделирование проводилось при сдвиге синусоиды с четырьмя периодами на произвольно заданные углы. Действительные углы сдвига находились в пределах $\pm 10^\circ$ от исходных значений $\delta_0=0, \delta_1=\pi/2, \delta_2=\pi, \delta_3=3\pi/4$. Значения синусоиды квантовались на 256 уровней. Общее число точек - 512.

Поиск минимального размаха искался для фазовых углов $90^\circ \pm 10^\circ$. Поскольку $\delta_0=0$, то всего рассматривалось $21*21*21$ возможных

фазовых угла, для каждого из которых находился средний размах в 512 точках. Типичная картина минимумов для размахов фазовых значений, соответствующих набору сдвигов $\delta_0=0^\circ$, $\delta_1=85^\circ$, $\delta_2=175^\circ$, $\delta_3=265^\circ$ показана на рис.2.20.

После нахождения действительных сдвигов для расшифровки использовался следующий алгоритм. Для нахождения фазовых значений, определенных при сдвигах с индексами (0,1,2), (0,1,3), (0,2,3) и (1,2,3), исходные данные объединялись следующим образом:

$$\phi = \arctan \frac{N_{012} + N_{013} + N_{023} + N_{123}}{D_{012} + D_{013} + D_{023} + D_{123}}, \quad (2-29)$$

где $N(i,j,k)$ и $D(i,j,k)$ - числитель и знаменатель трехточечного алгоритма (1-11), в котором используются значения фазовых сдвигов δ_i , δ_j , δ_k .

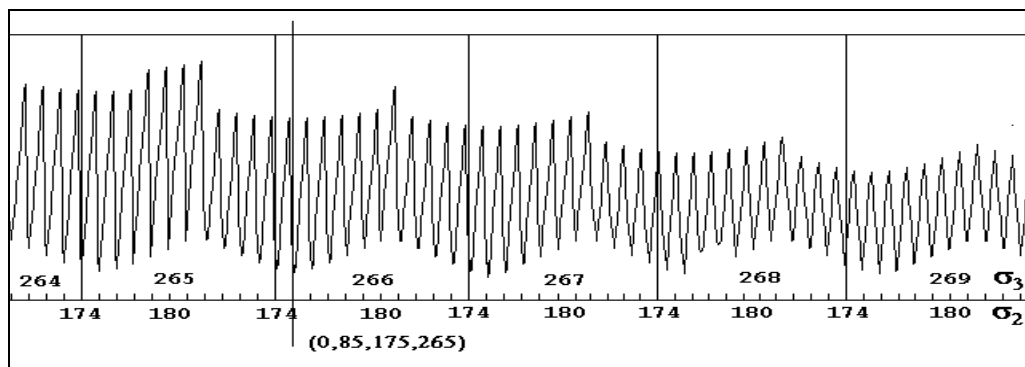


Рис.2.20. Значения минимальных размахов фаз.

(Минимальное значение достигается при сдвиге

$$\delta_0=0^\circ, \delta_1=85^\circ, \delta_2=175^\circ, \delta_3=265^\circ).$$

Результирующий алгоритм имеет следующий вид:

$$\phi = \arctan \frac{(I_2 - I_4) \sin \delta_1 + (I_3 - I_1) \sin \delta_2 + (I_4 - I_2) \sin \delta_3 + (I_1 - I_3) \sin \delta_4}{(I_4 - I_2) \cos \delta_1 + (I_1 - I_3) \cos \delta_2 + (I_2 - I_4) \cos \delta_3 + (I_3 - I_1) \cos \delta_4}. \quad (2-30)$$

Для сокращения времени вычислений ищется начальный фазовый

сдвиг, наиболее близкий к возможному решению. Для этого, с помощью выражения (2-14), определяется фазовый сдвиг при условии, что нелинейные ошибки отсутствуют, т.е. все δ_j одинаковы. После этого в некоторой окрестности определяются значения δ_j .

На рис.2.21 показаны картины интенсивностей, образованные при интерференции двух плоских пучков.

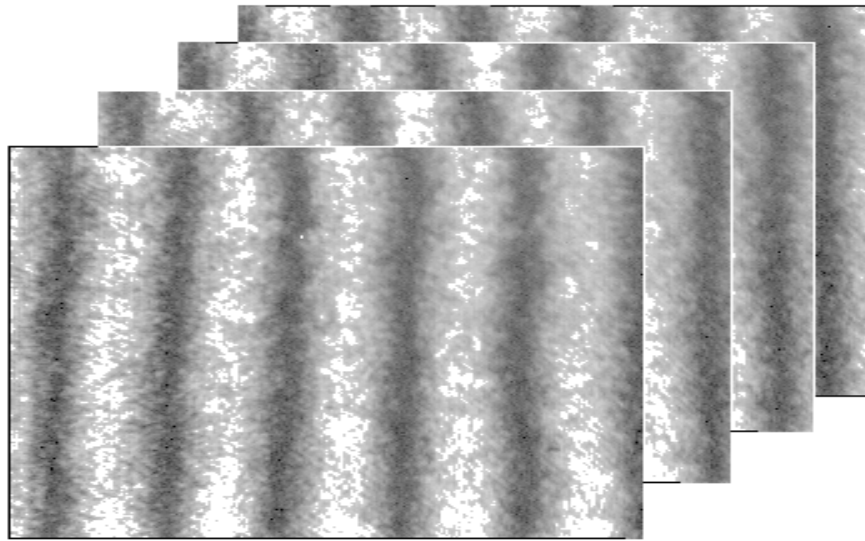


Рис.2.21. Четыре интерферограммы, полученные при начальных фазовых сдвигах $\delta_0=0^\circ$, $\delta_1=66^\circ$, $\delta_2=132^\circ$, $\delta_3=198^\circ$.

Действительные сдвиги $\delta_0=0^\circ$, $\delta_1=69^\circ$, $\delta_2=122^\circ$, $\delta_3=210^\circ$.

Начальные фазовые сдвиги - $\delta_0=0^\circ$, $\delta_1=66^\circ$, $\delta_2=132^\circ$, $\delta_3=198^\circ$.
 Ошибка при задании сдвигов составляла $\approx 10\%$. Действительные сдвиги $\delta_0=0^\circ$, $\delta_1=69^\circ$, $\delta_2=122^\circ$, $\delta_3=210^\circ$.

Время нахождения фазовых углов в диапазоне $\pm 10^\circ$ от начальных составляет несколько минут на компьютере IBM с процессором типа Intel 486/100 при анализе окрестности размером 15×15 точек. При расширении диапазона возможной ошибки в два раза ($\pm 20^\circ$) время вычислений увеличивается в восемь раз (2^3) и составляет 20-30 мин.

На рис.2.22 показаны графики полей фаз, полученные при расшифровке этих интерферограмм с использованием алгоритмов, устраняющих линейную ошибку, и алгоритма с коррекцией нелинейных фазовых сдвигов.

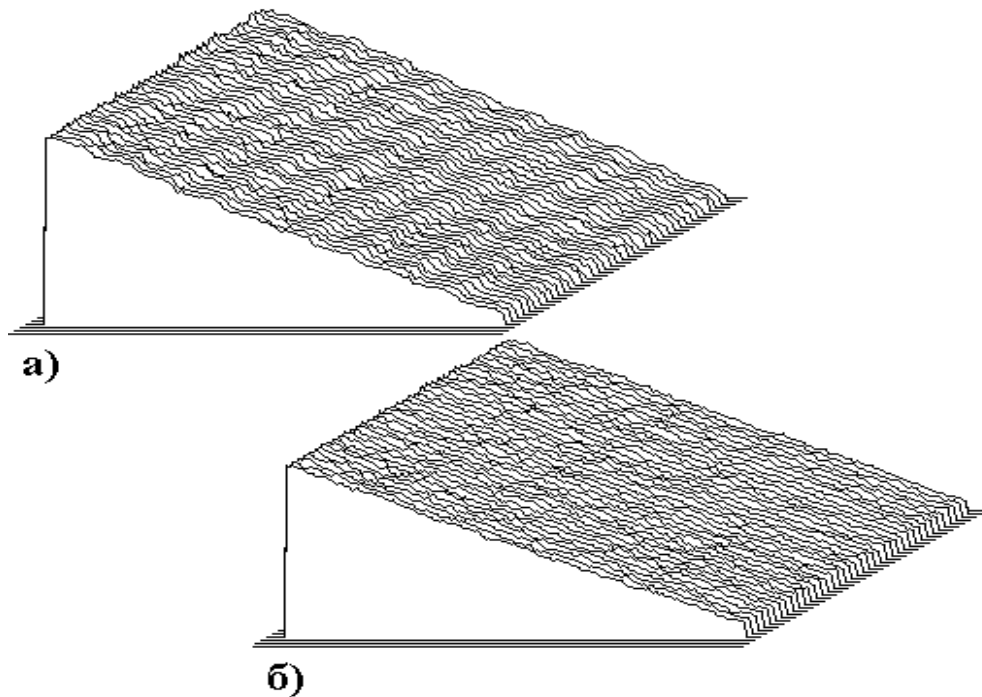


Рис.2.22. Поля фаз, полученные а) при расшифровке обычными алгоритмами и б) при расшифровке с помощью алгоритма с коррекцией фазовых сдвигов.

На графике а) поле фаз, для определения которого использовались четырехточечные алгоритмы. На рисунке хорошо видна низкочастотная паразитная синусоидальная структура, отделить которую от действительных фазовых значений невозможно. На графике б) поле фаз, полученное в результате корректировки фазовых сдвигов.

Результаты эксперимента сопоставлялись с измерениями тестовой поверхности на интерферометре с калиброванным фазосдвигающим устройством. Ошибка, вызванная неправильным заданием фазового сдвига, скорректирована с точностью до одного градуса.

Таким образом, возможно исправление нелинейных ошибок, в том числе и случайных, при неправильном задании или определении сдвига фаз. Значения разности фаз по полю находятся со среднеквадратичным отклонением от действительных значений - $\lambda/100$.

Так как время работы алгоритма значительно, метод может быть использован для высокоточных измерений, при которых время получения результатов не является определяющим, либо для точной калибровки фазосдвигающих элементов.

2.4. Выводы

1. Исследования существующих алгоритмов расшифровки интерференционных картин методом пошагового фазового сдвига позволили определить условия, при которых фазовая информация может быть определена однозначно. Проведена классификация методов. Выявлены недостатки существующих алгоритмов и показано, что они не могут эффективно решать поставленные в работе задачи.
2. Проведен анализ алгоритмов расшифровки пошагового фазового сдвига. Показано, что методическая ошибка при использовании этого метода имеет тот же порядок, что и ошибка при задании сдвига.
3. Выбор алгоритма расшифровки зависит от следующих факторов: числа регистрируемых интерферограмм, быстродействия и необходимого уровня коррекции линейных ошибок при установке фазовых сдвигов. Для коррекции линейных ошибок, вызванных заданием фазового сдвига, наиболее эффективен нелинейный четырехточечный алгоритм. Предложенная нами модификация этого алгоритма позволяет снизить погрешность и повысить устойчивость расшифровки.
4. При использовании алгоритмов, построенных с помощью усредняющей технологии, получаются более простые формулы расшифровки и, как следствие, обеспечивается большее быстродействие. Однако, для обеспечения того же уровня коррекции, что и у нелинейного алгоритма, требуется шесть фазовых сдвигов. Использование большего числа сдвигов нецелесообразно, поскольку уровень корректируемых ошибок становится меньше, чем погрешности, вызванные другими системными ошибками.

4. Для устранения линейных, нелинейных и случайных ошибок при задании фазового сдвига предложен новый алгоритм. Алгоритм позволяет корректировать ошибки при установке сдвига или при неправильном задании фазового угла в формуле расшифровки. Максимальная величина ошибки может достигать 20° , при этом погрешность задания сдвига может быть скорректирована с точностью до градуса.

3. Методы расшифровки цифровых спекл-интерферограмм

В современном производстве необходим точный контроль изделий в процессе их функционирования или изготовления. Создание простых, надежных и эффективных измерительных систем возможно на основе методов спекл-интерферометрии.

Спекл-интерферометрия основана на физическом явлении, которое в литературе называется спекл-картиной или зернистой картиной. При подсветке лазерным лучом объектов с диффузной поверхностью, освещенная плоскость не выглядит равномерно яркой. Изображение объекта состоит из отдельных ярких пятен - спеклов. Подобный эффект возникает также при получении изображений с помощью когерентных радиоволн или акустических волн.

Размер спеклов в пространстве изображения не зависит от статистических свойств рассеивающей поверхности, а только от апертуры линзы, формирующей изображение. Средний размер спекла в плоскости изображения можно определить с помощью следующего выражения /55/

$$s \approx 2.44 \frac{\lambda v}{D}, \quad (3-1)$$

где v - расстояние от линзы до плоскости изображения, D - диаметр линзы, λ - длина волны. Если коэффициент увеличения равен единице, то расстояние от линзы до плоскости изображения равно двойному фокусному расстоянию - $2f$. В этом случае выражение для размера спекла можно записать в следующем виде

$$s \approx 4.88\lambda a, \quad (3-2)$$

где a - числовая апертура равная f/D .

При использовании объективов с числовой апертурой от 2 до 40 и источника освещения с длиной волны $\lambda \approx 0.5$ мкм, размеры спеклов меняются от 5 до 100 мкм. Для записи спеклограмм возможно использование обычных телевизионных камер, что позволяет отказаться от промежуточной записи состояния объекта на внешнем фотоносителе. Поэтому спекл-интерференционные системы значительно проще и лучше приспособлены к условиям производства.

При деформации объекта можно по аномальному поведению корреляционных полос производить дефектоскопию различных конструкций в реальном масштабе времени. Однако для получения количественной информации необходимо провести компьютерную расшифровку.

В этой главе описывается, разработанный нами, новый метод получения и расшифровки цифровых спеклограмм [24, 47, 69, 70, 131]. Метод основан на внесении управляемого фазового сдвига между интерферирующими пучками до и после деформации объекта и позволяет приблизить точностные характеристики спекл-интерференционных систем к голографическим измерительным системам.

3.1. Формирование корреляционных полос

Рассмотрим традиционный метод цифровой корреляционной спекл-интерферометрии.

На рис.3.1 показан интерферометр Майкельсона, отличающийся тем, что у него зеркальная опорная поверхность заменена на шероховатую.

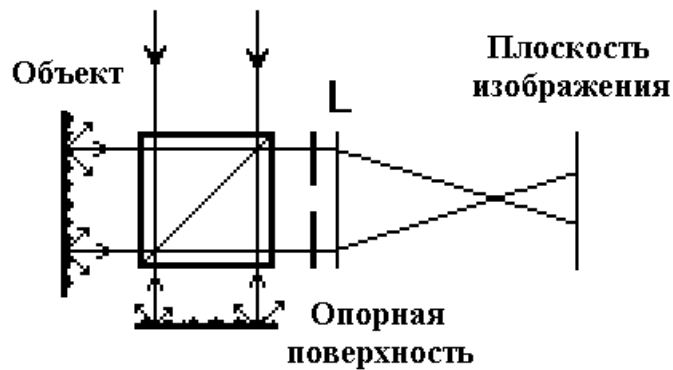


Рис.3.1. Спекл-интерферометр с шероховатой опорной поверхностью.

Волны, рассеянные опорной и объектной поверхностями интерферируют в плоскости изображения линзы L. Результирующую интенсивность - спеклограмму исходной поверхности объекта, можно представить в следующем виде:

$$I_{\text{ref}}(x, y) = (\bar{E}_S + \bar{E}_T)^2 = A_S^2 + A_T^2 + 2A_S A_T \cos(\phi_S - \phi_T), \quad (3-3)$$

где \bar{E}_S , \bar{E}_T - комплексные амплитуды опорной и объектной волны, A_S и A_T - амплитуды, $\phi_S - \phi_T$ - разность фаз объектной и опорной волн. На рис.3.2 показана типичная спеклограмма диффузного объекта и график по строке, на котором хорошо видна структура спеклов.

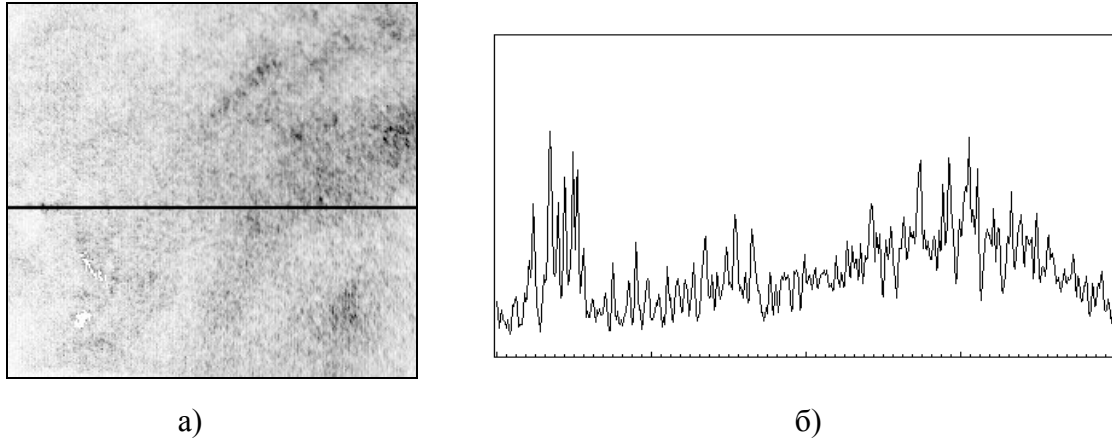


Рис.3.2. Фотография спеклограммы (негатив) а) и распределение интенсивности по центральной строке б).

При деформации объекта изменяются фазы световых волн, рассеянных отдельными элементами его поверхности в точку (x,y) . Однако, если смещение поверхности не слишком велико, то фазовые сдвиги световых волн, рассеянных от отдельных элементов поверхности объекта в одну и ту же точку можно считать одинаковыми.

Обозначим через $\Psi(x,y)$ фазовый сдвиг в точке, вызванный деформацией объекта. Тогда, интенсивность спекл-картины от деформированной поверхности объекта

$$I_{\text{def}}(x,y) = (\bar{E}_s + \bar{E}_r)^2 = A_s^2 + A_r^2 + 2A_s A_r \cos(\phi_s - \phi_r + \Psi(x,y)). \quad (3-4)$$

Если оба интерферирующие световые поля имеют спекл-структуру, то и $I_{\text{ref}}(x,y)$ и $I_{\text{def}}(x,y)$ являются случайными величинами. В этом случае, коэффициент корреляции двух случайных переменных определяется как

$$\rho_{X,Y} = [\langle XY \rangle - \langle X \rangle \langle Y \rangle] / \sigma_X \sigma_Y, \quad (3-5)$$

где
$$\sigma_X = \sqrt{(\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2)} \quad , \quad \sigma_Y = \sqrt{(\langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2)} \quad (3-6)$$

Если X и Y независимые случайные величины, то

$$\langle XY \rangle = \langle X \rangle \langle Y \rangle \quad . \quad (3-7)$$

В этом случае коэффициент корреляции равен нулю.

Подставляя $I_{\text{ref}}(x,y)$ и $I_{\text{def}}(x,y)$ в (3-5), после преобразований и ряда упрощений /55/ получим

$$\rho(\Psi) = (1 + \cos\Psi)/2 \quad . \quad (3-8)$$

Корреляция равна единице, если $\Psi = 2\pi n$, и равна нулю, когда $\Psi = (2n + 1)\pi$.

При практических вычислениях корреляционное сравнение осуществляется вычитанием или сложением двух спеклограмм, одна из которых соответствует исходному, а другая - деформированному состоянию поверхности объекта.

$$I_S(x,y) = [I_{\text{ref}}(x,y) - I_{\text{def}}(x,y)]^2 \quad . \quad (3-9)$$

Подставляя в (3-9) выражения для $I_{\text{ref}}(x,y)$ и $I_{\text{def}}(x,y)$, после некоторых преобразований получим

$$I_S = N - N \cos(\Psi) = N (1 - \cos(\Psi)) \quad , \quad (3-10)$$

где
$$N = 8 A_S^2 A_R^2 \sin(\phi_S - \phi_R + \Psi(x,y)/2) \quad . \quad (3-11)$$

Поскольку зависимость (3-10) носит такой же характер, как и (3-8), полосы, образующиеся в результате вычитания или сложения спекл-картин, носят название корреляционных интерференционных

полос. Однако картина полос (3-10) модулируется спекл-структурой, возникающей в результате прохождения высокочастотных составляющих сигнала через оптическую систему с ограничивающей апертурой. Распределение яркости в картине корреляционных полос, описывается выражением (3-10), где N отвечает за распределение спеклов, амплитуда A_S и фаза ϕ_S (в случае диффузной поверхности), а также, возможно, A_T и ϕ_T (для диффузного опорного пучка) определяют форму и размер спеклов в плоскости изображения.

Как видно, в тех областях плоскости изображения объекта, где вызванный деформацией фазовый сдвиг Ψ равен

$$\Psi = \pm 2 \pi n, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (3-12)$$

выражение (3-10) равно нулю и поэтому такие области будут при отображении выглядеть темными, тогда как другие области, где это условие не выполняется, будут спеклоподобны. На рис.3.3 приведена типичная картина спекл-корреляционных полос, возникающая при деформации плоской пластины с диффузной поверхностью.

В плоскости изображения объекта формируется спеклообразная картина корреляционных полос, в которой, в отличие от интерференционных картин, проследить возможно только темные полосы.

При получении выражения (3-10) предполагалось, что A_S , A_T и $\phi_S - \phi_T$ не меняются при деформации объекта. Если это не так, то видность корреляционных полос уменьшается. Большие изменения приводят к полному исчезновению полос. Этот эффект называется декорреляцией спеклов.

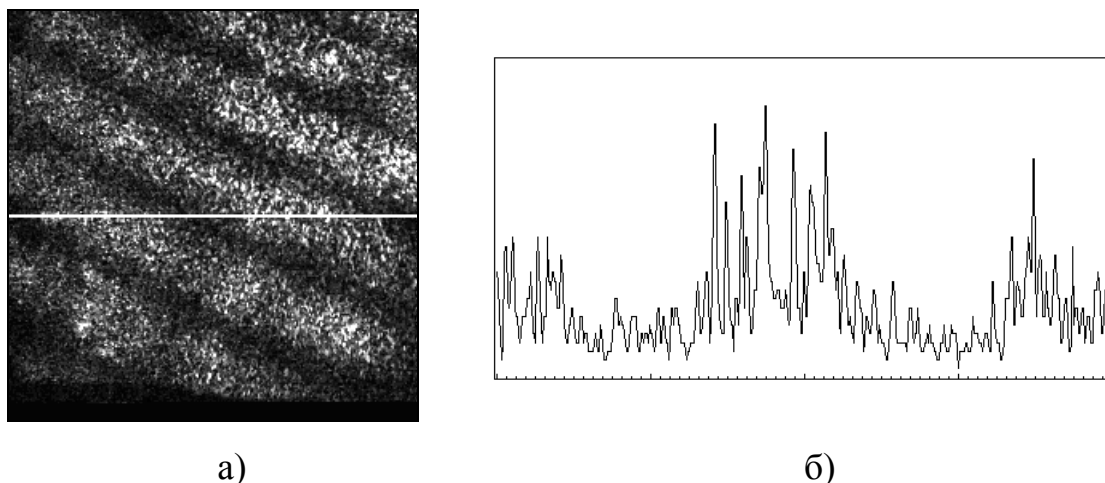


Рис.3.3. Корреляционная спекл-интерферограмма (а) и распределение интенсивности по центральной строке (б).

Выбирая схему интерферометра таким образом, чтобы декорреляция спеклов была минимальной, можно добиться максимальной чувствительности к выбранному виду деформаций. В общем случае элемент поверхности предмета смещается на вектор $\mathbf{d}=(d_1, d_2, d_3)$, где d_1 - нормальные к плоскости объекта смещения, d_2, d_3 - смещения в плоскости объекта. Необходимо, чтобы чувствительность к смещениям, приводящим к декорреляции полос, была минимальной. Например, показанный на рис.3.1 интерферометр, предназначен для измерения нормальных составляющих при деформации объекта. Картина полос, возникающая в плоскости изображения этого интерферометра, определяется соотношением

$$\Psi = 4\pi d_1 / \lambda . \quad (3-13)$$

Если необходимо уменьшить чувствительность, используется следующая схема:

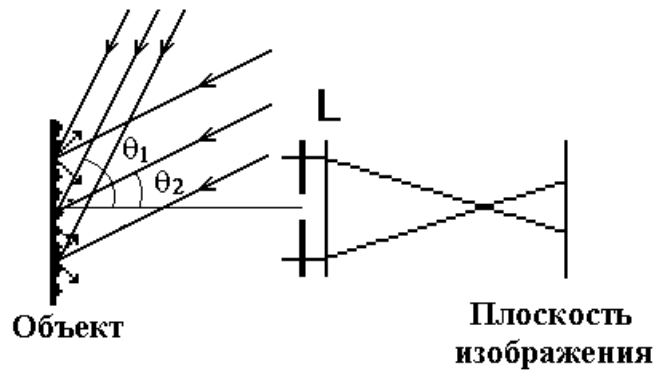


Рис.3.4. Схема спекл-интерферометра для регистрации нормальных смещений с пониженной чувствительностью.

В этом случае

$$\Psi = (2\pi d_1 / \lambda)(\cos \theta_1 - \cos \theta_2) . \quad (3-14)$$

Для определения смещений объекта в собственной плоскости можно применять схему спекл-интерферометра, показанную на рис.3.5.

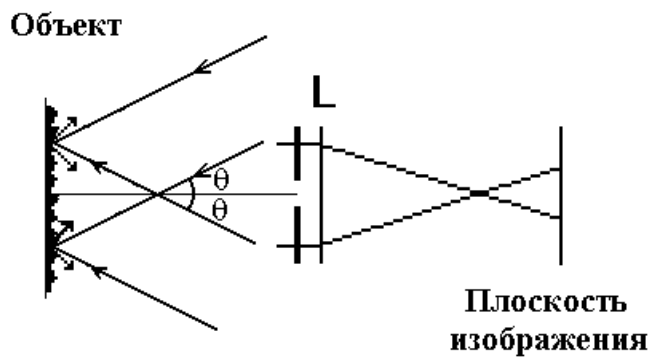


Рис.3.5. Схема спекл-интерферометра, чувствительного к смещениям в плоскости объекта.

Разность фаз в плоскости объекта между исходным и деформированным состоянием определится как

$$\Psi = 4\pi d_2 \sin \theta / \lambda . \quad \dots \quad (3-15)$$

Для определения всех компонент вектора смещения в /127/ G.Gulker и др. предложена следующая схема:

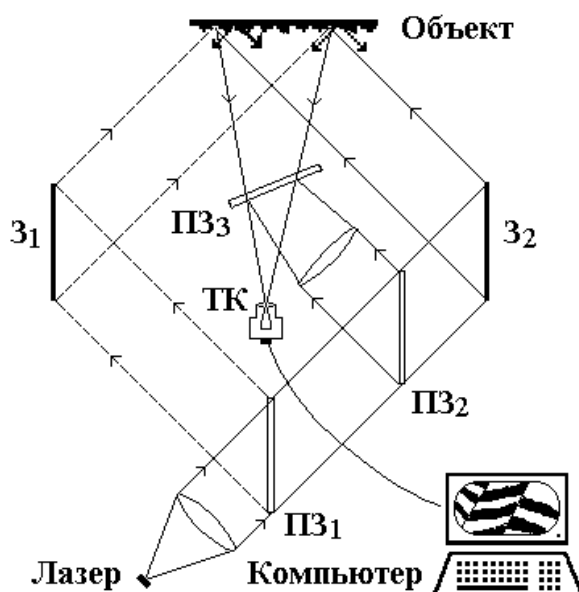


Рис.3.6. Спекл-интерферометр для измерения всех компонент вектора смещений (Z_1 , Z_2 - зеркала, ПЗ₁, ПЗ₂, ПЗ₃ - светоделители, ТК - телевизионная камера.)

Светоделители ПЗ₁ и ПЗ₂ поочередно вводятся в схему. При наличии светоделителя ПЗ₁ световой пучок, проходящий через левое зеркало Z_1 , интерферирует в плоскости изображения с пучком, проходящим через правое зеркало Z_2 . В этом случае интерферометр чувствителен к смещениям в плоскости объекта. Если в оптическую схему введен светоделитель ПЗ₂, интерферометр чувствителен к нормальным к плоскости объекта смещениям.

3.2. Методы расшифровки с использованием управляемого фазового сдвига

Корреляционные спекл-интерферограммы имеют низкий контраст полос, характер корреляционных полос носит более сложный характер, чем у обычных интерферограмм, кроме того, проследить можно только темные полосы. Поэтому методы расшифровки, основанные на выделении центров полос и интерполяции значений между ними, приводят к большим погрешностям /162, 166, 176/.

Снижение погрешности обеспечивают методы, основанные на анализе в частотной области. Они используются в тех случаях, когда достаточно просто обеспечить внесение несущей пространственной частоты. Однако, точностные характеристики измерительных систем, использующих такие методики расшифровки, все же значительно хуже, чем у голографических интерференционных систем /195, 196, 198/.

С целью минимизации погрешностей, связанных со спекл-структурой, рядом авторов /55, 163, 104, 177/ было предложено вносить дополнительные фазовые сдвиги между предметным и опорным пучками, по аналогии с тем, как это делается в обычной фазосдвигающей интерферометрии (Глава 2).

Существует два способа определения разности фаз: по картинам корреляционных полос и без формирования корреляционных полос.

Определение разности фаз по картинам корреляционных полос.

Фиксируется распределение интенсивности недеформированной поверхности. Затем, после деформации объекта, последовательно вносят между предметным и опорным пучками дополнительные фазовые сдвиги - 0, $\pi/2$, π , $3\pi/4$, и вычисляют картины корреляционных полос

$$I_{s,k}(x,y) = |I_{\text{ref}}(x,y) - I_{\text{def},k}(x,y)|, \quad (3-16)$$

где индексы $k=1,2,3,4$ соответствуют фазовым сдвигам. Модуль берется для удаления отрицательных величин. Было предложено определять фазовый сдвиг Ψ из соотношения

$$\operatorname{tg}\Psi = \frac{\bar{I}_{s,4} - \bar{I}_{s,2}}{\bar{I}_{s,1} - \bar{I}_{s,3}}, \quad (3-17)$$

где $\bar{I}_{s,k}$ - картины корреляционных полос, усредненные по столь малым областям $\Omega(x,y)$, в пределах которых фазовый сдвиг $\Psi(x,y)$, вызванный деформацией объекта, можно считать почти постоянным. Усреднение необходимо, т.к. алгоритм (3-17) применим только для косинусоидальных зависимостей интенсивности от фазы, а из выражения (3-10) видно, что распределение яркости имеет сложный характер.

Определение разности фаз без формирования корреляционных полос. Разности фаз можно определить по исходным спеклограммам. Для определения спеклообразной фазовой картины $\phi_S - \phi_R$ вносят фазовые сдвиги δ_k между опорным и объектным пучками до деформации объекта:

$$I_{\text{ref},k} = A_S^2 + A_R^2 + 2 A_S A_R \cos(\phi_S - \phi_R + \delta_k), \quad (3-18)$$

индексы k здесь соответствуют внесенным фазовым сдвигам. После этого объект деформируется, фиксируется еще ряд спеклограмм

$$I_{\text{def},k} = A_S^2 + A_R^2 + 2 A_S A_R \cos(\phi_S - \phi_R + \Psi + \delta_k), \quad (3-19)$$

и находится поле $\phi_S - \phi_R + \Psi$.

Вычитанием одного поля из другого находим фазовые значения

$\Psi(x,y)$, вызванные деформацией объекта. Требуется регистрация шести спеклограмм (3 до и 3 после внесения деформации) при использовании трехточечного (3-20) и восьми при использовании четырехточечного (3-21) алгоритмов расшифровки:

$$\phi = \arctan \sqrt{3} \frac{I_3 - I_2}{2I_1 - I_2 - I_3}, \text{ для } \delta_i = 0, 2\pi/3, \pi, 4\pi/3 \quad i=1,2,3 \quad , \quad (3-20)$$

$$\phi = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}, \quad \text{ для } \delta_i = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/4 \quad i=1,2,3,4 \quad . \quad (3-21)$$

Пошаговые формулы расшифровки могут использоваться только при косинусоидальной зависимости интенсивности от фазы. Чтобы вид интерференционных полос был близок к косинусоидальному распределению, приходится использовать низкочастотную фильтрацию. Спеклы в этом случае рассматриваются как шум.

Использование низкочастотной фильтрации возможно при условии, что средний уровень спекл-шума одинаков в соответствующих областях усреднения Ω корреляционных полос

$$N_1(\Omega) = N_2(\Omega) = N_3(\Omega) = N_4(\Omega) = N \quad . \quad (3-22)$$

Допущение (3-22) равносильно предположению, что средний размер спеклов много меньше среднего размера областей усреднения. При использовании телевизионных систем регистрации средний размер спеклов становится соизмеримым со средним размером области усреднения. Поэтому прямое использование методов пошагового сдвига приводит к увеличению погрешности измерений.

3.3. Методы расшифровки, основанные на рассмотрении спекл-структуры как информационной части сигнала

Ниже рассмотрены разработанные нами алгоритмы, основанные на рассмотрении спекл-структуры как информационной части сигнала [24, 47, 69, 70, 130, 131].

Предположим, что перед деформацией объекта регистрируют распределение интенсивности $I_{\text{ref}}(\alpha)$ в спеклограмме исходной поверхности объекта, полученной при внесении контролируемого фазового сдвига α между объектным и опорным пучками в спекл-интерферометре. После деформации объекта регистрируют спеклограмму $I_{\text{def}}(\beta)$ деформированной поверхности объекта при фазовом сдвиге β . Предполагается, что уровень деформации объекта выбран таким, что эффект декорреляции спеклов отсутствует. Объединив выражения (3-10) и (3-11) получим:

$$I_{\text{ref}}(\alpha) - I_{\text{def}}(\beta) = 4A_s A_r \sin(\phi_s - \phi_r + \Psi/2 + (\alpha + \beta)/2) \sin(\Psi/2 + (\beta - \alpha)/2), \quad (3-23)$$

Сигналы с низкочастотными составляющими проходят через оптическую систему без искажений, в то время как высокочастотные составляющие сигнала при прохождении через оптическую систему с ограничивающей апертурой искажаются и формируют спекл-структуру.

Можно заметить, что

$$\tan(\Psi/2) = \frac{|I_{\text{ref}}(\pi/2) - I_{\text{def}}(\pi/2)|}{|I_{\text{ref}}(0) - I_{\text{def}}(\pi)|} = \frac{N \sin(\Psi/2)}{N \cos(\Psi/2)}. \quad (3-24)$$

Т.е., если взять четыре спеклограммы, две из которых зарегистрированы

до деформации объекта при фазовых сдвигах между объектным и опорным пучками 0 и $\pi/2$, а две другие после деформации, при сдвигах $\pi/2$ и π , то можно определить фазовый сдвиг, вызванный деформацией поверхности объекта. Выражение (3-24) не подразумевает прямой фильтрации для устранения спеклов. При этом спекл-структура, воспринимается не как спекл-шум, а как часть информационного сигнала.

Продемонстрируем компьютерный процесс расшифровки. Для этого, значения I_{ref} и I_{def} представим в виде числовых массивов, определенных по (3-18) и (3-19). Размер массивов 512 точек. Фазовый сдвиг $\Psi(x,y)$ задавался в виде линейной функции в диапазоне от 0 до 4π . Для моделирования отражения от диффузно рассеивающей поверхности использовались равномерно распределенные в диапазоне от 0 до 2π случайные числа. Моделирование искажений при прохождении волнового фронта через оптическую систему осуществлялось отсечением высокочастотных гармоник сигнала. Затем с помощью алгоритма расшифровки находилось исходное распределение фаз.

На рис.3.7 показаны значения числителя и знаменателя (3-24) при этих условиях.

Для моделирования прохождения волнового фронта через ограничивающую апертуру использовалась фильтрация в частотной области (рис.3.8).

После преобразования Фурье устранялись 200 высокочастотных гармоник, и производилось обратное преобразование. На рис.3.9 показаны результаты расшифровки.

Из графиков видно, что

-алгоритм расшифровки (3-24) работает при значительном отличии картины от косинусоидального распределения;

-не требуется предварительного сглаживания спеклограмм.

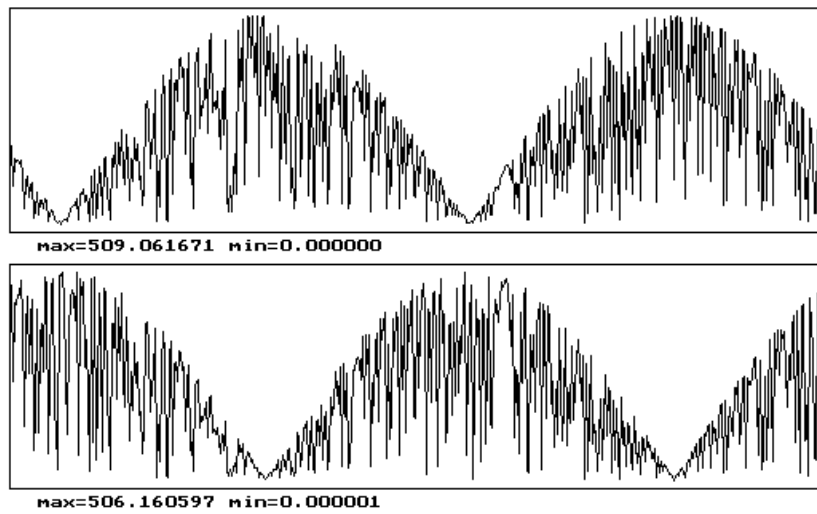


Рис.3.7. Значения числителя и знаменателя (3-24).

Верхний график - $|I_{\text{ref}}(\pi/2) - I_{\text{def}}(\pi/2)|$.

Нижний график - $|I_{\text{ref}}(0) - I_{\text{def}}(\pi)|$.

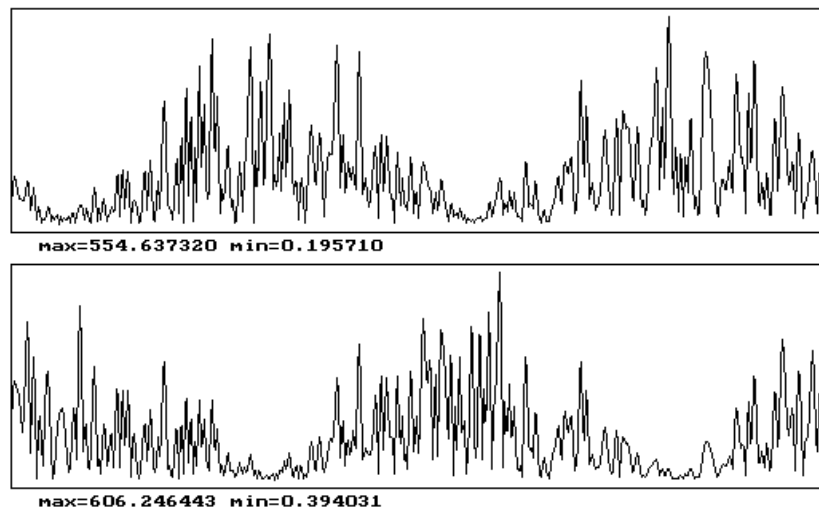


Рис.3.8. Значения числителя и знаменателя (3-24) после фильтрации в частотной области.

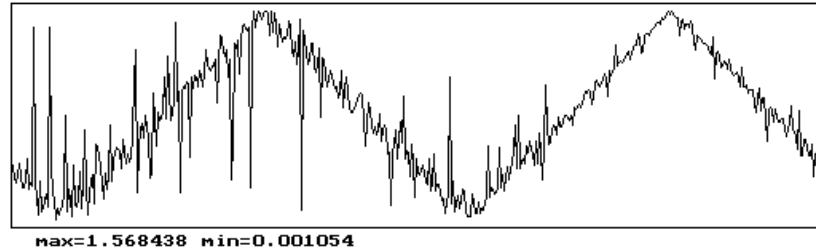


Рис.3.9. График фазовых значений, определенных с помощью выражения (3-24), после прохождения волновых фронтов через вырезающую апертуру.

Однако, выражение (3-24) использовать не удобно, т.к. определяется значение половинного фазового сдвига $\Psi(x,y)$, вызванного деформацией. Фазовые значения, превышающие половинный фазовый сдвиг определяются неправильно. Это вызвано неопределенностью фазового квадранта в формуле расшифровки.

Нами получено выражение для определения полного фазового сдвига $\Psi(x,y)$ в диапазоне от 0 до 2π . Введя обозначения

$$K_1(x,y) = I_{\text{ref}}(\pi/4) - I_{\text{def}}(3\pi/4) , \quad (3-25.a)$$

$$K_2(x,y) = I_{\text{ref}}(\pi/2) - I_{\text{def}}(\pi/2) , \quad (3-25.б)$$

$$K_3(x,y) = I_{\text{ref}}(0) - I_{\text{def}}(\pi) \quad (3-25.в)$$

и выполняя тригонометрические преобразования, находим

$$\Psi(x,y) = \arctan \frac{2(K_1)^2 - (K_2)^2 - (K_3)^2}{(K_3)^2 - (K_2)^2} . \quad (3-26)$$

Выражение (3-26) требует регистрации 6 спеклограмм: 3-х до

деформации и 3-х после деформации объекта. Нами получено более простое выражение, использование которого существенно упрощает процедуру измерений:

$$\Psi(x, y) = \arctan \frac{2K_2K_3}{(K_3)^2 - (K_2)^2}. \quad (3-27)$$

Выражение (3-27) требует регистрации только 4 спеклограмм: 2-х до, и 2-х после деформации объекта. При этом необходимо внести всего два фазовых сдвига. Схема регистрации спеклограмм следующая: сначала фиксируется спеклограмма исходного объекта, затем после фазового сдвига $\pi/2$, регистрируется вторая. Затем объект деформируется, фиксируются третья, и после внесения фазового сдвига π , четвертая спеклограмма.

Анализ знаков числителя и знаменателя позволяет расширить область определения функции \arctan в (3-26), (3-27) от 0 до 2π .

На следующих рисунках представлены результаты компьютерного моделирования при тех же условиях, что и для алгоритма (3-24).

Предложенный метод расшифровки в принципе отличается от способа корреляционного сравнения спеклограмм, поскольку не производится пространственного сравнения спеклов. Его можно рассматривать как интерференционный способ с ограничением спектра сигнала в частотной области.

На графике (рис.3.12) видны точки, погрешность в которых намного превосходит среднюю. Это происходит в тех точках, в которых видность $V(x,y)$ меньше некоторого предела (Глава 2).

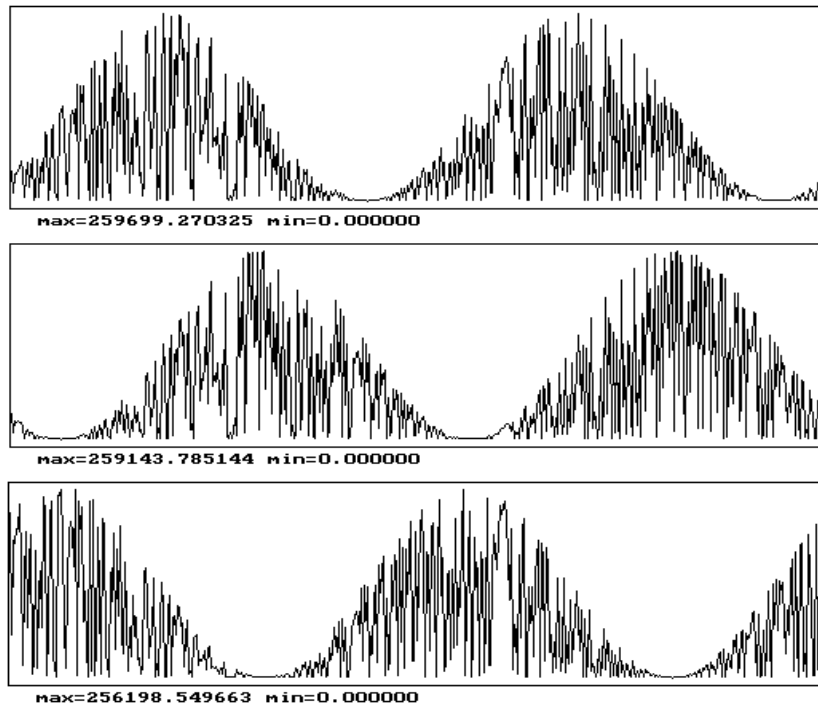


Рис.3.10. График распределения значения для $(K_1)^2$, $(K_2)^2$, $(K_3)^2$.

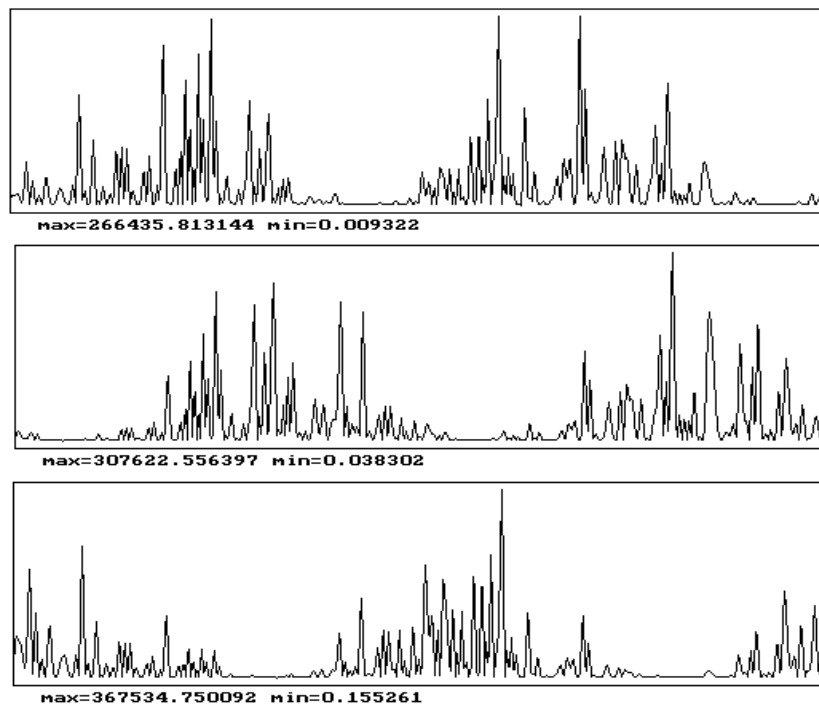


Рис.3.11. График значения $(K_1)^2$, $(K_2)^2$, $(K_3)^2$ после обнуления 200
высокочастотных гармоник в частотной области.

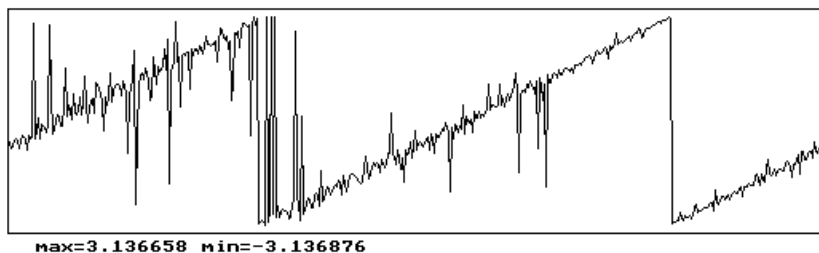


Рис.3.12. График фазовых значений, определенных с помощью выражений (3-26) (3-27) после прохождения волновых полей через вырезающую апертуру.

Для алгоритма (3-26)

$$V(x, y) = \frac{1}{I_0} \sqrt{\left(2(K_1)^2 - (K_2)^2 - (K_3)^2\right)^2 + \left((K_2)^2 - (K_3)^2\right)^2} . \quad (3-28)$$

Для алгоритма (3-27)

$$V(x, y) = \frac{1}{I_0} \sqrt{(2K_2K_3)^2 + \left((K_2)^2 - (K_3)^2\right)^2} . \quad (3-29)$$

Точки, в которых видность меньше некоторой заданной величины отбрасывались. Величина предела выбиралась так, чтобы отсекалось не более 5% всего количества точек. На рис.3.13 показан график фазовых значений после отбрасывания сбойных точек.

На рис.3.14 показан график максимальных отклонений фазовых значений от действительных после отбрасывания 200 гармоник. Максимальная величина ошибки определяется выбором апертуры и видом распределения фазового поля.

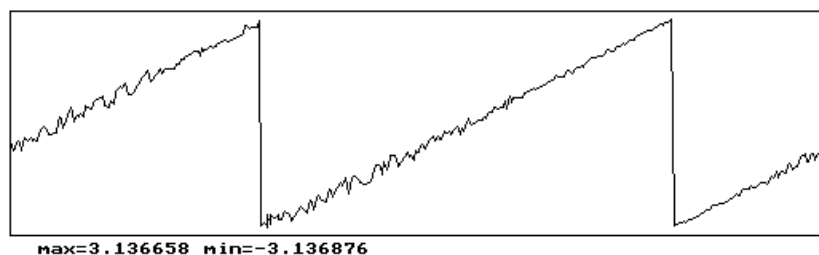


Рис.3.13. График фазовых значений после удаления 5% точек с низкой видимостью.

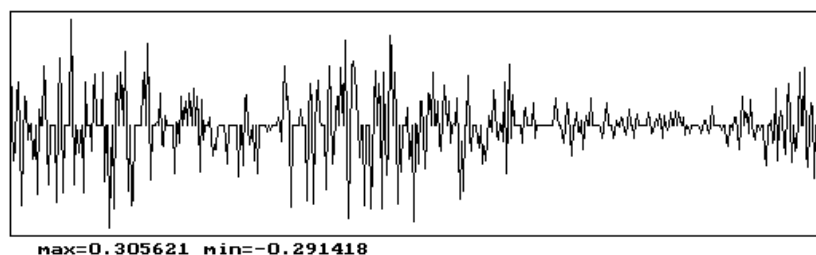


Рис.3.14. График максимальных отклонений фазовых значений, определенных по формулам расшифровки (3-26), (3-27), от действительных значений.

Чем больше пространственных частот отсекается, тем больше ошибка при определении фаз. Для рассматриваемого случая (отсекается 200 гармоник, $\Psi(x,y)$ -линейная функция) максимальная ошибка составляет $\approx 10\%$. Среднеквадратичная погрешность измерений фазового сдвига в этом случае $\approx \lambda/10 - \lambda/20$.

Таким образом, использование предложенного алгоритма позволяет проводить измерения полей смещений диффузных объектов с погрешностью, близким к погрешностям интерференционных систем. Следует подчеркнуть, что соотношения (3-26), (3-27) не требуют анализа пространственного распределения фазового поля, поскольку все величины входящие в него относятся к одной и той же точке плоскости изображения.

3.4. Алгоритмы расшифровки, устойчивые к линейным ошибкам при задании сдвига

Алгоритмы расшифровки (3-24), (3-26), (3-27) имеют существенный недостаток - фазовый сдвиг должен задаваться точно. При ошибке в задании сдвига возникают погрешности, отделить которые от истинных значений невозможно. Нами получены алгоритмы устойчивые к линейным ошибкам при задании сдвига.

Задается следующая последовательность фазовых сдвигов $0, \alpha/2, \alpha, \alpha, 3\alpha/2, 2\alpha$, где α - произвольно заданный угол. Будем регистрировать спеклограммы в следующем порядке: сначала фиксируется спеклограмма исходного объекта, затем, после фазового сдвига $\alpha/2$, регистрируется вторая, вносится сдвиг α , регистрируется третья, затем объект деформируется, фиксируются четвертая, вносятся сдвиги $3\alpha/2, 2\alpha$ и фиксируются пятая и шестая спеклограммы.

Пусть

$$K_1(x,y) = I_{\text{ref}}(\alpha/2) - I_{\text{def}}(3\alpha/2) , \quad (3-30.a)$$

$$K_2(x,y) = I_{\text{ref}}(\alpha) - I_{\text{def}}(\alpha) , \quad (3-30.б)$$

$$K_3(x,y) = I_{\text{ref}}(0) - I_{\text{def}}(2\alpha) , \quad (3-30.в)$$

после тригонометрических преобразований получим:

$$\tan(\Psi/2) = \frac{|K_2 \sin \alpha|}{|K_3 - K_2 \cos \alpha|} \quad (3-31)$$

или

$$\tan(\Psi/2) = \frac{|K_2 \sin(\alpha/2)|}{|K_1 - K_2 \cos(\alpha/2)|} . \quad (3-32)$$

Угол α определяется из выражения

$$\cos(\alpha / 2) = \frac{K_2 + K_3}{2K_1} . \quad (3-33)$$

Если (3-33) подставить в (3-32) получим

$$\tan(\Psi/2) = \frac{|K_2 \sqrt{4K_1^2 - (K_2 + K_3)^2}|}{|2K_1^2 - K_2(K_2 + K_3)|} . \quad (3-34)$$

Для полного фазового угла

$$\tan(\Psi) = \frac{2K_2 \sin \alpha (K_3 - K_2 \cos \alpha)}{(K_3 - K_2 \cos \alpha)^2 - K_2^2 (\sin \alpha)^2} . \quad (3-35)$$

Если подставить значения для угла сдвига в (3-35), получим результирующее выражение для расшифровки спекл-интерференционных картин в случае линейной ошибки при установке фазового сдвига:

$$\tan(\Psi) = \frac{2M_1 M_2}{M_1^2 - M_2^2} , \quad (3-36)$$

где

$$\sin(\alpha) = \frac{|2(K_2 + K_3) \sqrt{4K_1^2 - (K_2 + K_3)^2}|}{4K_1^2} , \quad (3-37)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{2(K_2 + K_3)^2 - 4K_1^2}{4K_1^2}, \quad (3-38)$$

$$M_1 = K_2 \sin(\alpha) \quad , \quad (3-39)$$

$$M_2 = K_3 - K_2 \cos(\alpha) \quad , \quad (3-40)$$

Выражение (3-36) позволяет использовать устройства внесения фазового сдвига без точной калибровки. Достаточно, чтобы обеспечивалось приращение сдвига на одну и ту же величину.

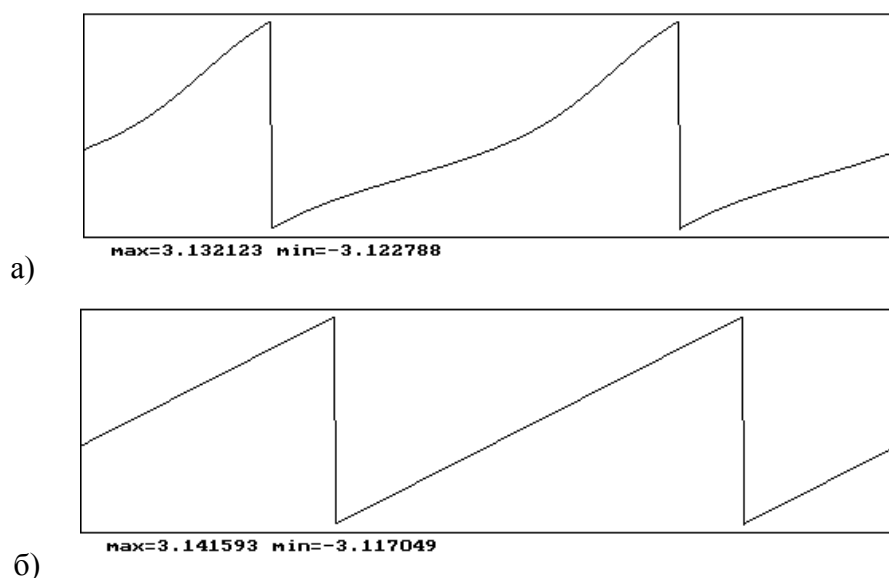


Рис.3.15. Графики фазовых значений, восстановленных с помощью алгоритма без учета линейных погрешностей по алгоритму (3-26) и с учетом линейных погрешностей по алгоритму (3-36).

На рисунке 3.15 показаны графики фазовых значений после расшифровки по шести спеклограммам с помощью алгоритмов (3-26) - рис.3.15а и (3-36) - рис.3.15б. Исходная фаза - линейная функция. Сдвиги при получении спеклограмм: до внесения деформаций 0° , 60° , 120° ; после внесения 120° , 180° , 240° .

Таким образом, использование алгоритма (3-36) позволяет устранить влияние линейных ошибок при задании фазового сдвига. Если обеспечивается линейность характеристик, применение алгоритма позволяет использовать устройства внесения сдвига без калибровки перед каждым измерением.

3.5. Использование усреднения на элементе детектора

Для снижения уровня погрешности необходимо уменьшить размер спеклов. Однако, при использовании традиционных методов расшифровки, размер спекла ниже некоторого предела, заданного разрешением устройств регистрации, уменьшать нельзя. Это вызвано тем, что на один спекл в картине интенсивностей должно приходиться несколько точек или, что то же самое, один спекл должен проецироваться на несколько элементов фотодетектора.

Предложенные нами алгоритмы, позволяют использовать существенно меньший размер спеклов. Размер может быть таким, чтобы на один элемент датчика приходилось несколько спеклов. В этом случае результирующая картина будет формироваться усреднением выбранного числа единичных спеклов. Такая методика позволяет, во-первых, снизить величину искажений исходного фазового фронта и, во-вторых, использовать в оптических установках больший размер апертуры. При апертуре больших размеров увеличивается разрешение систем и упрощается получение спеклограмм, т.е. при этом существенно снижаются требования к чувствительности устройств регистрации.

Интерференционные полосы образуются при изменении оптического хода интерферирующих волновых фронтов на длину волны, т.е. при изменении разности фаз на 2π . Пространственная

частота массива детекторов ограничивает максимально измеряемую частоту полос, которую можно оценить по критерию Найквиста для массива приемников. Если частота полос на интерферограмме превышает частоту Найквиста, приемник фиксирует ложные низкочастотные полосы. Это происходит, например, при интерференционных измерениях волновых фронтов с большими различиями от эталонных.

В интерференционных методах необходимо, чтобы размер элемента датчика был таким, чтобы не возникало эффекта перекрытия спектров при дискретизации сигнала. Для моделирования этого процесса представим геометрию фотоприемника в виде, показанном на рис.3.16. Пусть фотоприемник представляет собой прямоугольный массив прямоугольных датчиков. Каждая точка фиксируется датчиком размером a на b соответственно.

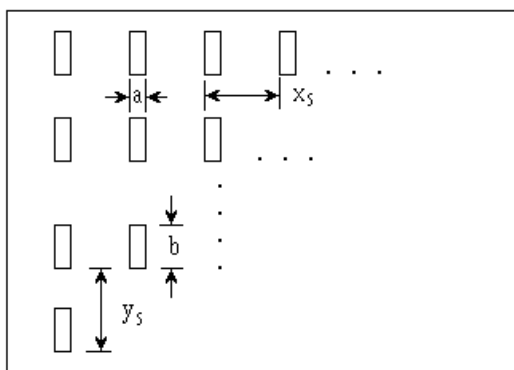


Рис.3.16. Геометрия фотоприемника.

Для простоты анализа все незначимые константы опущены, и все выражения рассматриваются в плоскости приемника. Например, масштабный фактор, связывающий размеры объекта с размерами его изображения, игнорируется. В этом случае пространственную

дискретизацию изображения можно описать следующим выражением

$$I_S(x,y) = [I(x,y) ** \text{rect}(x/a, y/b)] \text{comb}(x/x_S, y/y_S), \quad (3-41)$$

где $I(x,y)$ - поле интенсивностей одной из интерферограмм, символ $**$ обозначает двумерную свертку, и функция comb - массив δ -функций с таким же пространственным расположением, как и точки на дискретизированной интерферограмме.

Пространственные частоты дискретизированной интерферограммы можно получить Фурье-преобразованием выражения

$$\hat{I}_S(\xi, \eta) = [\hat{I}(\xi, \eta) \cdot \text{sinc}(a\xi, b\eta)] ** \text{comb}(x_S\xi, y_S\eta), \quad (3-42)$$

где (ξ, η) - координаты пространственных частот, $\hat{I}(\xi, \eta)$ - спектр интерферограммы и

$$\text{sinc}(a\xi, b\eta) = \frac{\sin(\pi a\xi)}{\pi a\xi} \frac{\sin(\pi b\eta)}{\pi b\eta}. \quad (3-43)$$

Природа возникновения ложных полос показаны на рис.3.17. Для простоты графического представления предположим, что функция $\hat{I}(\xi) \cdot \text{sinc}(a\xi)$ ограничена треугольной функцией (рис.3.17а).

Границы $\pm 1/a$ совпадают с первыми нулями функции sinc . На рис.3.17б показан хороший случай, когда границы спектра меньше частоты Найквиста приемника $f_N = \pi/x_S$. Этот случай соответствует условию теоремы о дискретизации: шаг дискретизации не должен превышать половины периода пространственной гармоники,

соответствующей самым мелким деталям изображения /84/.

В случае широкополосных волновых фронтов появляются полосы, границы частот которых $\pm 1/a$ превышают частоту Найквиста. Эта ситуация показана на рис.3.17в. Повторяющиеся участки спектра перекрываются с основной частью спектра от нуля до частоты Найквиста. Образуются низкочастотные ложные полосы.

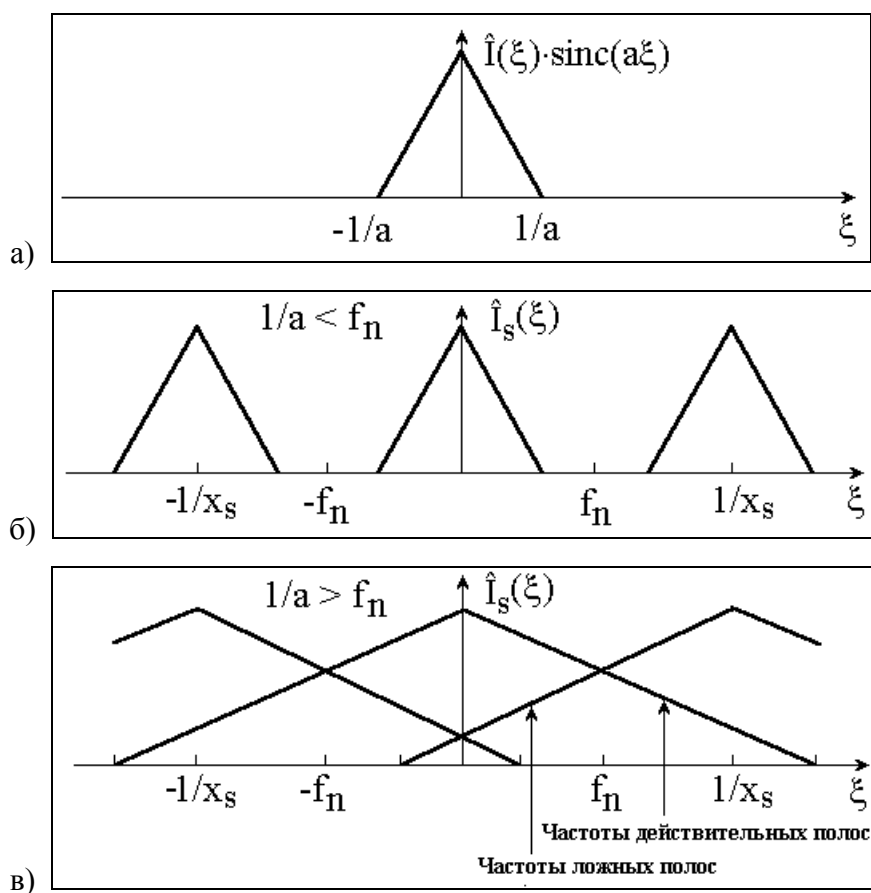


Рис.3.17. Образование ложных полос в частотной области.

а) границы спектра; б) спектр сигнала при частоте Найквиста, превышающей верхнюю границу спектра; в) спектр сигнала при частоте Найквиста ниже верхней границы спектра.

При отражении от объектов с диффузной поверхностью образуется

волновой фронт с широкополосным спектром. Даже, если полезный сигнал имеет ограниченный спектр, выделить его без искажений из суммы спектров сигнала и шума не удастся, поскольку происходит перекрытие спектров при квантовании с недостаточной частотой.

Для устранения этого эффекта необходимо уменьшать размер элементарной площадки датчика, что приводит к необходимости применять более сложные устройства для ввода интерференционных картин.

Использование предложенной нами методики позволяет проводить измерения, если на одну элементарную площадку датчика может приходиться несколько спеклов. При этом возможно использование обычных телевизионных устройств.

На следующем рисунке показан результат расшифровки по формулам (3-26), (3-27) при пространственном усреднении 4 соседних точек, соответствующих I_{ref} , I_{def} . Этим моделируется процесс попадания на один элемент детектора 4 спеклов.

При использовании усреднения на датчиках фотоприемника необходимо, чтобы на один элемент детектора приходилось несколько спеклов, и оптическая система обеспечивала такое разрешение.

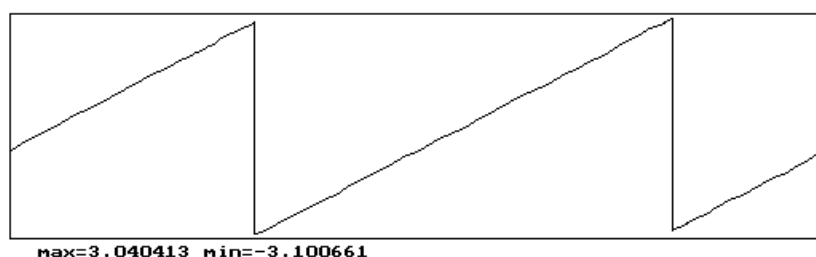


Рис.3.18. График фазовых значений после усреднения 4 соседних точек.

На рис.3.19 показан график максимальных отклонений фазовых

значений от действительных.

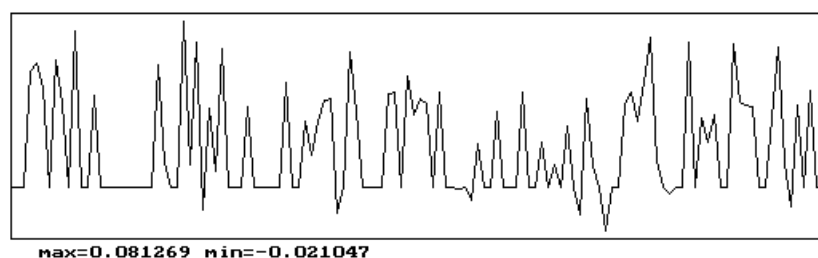


Рис.3.19. График максимальных отклонений фазовых значений, определенных по формулам (3-26), (3-27), от действительных значений при усреднении 4 соседних точек.

Максимальная ошибка в этом случае составляет 1.5%. Среднеквадратичная погрешность измерений фазового сдвига в этом случае $\approx \lambda/60 - \lambda/70$.

Размер спеклов в пространстве изображения зависит только от апертуры линзы, формирующей изображение. Например, при использовании объектива с числовой апертурой 2 и при использовании источника освещения с длиной волны $\lambda=0.63$ мкм, средний размер спекла $s=6.1$ мкм. Это видно из выражения (3-2). Серийно выпускаемые объективы обеспечивают разрешение 50-100 линий на один мм, что позволяет получать изображение со средним размером спекла порядка 10-20 мкм.

В традиционных методах расшифровки требуется, чтобы спеклы имели достаточно большие размеры. При этом следует применять линзы с очень малой апертурой. Однако, при уменьшении апертуры соответственно уменьшается и световой поток, проходящий через линзу. При некотором пороге не хватает чувствительности по яркости серийных видеосистем, используемых для регистрации. В таких случаях

приходится применять фотоэлектронные умножители для усиления светового потока или устройства регистрации с повышенной чувствительностью. Оптимальное рекомендуемое значение числовой апертуры для получения корреляционных спекл-интерферограмм, полученное опытным путем ~ 8 .

При использовании предлагаемого метода размер числовой апертуры может быть менее 2. В этом случае увеличивается световой поток и возможно применение обычных фотоприемников.

Нами использовалось устройство ввода на основе измерительной камеры КТ-М с приемной трубкой типа видикон. Размер вырезающей апертуры для отдельного элемента детектора - 20 мкм. Поскольку используемая оптическая система не позволяла на один элемент детектора проецировать более одного спекла, применялось цифровое усреднение соседних точек после ввода спеклограмм в компьютер. Усреднение соседних точек приводит к уменьшению разрешения измерительной системы при определении фазовых значений. Однако применение современных устройств регистрации позволяет существенно увеличить пространственное разрешение измерительных систем.

В Главе 5 описана система для контроля внеплоскостных деформаций, в которой расшифровка спекл-интерферограмм производится с помощью предложенной методики. В связи с недостаточным разрешением применяемого объектива, используется пространственное усреднение по соседним восьми точкам оцифрованного поля интенсивностей. По сравнению с существующими алгоритмами достигается значительное улучшение качества расшифровки. Однако полного удаления влияния спекл-структуры не происходит. Это связано с декорреляцией спеклов в картинах до и после

деформации.

Экспериментальная проверка показала, что среднеквадратичная погрешность определения полей смещений точек поверхности при деформации объекта составила не менее $\lambda/20$ - $\lambda/30$.

3.6. Выводы

Исследования в области корреляционной спекл-интерферометрии в настоящее время приобретают новый импульс в связи с появлением высокоразрешающих приемников изображений, а также малогабаритных твердотельных лазеров. Использование современной аппаратуры позволяет создавать компактные измерительные системы, которые могут быть закреплены непосредственно на исследуемых конструкциях в реальных условиях эксплуатации. Однако, в настоящее время, погрешность фазовых измерений значительно больше, чем у интерференционных и голографических систем.

Представлен новый метод расшифровки спекл-интерферограмм, основанный на анализе разрешающих уравнений при образовании спеклограмм. Он отличается от известных тем, что при определении поля фаз не производится корреляционного сравнения. Анализ производится в каждой отдельно выбранной точке фотоприемника.

В отличие от известных методов расшифровки используется ограничение широкополосных сигналов в частотной области. Поэтому этот метод можно использовать при измерении разности волновых фронтов, отраженных от диффузных поверхностей.

Предложен ряд алгоритмов расшифровки с различным числом шагов. Исследованы их характеристики. Разработан алгоритм устойчивый к линейным ошибкам при задании фазового сдвига.

Метод предполагает возможность усреднения на датчиках фотоприемника. При этом размер числовой апертуры может быть менее 2. В этом случае увеличивается световой поток и возможно использование обычных фотоприемников.

Полученные результаты позволяют предложить алгоритм для

практического использования в спекл-интерференционных системах, поскольку погрешность измерений поверхностных перемещений диффузных объектов становится сравнимой с голографическими измерительными системами.

4. Расширение динамического диапазона интерференционных методов измерений

Одним из факторов, сдерживающих широкое распространение интерференционных измерительных систем, является ограниченный диапазон измерений. Существующие методы расшифровки предназначены для анализа волновых фронтов с небольшими отличиями от эталонных. Причиной этого является периодический характер зависимости интенсивности интерференционной картины от фазовой разности интерферирующих волновых фронтов.

Проблема увеличения диапазона очень важна, поскольку при удачном решении этой задачи значительно расширяется область применения интерференционных измерительных систем.

В этой главе рассмотрен предложенный нами новый метод, который позволяет резко увеличить диапазон измерений без потери точности. Он основанный на использовании серии измерений при различных ценах интерференционных полос. Цена полосы определяется разностью оптического хода волн, при которой интерференционные полосы меняются на период. Она может меняться при изменении угла между интерферирующими пучками, коэффициента пропускания среды или длины волны источника освещения.

Использование метода без разработки специальных способов коррекции невозможно, поскольку при переходе от непрерывного множества измеряемых величин к целочисленным значениям возникают ошибки, учет которых традиционными методами анализа погрешностей невозможен. Ниже описаны разработанные автором

способы коррекции ошибок при получении исходных данных. Для сокращения времени вычислений предложены быстрые алгоритмы коррекции, основанные на сведении n -ой задачи к одномерной. Проведено математическое и экспериментальное моделирование метода.

Раздел 4.1. основан на известных положениях теории чисел и на совместных работах с профессором Ю.Н.Солодкиным. Остальные результаты, изложенные в главе принадлежат лично автору. Материал этой главы в основном опубликован в /23, 27, 30, 31, 36, 39, 41, 42, 43, 45, 46, 49, 50, 66, 67, 128, 129/.

4.1. Использование теоремы об остатках для восстановления полной фазы

Изменение фазы на 2π для волн с разными длинами происходит при различных значениях оптической разности хода. Или, другими словами, одному и тому же расстоянию, проходимому разными волнами, соответствуют разные значения целого числа и дробного остатка периодов волн при различных длинах.

С помощью интерференционных методов можно определить фазовые значения дробного остатка в пределах периода. При пересчете по полученным фазам можно определить оптические разности хода волн (ОРХ) только с точностью до длины волны. Добавляя к полученным результатам значения, кратные целым длинам волн, получим набор предполагаемых решений, каждое из которых соответствует одной из используемых волн. Если, соответствующие одному и тому же пройденному расстоянию, значения не совпадают, они отбрасываются. Только совпадающие для всех используемых волн

значения ОРХ могут претендовать на роль действительных.

Рассмотрим алгоритм восстановления полной фазы на примере фазовых измерений при двух волнах /30, 31/. Исходными данными являются результаты измерений оптической разности хода при двух волнах с длинами - λ_1 и λ_2 . Поскольку результаты фазовых измерений определяются в каждой точке с точностью до периода соответствующей волны, для каждой из волн существует набор решений, который состоит из вертикально расположенных точек, отстоящих друг от друга на длину волны. Совокупность значений, удовлетворяющих всем наборам, определяет область нахождения искомой ОРХ (рис.4.1).

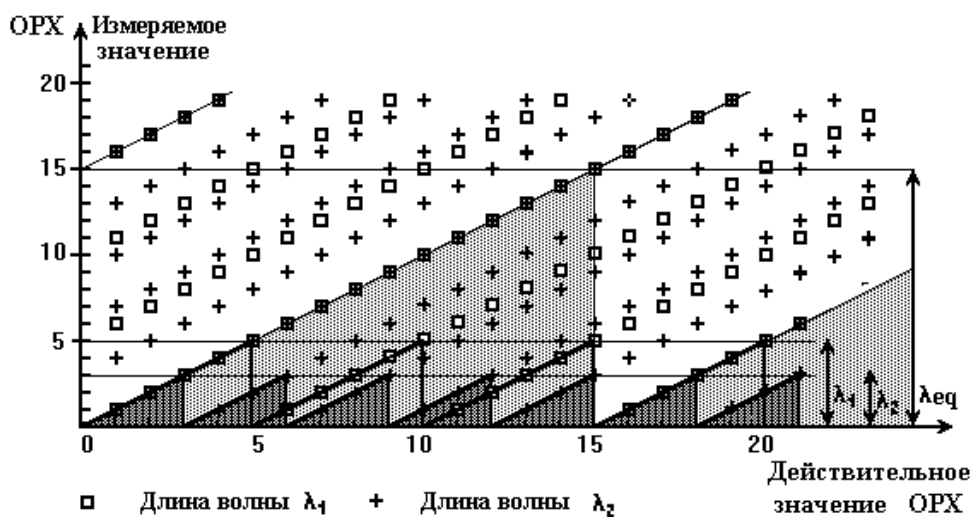


Рис.4.1. Значения оптической разности хода, удовлетворяющие измерениям при двух длинах волн с периодами соответствующими $m_1=5$ и $m_2=3$.

По горизонтальной оси расположены действительные значения разности хода, по вертикальной - значения, определяемые из фазовых измерений. Результатом измерений являются две пилообразные функции с периодами 5 и 3. Действительным значением для каждой

разности хода может быть любое из значений, отмеченное на графике «квадратом» и «плюсом». Поскольку результат при различных измерениях должен быть одинаковым, отбрасываются все несовпадающие значения.

Из рисунка видно, что значения, удовлетворяющие обоим наборам, повторяются с некоторым периодом. Этот период определяет диапазон однозначного определения фазы. Для выбранных значений этот диапазон составляет 15 выбранных единиц измерения.

Можно составить таблицу решений, просчитав все возможные сочетания, но более удобно найти аналитическое решение. Найти его можно рассмотрев систему сравнений.

Каждому целому числу отвечает определенный остаток от деления на целое положительное m , который называется модулем. Если двум целым a и b отвечает один и тот же остаток r , то они называются равноостаточными по модулю m . Сравнимость записывается как

$$a \equiv b \pmod{m} , \quad (4-1)$$

где знак (\equiv) обозначает сравнение.

Числа сравнимые по модулю m , образуют класс чисел по модулю m . Любое число класса называется вычетом по модулю m . Вычет, равный самому остатку r , называется наименьшим неотрицательным вычетом. Взяв от каждого класса по одному вычету, получим полную систему вычетов по модулю m . Чаще всего в качестве полной системы вычетов используют наименьшие неотрицательные вычеты $0, 1, \dots, m-1$.

Рассмотрим систему сравнений первой степени с одним неизвестным:

$$\begin{aligned}
 x &\equiv b_1 \pmod{m_1}, \\
 x &\equiv b_2 \pmod{m_2}, \\
 &\dots \\
 x &\equiv b_k \pmod{m_k},
 \end{aligned}
 \tag{4-2}$$

Если модули являются взаимно простыми числами, то в некотором диапазоне существует единственное решение. Найти это решение можно воспользовавшись следующей теоремой, известной в теории целых чисел /6/.

Теорема 1.

Пусть числа M_s и N_s определены из условий $m_1 m_2 \dots m_k = M_s m_s$, $M_s N_s \equiv 1 \pmod{m_s}$, и пусть

$$X_0 = M_1 N_1 b_1 + M_2 N_2 b_2 + \dots + M_k N_k b_k. \tag{4-3}$$

Тогда совокупность значений X , удовлетворяющих системе сравнений (4-2), определяется сравнением

$$X \equiv X_0 \pmod{m_1 m_2 \dots m_k}. \tag{4-4}$$

Частный случай этой теоремы был сформулирован китайским математиком Сунь Цю. Поэтому, часто эту теорему называют «Китайской теоремой об остатках». /61/.

Значения N_s можно найти с помощью обобщенного алгоритма Евклида /61/. При заданных неотрицательных целых числах u и v этот алгоритм определяет вектор (u_1, u_2, u_3) , такой, что $u_1 u + u_2 v = u_3 = \text{нод}(u, v)$. Если $u = M_s$, $v = m_s$, то $\text{нод}(M_s, m_s) = 1$, поскольку они взаимно просты. В

этом случае можно взять u_1 в качестве N_s . (нод() - наибольший общий делитель).

Обобщенный алгоритм Евклида.

1. Начальная установка. $(u_1, u_2, u_3) \leftarrow (1, 0, u)$, $(v_1, v_2, v_3) \leftarrow (0, 1, v)$.
2. Если $v_3=0$, то алгоритм заканчивается.
3. $q \leftarrow \lfloor u_3/v_3 \rfloor$, (операция $\lfloor x \rfloor$ - наибольшее целое число, не превосходящее x).
4. $(t_1, t_2, t_3) \leftarrow (u_1, u_2, u_3) - (v_1, v_2, v_3) q$,
 $(u_1, u_2, u_3) \leftarrow (v_1, v_2, v_3)$,
 $(v_1, v_2, v_3) \leftarrow (t_1, t_2, t_3)$.
5. Перейти к шагу 2.

Рассмотрим систему из двух сравнений с $m_1=53$ и $m_2=63$. Тогда $M_1=63$, $M_2=53$. Для нахождения N_1 промежуточные шаги алгоритма показаны в следующей таблице.

q	u₁	u₂	u₃	v₁	v₂	v₃
	1	0	63	0	1	53
1	0	1	53	1	-1	10
5	1	-1	10	-5	6	3
3	-5	6	3	16	-19	1
3	16	-19	1			0

Таким образом, $N_1=16$. Затем находится N_2 .

q	u₁	u₂	u₃	v₁	v₂	v₃
	1	0	53	0	1	63
0	0	1	63	1	0	53
1	1	0	53	-1	1	10
5	-1	1	10	6	-5	3
3	6	-5	3	-19	16	1
3	-19					0

$N_2 = -19 \pmod{63} = 44$. Таким образом решение системы имеет следующий вид

$$X \equiv 63 \cdot 16 b_1 + 53 \cdot 44 b_2 \pmod{3339} \equiv 1008 b_1 + 2332 b_2 \pmod{3339} . \quad (4-5)$$

Диапазон, при котором решение единственно, определяется произведением $m_1 m_2 \dots m_k$. Это следует из следующей теоремы /6/.

Теорема 2.

Если b_1, b_2, \dots, b_k независимо друг от друга пробегают полные системы вычетов по модулям m_1, m_2, \dots, m_k , то X_0 пробегает полную систему вычетов по модулю равному произведению $m_1 m_2 \dots m_k$.

Для нахождения полного оптического хода при использовании двух длин волн необходимо найти решение следующей целочисленной системы сравнений

$$OPX \equiv OPX_1 \pmod{m_1} \quad (4-6 \text{ а})$$

$$OPX \equiv OPX_2 \pmod{m_2} \quad , \quad (4-6 \text{ б})$$

где OPX_1 и OPX_2 остатки от деления искомой разности хода на соответствующую длину волны. m_1 и m_2 - соответствующие каждой из волн целые взаимно простые числа. Они определяются из соотношения

$$m_2 \lambda_1 = m_1 \lambda_2 \quad . \quad (4-7)$$

Допустим, что волне с длиной λ_1 ставится в соответствие целое число 5, волне с длиной λ_2 - число 3. По теореме об остатках область, в

которой решение единственно, определяется произведением этих чисел, и решение имеет вид:

$$\text{OPX} \equiv 6 \text{OPX}_1 + 10 \text{OPX}_2 \pmod{15} . \quad (4-8)$$

Решение системы сравнений соответствует графикам на рис.4.1. Диапазон, в пределах которого достигается единственность решения, определяется следующим выражением

$$\lambda_{\text{int}} = \lambda_1 \cdot m_2 = \lambda_2 \cdot m_1 . \quad (4-9)$$

Пусть имеется две волны $\lambda_1=0.633\text{мкм}$ и $\lambda_2=0.529\text{мкм}$. Если точность измерений такова, что соответствующим периодам могут быть поставлены в соответствие целые взаимно простые числа с тремя десятичными знаками ($m_1=529$, $m_2=633$), то диапазон, в котором отсутствует фазовая неоднозначность, равен 334.857 мкм (529 полос с длиной λ_1 или 633 полосы с периодом λ_2).

4.2. Сравнение с двухчастотным методом

Существует известный метод расширения области фазовой однозначности, основанный на измерениях при двух длинах волн - двухчастотный метод (Глава 1). Сравним с ним предложенный нами метод и рассмотрим основные различия /43/.

Видимым отличием кажется то, что при двухчастотном методе анализируются значения на непрерывном диапазоне, в то время как при целочисленном методе анализируются лишь значения в дискретных точках. Однако, в отличие от классического метода двухволновой

голографической интерферометрии, вычитаются квантованные значения фаз в дискретных точках. Поэтому фазовые значения анализируются на дискретных множествах как для целочисленного метода, так и для метода двухчастотной интерферометрии.

Рассмотрим, такие же, как и на рис.4.1, пилообразные функции с периодами 3 и 5. Для случая двухчастотного метода максимальный диапазон фазовой неоднозначности определяется выражением (1-73) и равен

$$\lambda_{\text{eq}} = \frac{\lambda_a \lambda_b}{|\lambda_a - \lambda_b|} = 7.5 . \quad (4-10)$$

В целочисленных точках 0,1,2,3 ... значения фаз для функций с периодами 3 и 5 будут соответственно равны

$$f_1 = 0, 2\pi/3, 2\pi \cdot 2/3, 0(2\pi), 2\pi/4, 2\pi \cdot 2/4, \dots \quad (4-11a)$$

$$f_2 = 0, 2\pi/5, 2\pi \cdot 2/5, 2\pi \cdot 3/5, 2\pi \cdot 4/5, 0(2\pi), 2\pi/5, . \quad (4-11b)$$

Разность фаз $f_1 - f_2$, взятая по модулю 2π равна

$$f_1 - f_2 = \frac{n2\pi|\lambda_a - \lambda_b|}{\lambda_a \lambda_b} . \quad (4-12)$$

В этом случае (Рис.4.2)

$$f_1 - f_2 = 0, 2\pi/7.5, 2\pi \cdot 2/7.5, \dots, 2\pi \cdot 8/7.5, \dots, 2\pi \cdot 14/7.5, 0(2\pi). \quad (4-13)$$

Из рис.4.2 видно, что разность фаз с периодом λ_{eq} нарастает от 0 до 2π , при изменении ОРХ от 0 до $\lambda_{\text{eq}}=7.5$. Можно заметить, что начало второго периода $0.5 \cdot 2\pi \cdot 8/7.5 = (2\pi \cdot 8/7.5) \bmod 2\pi$ точно не

совпадает с $2\pi \cdot n$.

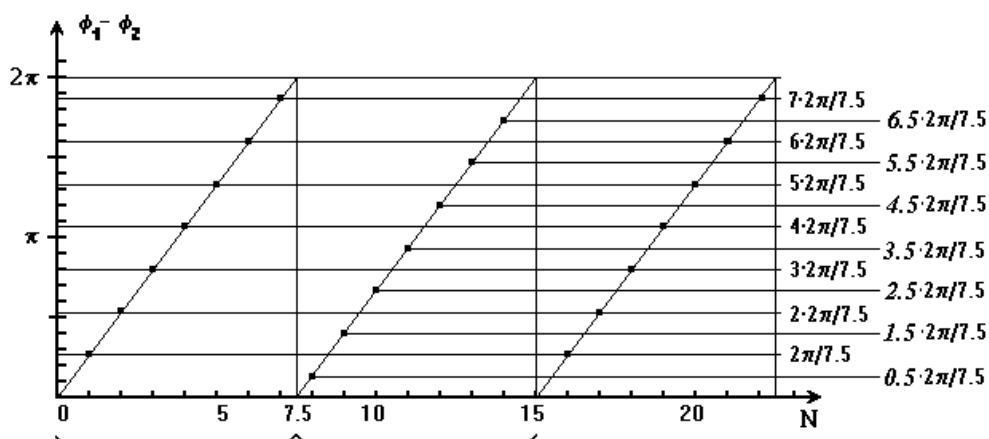


Рис.4.2. Разность фаз двух пилообразных функций с периодами 3 и 5.

Максимальное значение n при котором последовательность повторяется достигается в случае, если $\lambda_a \lambda_b$ и $|\lambda_a - \lambda_b|$ в (4-12) не имеют общих делителей. В этом случае абсолютно точные значения разности фаз будут повторяться только через период равный произведению $\lambda_a \lambda_b$. На рисунке - это начало третьего периода. Таким образом, целочисленный метод расширения диапазона можно рассматривать как предельный случай двухчастотного метода.

Диапазон двухчастотного метода определяется выражением (4-10), которое зависит только от выбранных длин волн и является жестко заданной величиной. Для расширения диапазона необходимо выбирать источники освещения с близкими длинами волн. Это приводит к значительным ошибкам, поскольку результат вычитания двух близких сигналов очень чувствителен к погрешностям исходных данных.

Максимальный диапазон целочисленного метода определяется выражением (4-9) и может значительно превышать диапазон двухчастотного метода. Диапазон целочисленного метода зависит от известной точности задания модулей. Чем точнее известны значения

модулей, тем в большем диапазоне можно восстановить полную фазу. Например, при значениях модулей 53 и 63 диапазон равен $53 \cdot 63 = 3339$, а при значениях модулей 529 и 633 диапазон составит $529 \cdot 633 = 334857$.

Поскольку длина волны когерентного источника излучения может задаваться с достаточной точностью, то предпочтение следует отдать методам, основанным на использовании источника освещения с переменной длиной волны.

Для целочисленного метода можно резко увеличить диапазон использованием нескольких длин волн вместо двух.

Для обоих методов необходимо учитывать эффекты, связанные с ахроматизмом оптических элементов. Если интерференционная картина меняет размер или пространственно сдвигается при изменении длины волны от хроматических aberrаций, результирующие фазовые значения будут иметь ошибки, вызванные неправильным выбором соответствующих точек. Небольшое влияние хроматических aberrаций допускается, но оно не должно приводить к сдвигу полос или изменению размера интерферограммы более, чем на одну измеряемую точку в массиве детекторов.

4.3. Влияние эффектов квантования и дискретизации на определение полной фазы

Результирующие фазовые значения определяются на некотором дискретном множестве. При цифровой обработке значения интенсивностей интерференционной картины при вводе в компьютер квантуются по уровню. Выбор геометрии массива фотоприемников определяет пространственную дискретизацию по полю.

Рассмотрим влияние погрешностей, вызванных квантованием и дискретизацией поля интерферограммы, на определение полной фазы двумя методами: двухволновым и целочисленным, основанном на теореме об остатках.

В двухволновом методе анализируются разности фаз, в целочисленном методе - величины оптической разности хода (ОРХ).

Рассмотрим двухволновой метод. Пусть фазовые значения определяются при одном и том же числе уровней квантования для разных волн (рис.4.3).

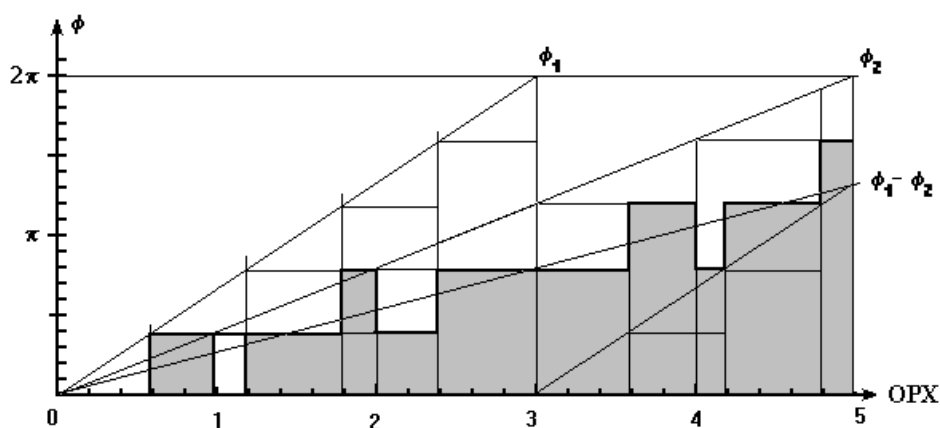


Рис.4.3. Разность двух пилообразных функций после квантования на одинаковые уровни.

Максимальная ошибка при вычислении разности фаз стремится к $2\pi/n$, где n -число уровней квантования. Этот случай наиболее близок к реальному эксперименту. Если применяется устройство ввода оптической информации, которое при квантовании интенсивности использует 8-ми разрядный аналого-цифровой преобразователь, число уровней равно 256. Как видно из рисунка, при таком способе квантования нарушается монотонность функции разности. Это объясняется тем, что величина оптической разности хода, соответствующая одинаковым значениям кванта, меняется при разных длинах волн.

Эффект несогласованного квантования ОРХ сглаживается, если величина кванта меняется в зависимости от соответствующего периоду значения ОРХ (рис.4.4).

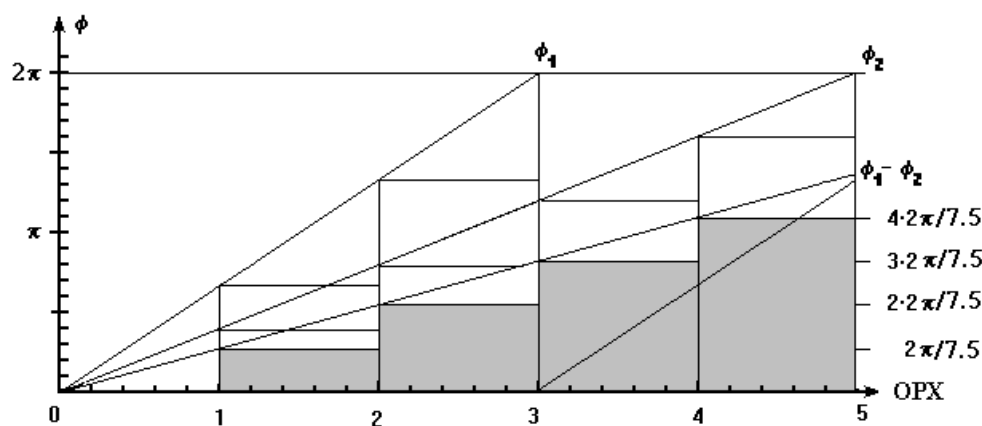


Рис.4.4. Разность двух пилообразных функций после согласованного квантования.

На этом рисунке каждая из функций разбивается на кванты, размер которых одинаков в единицах измерения оптической разности хода. В этом случае максимальная ошибка определения разности составляет /43/

$$\Delta(\phi_1 - \phi_2) = (2\pi \lambda_2) / (n \lambda_{eq}) = (2\pi/n) (\lambda_2/\lambda_{eq}) . \quad (4-14)$$

Таким образом, ошибка при согласованном с величиной ОРХ квантовании меньше, сохраняется монотонность функции разности. Однако для этого необходимо использовать устройства оцифровки с переменным диапазоном входного сигнала.

Рассмотрим целочисленный метод. В этом случае фазовые значения при разных ценах полос определяются в диапазоне от 0 до 2π . На рис.4.5 показаны фазовые значения, определённые методом пошагового фазового сдвига, при квантовании на n уровней.

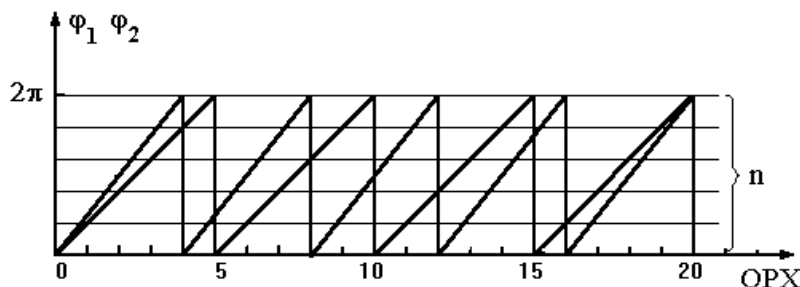


Рис.4.5. Фазовые значения при двух ценах интерференционных полос.

Для восстановления полной фазы необходимо перейти к системе остаточных функций или определить оптическую разность хода волн, соответствующую каждой волне (Рис.4.6). При этом необходимо выполнить операцию масштабирования

$$b_i = \phi_i m_i / (2\pi) , \quad (4-15)$$

где m_i - значение модуля, соответствующее выбранным ценам полос. Если величина модулей меньше или больше числа уровней квантования, при переходе к остаточным функциям возникает ошибка.

Такой ошибки не возникает, если число уровней квантования пропорционально величинам выбранных модулей. Поскольку модули различны, согласованное квантование состоит в квантовании интенсивности на число уровней, зависящее от величины цены полосы.

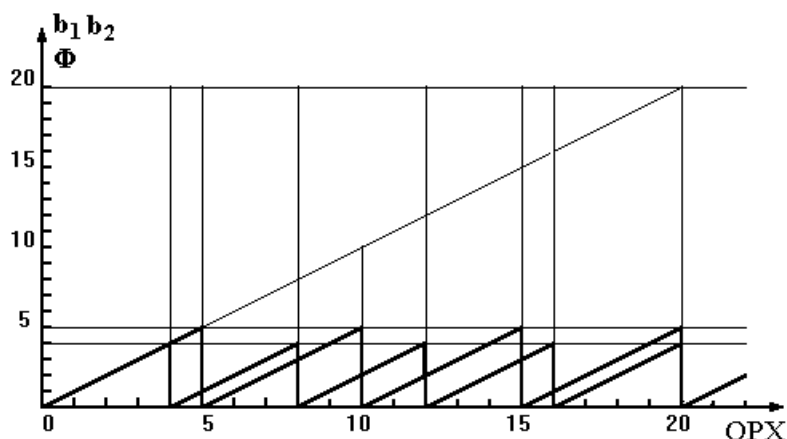


Рис.4.6. Система остаточных функций и полная фаза, определенная с помощью теоремы об остатках.

В сложившейся практике измерений обычно используется квантование фазы на одинаковые по величине уровни, независимо от цены полосы, поэтому необходимо учитывать возникающие при этом ошибки. Если при использовании двухволнового метода ошибка при определении младшего разряда приводит к пропорциональному увеличению погрешности, то целочисленный метод может дать абсолютно неправильное значение определяемого периода. Поэтому, даже если отсутствуют другие источники погрешностей, эффекты квантования приводят к ошибкам, для устранения которых необходимо использовать методы коррекции.

Методы устранения фазовой неоднозначности предполагают, что устройства регистрации обладают достаточным разрешением для обеспечения ввода интерференционных картин.

Массив детекторов, необходимый для регистрации интерферограмм, должен соответствовать определенным требованиям. По теореме Котельникова-Шеннона непрерывная информация может быть всегда безошибочно восстановлена по дискретным значениям, если спектр сигнала ограничен частотой Найквиста. Размер активной области каждой точки и шаг между точками соответствует отклику в пространственно-частотной области, который определяется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ). Если величина G определяется как отношение ширины отдельного детектора фотоприемника к расстоянию между точками

$$G = a/x_S, \quad (4-16)$$

АЧХ каждой точки будет $\text{sinc}()$ функцией с первым нулем пространственных частот $1/a$, или $1/(Gx_S)$. Наиболее традиционные датчики, используемые для ввода изображений, разработаны для улавливания максимально возможного количества освещения и имеют величину G между $1/2$ и 1 . Для разрешения высокочастотных полос, необходимо, чтобы частота отсечки превышала частоту Найквиста, т.е. G должно быть мало. Малая величина G достигается, когда точки детектора малы и широко разделены. Это похоже на разреженный массив. Таким образом, выбор геометрии фотоприемника определяет возможный динамический размер анализируемого волнового фронта.

4.4. Погрешности от неопределенности задания длины волны

При использовании целочисленного метода, основанного на решении систем сравнений, необходима как можно более точная информация о соотношении двух длин волн. В действительности же, при определении такого соотношения имеется некоторая неопределенность. Это приводит к быстрому накоплению ошибок при возрастании оптической разности хода между интерферирующими волнами. Пусть $\Delta\lambda$ - погрешность от неправильного определения длины волны λ . Тогда из выражения /43/

$$\Delta\lambda n > \lambda/N, \quad (4-17)$$

где N - число уровней квантования, можно определить n - периодов, на которых будет накоплена ошибка, превышающая один элемент разрешения. При диапазоне измерения порядка 5 см для He-Ne лазера, n равно 10^5 . В этом случае отношение $\Delta\lambda/\lambda$ должно быть $0.5 \cdot 10^{-7}$ при 256 уровнях квантования. При использовании методов стабилизации частоты можно получить относительную стабильность частоты и, следовательно, степень монохроматичности порядка 10^{-12} - 10^{-13} . Наиболее распространенные лазеры для интерференционных измерений, имеют длину когерентности 30-50 см и относительную стабильность частоты 10^{-6} - 10^{-7} /75, 59/. Такие лазеры можно применять для измерения оптической разности хода интерферирующих волновых полей с диапазоном в нескольких сантиметров, поскольку ошибка от нестабильности частоты лазера не превысит одного разряда при квантовании на 256 уровней.

4.5. Коррекция ошибок

В силу специфики предложенного метода анализ ошибок имеет свои особенности, заключающиеся в том, что целочисленная арифметика требует безошибочных начальных данных. Даже небольшие погрешности при определении фазовых значений в пределах периода приводят к неверным результатам при нахождении полной фазы.

В этом разделе описываются методы коррекции, которые позволяют преодолеть проблему неустойчивости решения. Эти методы основаны на искусственном ограничении возможного диапазона.

Рассмотрим систему сравнений с $m_1=53$ и $m_2=63$. Решение системы имеет вид (4-5). В табл.4.1 приведены все решения системы. Видно, что даже при ошибке на единицу младшего разряда при определении b_1 или b_2 , ошибка при определении полной фазы может быть весьма значительной.

Оценим величину результирующей ошибки при неправильном определении начальных значений на один шаг /39, 45/.

Соседние значения, расположенные вдоль диагоналей, возрастают на единицу. Это следует из теоремы 3, доказательство которой приведено нами в /29/.

Теорема 3.

При равенстве остатков решением системы сравнений (4-2) является класс чисел по модулю, равному произведению $m_1 m_2 \dots m_k$, с вычетом, равным остатку.

Таким образом, в массиве результатов числа меняются от 0 до $\min(m_1, m_2, \dots, m_k)$ по главной диагонали, затем последовательно возрастают по другим диагоналям.

В табл.4.1 показаны в порядке возрастания чисел первые десять диагоналей. Переход от одной диагонали к другой обозначен стрелками. Если существует некоторая погрешность в определении исходных данных, то находится заведомо неправильная величина полной фазы, поскольку соседние числа в таблице решений отличаются значительно. При одиночной ошибке (ошибке при определении единственной координаты b_s) соседние числа в таблице по этой координате отличаются на $\pm M_s N_s$. Величина отличия определяется по модулю, равному произведению $m_1 m_2 \dots m_k$.

Однако, если искусственно ограничить максимальный диапазон возможных значений, то появляется возможность коррекции результатов при ошибочном определении исходных значений. Коррекция основана на рассмотрении окрестности точки, значение полной фазы, в которой превышает выбранный диапазон. Нами показано, что если ограничить диапазон изменения результата некоторой произвольно выбранной величиной, то в окрестности каждой точки таблицы обязательно попадет точка, значение которой не превышает установленный диапазон /36, 66/. Размер этой окрестности зависит от значений модулей и необходимого диапазона.

Таким образом, если погрешность задания данных по всем координатам одинакова и равна r , то вокруг истинного результата образуется окрестность с радиусом r , в которой расположены числа, с заведомо неправильными значениями. Назовем эту область - окрестностью грубых промахов.

Рассмотрим рис.4.7. На нем показана часть таблицы решений.

На рисунке выделены диагонали, вдоль которых значения последовательно возрастают. Окрестность грубых промахов вблизи точки С заштрихована другим цветом. Числа из таблицы решений, попадающие в эту окрестность, показаны на рисунке более крупно.

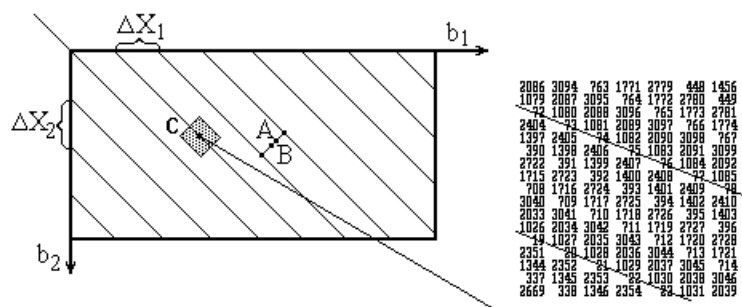


Рис.4.7. Часть таблицы решений системы сравнений с модулями $m_1=53$ и $m_2=63$.

Если погрешность при определении начальных значений не превышает половины размера окрестности ΔX_1 , ΔX_2 , то появляется возможность компенсации ошибок. Для этого находится ближайшее в таблице допустимое число. Естественно, что ошибка, связанная с погрешностью определения исходного значения, остается, но ошибка в определении результата не превышает этой погрешности.

В табл.1 и рис.4.7 отмечены диагонали, на которых находятся допустимые значения при ограничении диапазона полной фазы величиной 300. При этом ограничении, минимальное расстояние между диагоналями равно 10. Вокруг каждого числа, попадающего в диапазон, образуется окрестность размером ± 5 , состоящая из чисел, превышающих этот диапазон. Таким образом, если абсолютная ошибка при определении b_i не превышает ± 5 , то для рассматриваемого случая она может быть скомпенсирована.

Для коррекции ошибочных значений можно предложить

следующий алгоритм [128, 129]. По координатам точки (b_1, b_2, \dots, b_k) находим решение системы сравнений. Если это значение не попадает в выбранный диапазон, находим все решения последовательно в m -ом кубе с центром в начальной точке. Размер куба на каждом шаге возрастает на единицу. Этот процесс повторяет до тех пор, пока не найдем точку с координатами (x_1, x_2, \dots, x_k) , для которой решение попадает в диапазон. Очевидно, что максимальный размер куба не превысит размера окрестности грубых промахов. Видно, что для одного вычисления необходимо k - умножений и k - сложений, где k - число модулей, и одна операция взятия по модулю. Максимальное число таких операций r^k , где r - размер окрестности.

Использование алгоритмов восстановления решений системы сравнений, основанных на табличном представлении, позволяет значительно увеличить быстродействие. Рассмотрим выражение для определения системы сравнений с тремя взаимно простыми модулями

$$X \equiv M_1 N_1 b_1 + M_2 N_2 b_2 + M_3 N_3 b_3 \pmod{m_1 m_2 m_3} \quad (4-18)$$

Операцию умножения можно устранить, если хранить три массива

$$\begin{aligned} AS1[i] &= M_1 N_1 i, \quad i=0, \dots, b_1-1; \\ AS2[i] &= M_2 N_2 i, \quad i=0, \dots, b_2-1; \\ AS3[i] &= M_3 N_3 i, \quad i=0, \dots, b_3-1. \end{aligned} \quad (4-19)$$

Если взятие модуля осуществлять через вычитание, то количество операций будет существенно зависеть от числа знаков, с которым определены модули. Рассмотрим выражения для решения систем из трех сравнений со значениями модулей $(m_1=5 \ m_2=6 \ m_3=7)$, $(m_1=53$

$m_2=63$ $m_3=73$), ($m_1=531$ $m_2=631$ $m_3=731$) соответственно:

$$X \equiv 126b_1 + 175b_2 + 120b_3 \pmod{210}, \quad (4-20)$$

$$X \equiv 101178b_1 + 65773b_2 + 76797b_3 \pmod{243747}, \quad (4-21)$$

$$X \equiv 81181936b_1 + 227074185b_2 + 181603062b_3 \pmod{244929591}. \quad (4-22)$$

Для уравнения (4-20) для взятия модуля для одной точки таблицы решений в среднем необходимо 4,5 операции сравнения и столько же операций вычитания, для (4-21) - 30 операций, и для (4-22) - 648 операций сравнения и 648 операций вычитания. Значения массивов и произведения модулей хранятся не в целом виде, т.к. число знаков может превышать число возможных знаков целочисленной переменной. Поэтому время затраченное на такие операции значительно. Кроме того, число операций резко растет при увеличении числа значащих знаков при задании модулей. В этом случае время вычислений определяется в основном операциями взятия модуля.

Число этих операций можно сократить, если воспользоваться следующим свойством сравнений /6/

$$a_1 + a_2 + a_3 \pmod{m} = a_1 \pmod{m} + a_2 \pmod{m} + a_3 \pmod{m}. \quad (4-23)$$

Если массивы (4-19) хранить в следующем виде

$$\begin{aligned} AS1[i] &= M_1 N_1^i \pmod{m_1 m_2 m_3}, \quad i=0, \dots, b_1-1; \\ AS2[i] &= M_2 N_2^i \pmod{m_1 m_2 m_3}, \quad i=0, \dots, b_2-1; \\ AS3[i] &= M_3 N_3^i \pmod{m_1 m_2 m_3}, \quad i=0, \dots, b_3-1. \end{aligned} \quad (4-24)$$

то при вычислении по формуле (4-18) число сравнений и вычитаний не

превысит трех.

Если k - число модулей, то для вычисления в одной точке необходимо k -выборок из массива, k -сложений, k - быстрых операций сравнения и вычитания для взятия модуля. Эти операции необходимо провести в r^k точках окрестности, где r - размер окрестности грубых промахов. Если учесть, что обычно поле фаз имеет размер 512×512 точек, число вычислительных операций при коррекции каждой точки в таблице решений размерности k очень велико. Поэтому использование прямого перебора точек для окрестности грубых сбоев не рационально.

Нами разработано несколько быстрых алгоритмов, применение которых позволяет значительно сократить время вычислений. Первый алгоритм основан на сведении k -мерной задачи к $(k-1)$ -мерной. Анализ окрестности для двумерного случая заменяется анализом значений, расположенных на некоторой прямой (рис.4.8).

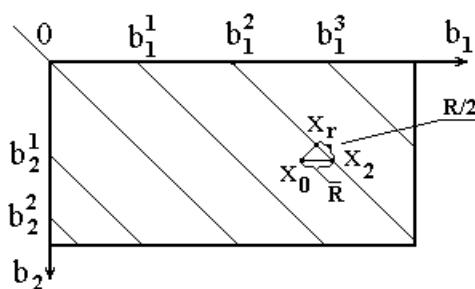


Рис.4.8. Схема быстрого алгоритма коррекции, основанного на понижении размерности области перебора.

Пусть X_0 точка с координатами (b_1, b_2) для которой решение системы сравнений не попадает в заданный диапазон. Выберем произвольную координату и с последовательно увеличивающимся шагом $1, 2, \dots$ будем анализировать точки слева и справа от X_0 .

После нахождения точки, решение системы сравнений которой

попадает в заданный диапазон (например X_2), производится уточнение. Для этого, находится координата точки X_r , которая лежит на расстоянии $R/2$ вниз, если найденное значение справа, или вверх по допустимой диагонали, если найденное значение слева от точки X_0 .

Вместо поиска значений в трехмерном кубе используется анализ в одной из выбранных плоскостей (рис.4.9). Для k -мерного случая поиск производится на $(k-1)$ -ом кубе. На рисунке - X_2 ближайшая точка, которая принадлежит допустимой диагонали.

В этом алгоритме для каждой точки необходима одна операция сложения или вычитания и одна операция взятия по модулю. Максимальное число таких операций r^{k-1} .

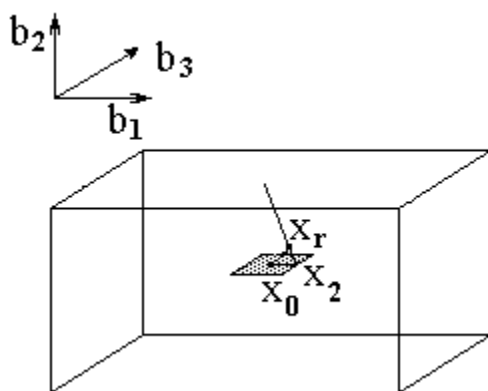


Рис.4.9. Схема быстрого алгоритма для трех модулей.

Дальнейшее сокращение операций возможно, если заметить, что все попадающие в заданный диапазон числа будут лежать на диагоналях, которые начинаются с допустимых значений в нулевой строке или нулевом столбце. На главной диагонали числа в таблице решений последовательно возрастают на единицу. Последовательно вычитая по единице из координат (b_1, b_2) , находим пересечение с нулевой строкой или столбцом. Затем определяем ближайшее допустимое значение в строке или столбце. Добавляя вычтенную

величину, получаем результирующее значение. Для восстановления всех чисел таблицы, необходимо хранить два одномерных массива размерностью m_1 и m_2 соответственно. В этих массивах значения между допустимыми точками заполняются ближайшей допустимой величиной.

Для системы сравнений, решения которых приведены в таблице 4.1, необходимо найти допустимые значения в нулевой строке и нулевом столбце. Для этого найдем все x , попадающие в диапазон, решая сравнение, которое получается из (4-14) при $b_2=0$

$$1008 b_1 \equiv x \pmod{3339} . \quad (4-25)$$

Для нахождения минимального расстояния между допустимыми диагоналями по столбцу используем следующее сравнение

$$2332b_2 \equiv x \pmod{3339} . \quad (4-26)$$

Автором получен /29, 31/ способ нахождения допустимых значений в нулевых строках и столбцах. Алгоритм, основанный на теории непрерывных дробей, приведен в Приложении Б.

Схема второго быстрого алгоритма показана на рис.4.10.

Пусть X_0 точка с координатами (b_1, b_2) для которой решение системы сравнений не попадает в заданный диапазон. Необходимо найти ближайшую к ней точку X_r , решение в которой заведомо попадает в этот диапазон. Для этого необходимо:

- 1) Найти X_1 - точку пересечения с осью $0 b_1$ или с осью $0 b_2$, в зависимости от соотношения между координатами. Если больше первая координата, то координаты точки X_0 $(b_1-b_2, 0)$, в

противоположном случае $(0, b_2 - b_1)$.

- 2) Найти координаты ближайшего к X_0 допустимого (входящего в допустимый диапазон) значения b_j^i . Для этого, в компьютере хранятся массивы координат допустимых значений для каждого из модулей, отсортированные в порядке возрастания. Нахождение координат заключается в выборке этих координат из массива.
- 3) Найти координаты допустимого значения X_r . Для этого находится точка X_2 , решение в которой удовлетворяет ограничению, поскольку она лежит на допустимой диагонали. Затем для нахождения более точного значения добавляется или вычитается $R/2$ в зависимости от того, где расположена ближайшая допустимая диагональ слева или справа от X_0 , где R - расстояние между X_1 и координатой допустимой точки b_j^i .

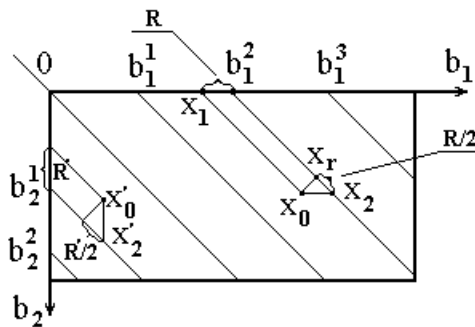


Рис.4.10. Схема быстрого алгоритма, основанного на использовании массивов допустимых значений в нулевой строке и столбце.

Этот алгоритм позволяет достичь очень высокого быстродействия. В нем не используется операция взятия по модулю. Единственными операциями являются операции вычитания, сложения, сравнения для сортировки остатков по возрастанию и выборки из одномерных

массивов допустимых значений. Для каждой точки необходимо k - вычитаний, k - операций сравнений для определения минимального значения координаты точки, одна операция выборки из массива и k - сложений для нахождения результирующего значения.

Однако существует возможность достижения еще большего быстродействия.

Если непрерывно соединить продолжения диагоналей при последовательном возрастании чисел можно заметить, что при склейке верхней и нижней горизонтальных строк и левого и правого столбца образуется тор (рис.4.11).

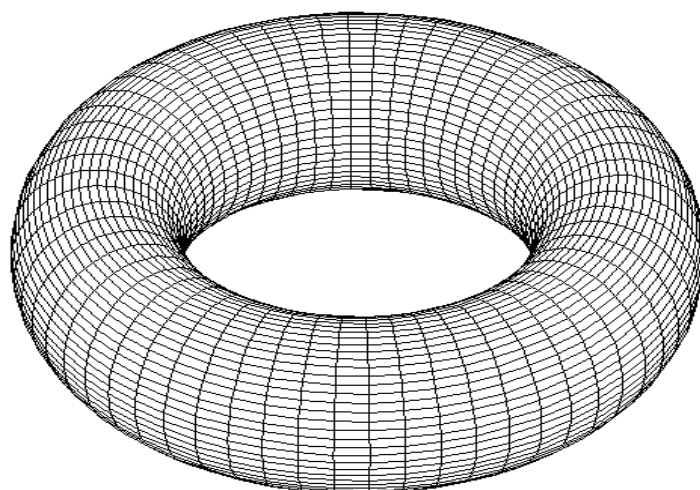


Рис.4.11. Тор, образующийся в результате склейки таблицы решений.

Числа расположены на пересечении меридианов и параллелей, показанных на рисунке. Видно, что числа последовательно возрастают по спирали, нанесенной на поверхность тора (рис.4.12).

Спираль покрывает всю поверхность тора. Если ограничить число ее витков, то соседние витки будут находиться на некотором расстоянии друг от друга. На рис.4.12 показано расположение допустимых значений на поверхности тора. Если некоторая точка на поверхности тора не принадлежит спирали то, вероятно, что

правильное значение находится на ближайшем к ней витке. В этом случае задача сводится к одномерной. Это следует из следующих соображений.

Разрежем тор вдоль одного из своих меридианов. Тогда он превращается в круговой цилиндр с двумя краевыми окружностями. Закрепим неподвижно одну окружность и станем закручивать цилиндр вокруг себя так, чтобы вторая окружность сделала k -оборотов. Всякая прямолинейная образующая цилиндра при этом обратится в винтовую линию, обходящую ось цилиндра k -раз. Если снова склеить оба края, то получим топологическое отображение тора на самого себя. При таком отображении тора, параллели тора превратились в винтообразные кривые и наоборот (Д.Гильберт/10/). Таким образом, задачу поиска ближайшего подходящего значения на допустимых диагоналях можно заменить задачей нахождения ближайшего значения на линиях перпендикулярных сторонам таблицы решений.

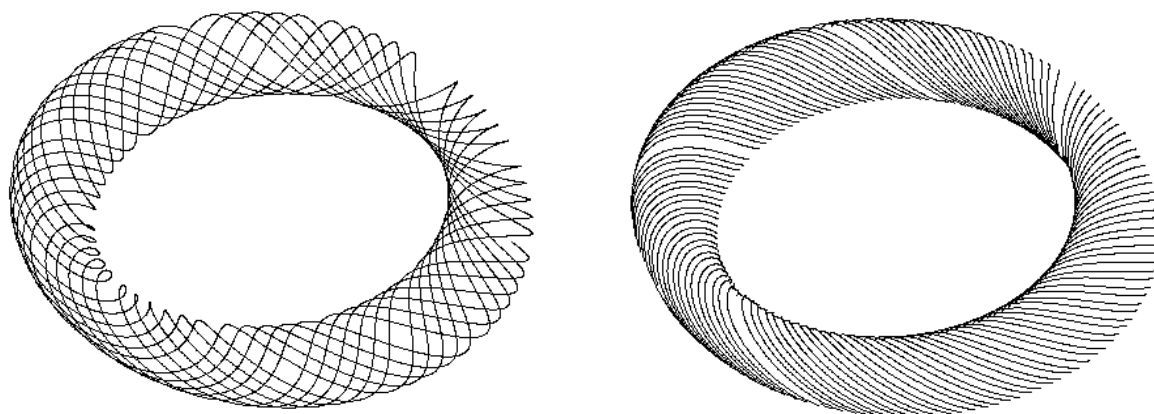


Рис.4.12. Расположение чисел на первых 10 допустимых диагоналях в таблице решений (таб.4.1).

В этом случае задача определения ближайшего допустимого

значения сводится к одномерной. Алгоритм состоит из двух частей. Находим пересечение спирали, проходящей через точку (b_1, b_2, \dots, b_k) , с образующей окружностью тора при $b_2=0, \dots, b_k=0$. Определяем ближайшее допустимое значение на этой окружности. Затем, добавляя число пройденных целых витков и часть неполного витка, определяем допустимое значение в точке.

Схема третьего быстрого алгоритма для системы двух сравнений показана на рис.4.13.

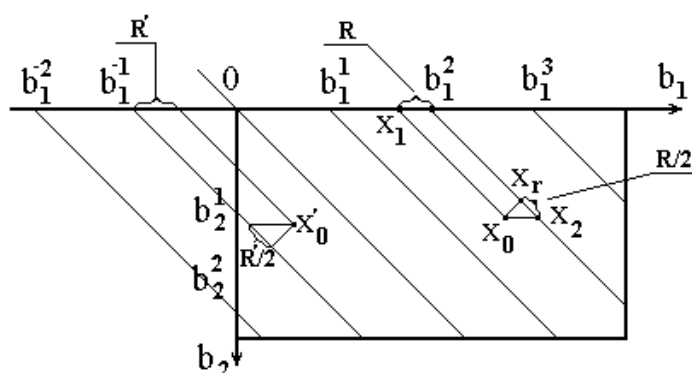


Рис.4.13. Схема быстрого алгоритма нахождения системы сравнений сведением к одномерной задаче для двух модулей.

Алгоритм состоит из следующих шагов.

-Для координаты (b_1, b_2) находится индекс $i=b_1-b_2$. Это значение может быть и отрицательным.

-Производится выборка из массива допустимых значений.

-Для нахождения действительного значения к найденному допустимому значению добавляется b_2 .

-Производится уточнение.

В этом алгоритме отсутствует операция сравнения для определения источника выборки. Вместо выборки из нулевой строки или из нулевого столбца производится выборка из одного одномерного массива. Для этого используется продолжение массива допустимых

значений в нулевой строке на отрицательные значения индексов. Если используется два модуля m_1 и m_2 , то общий размер одномерного массива допустимых значений $m_1 + m_2$.

Рассмотрим трехмерный случай. Числа в массиве решений располагаются на поверхности тора. Поэтому, если диагональ в каком-либо сечении упрется в левый край, то в следующем сечении она продолжится с крайней правой позиции. Если диагональ дойдет до верхней плоскости, она продолжится на нижней. Это похоже на обороты спирали на поверхности тора для двумерного случая.

Рассмотрим рисунок 4.14, на котором показаны решения для набора из трех модулей $m_1=3, m_2=4, m_3=5$.

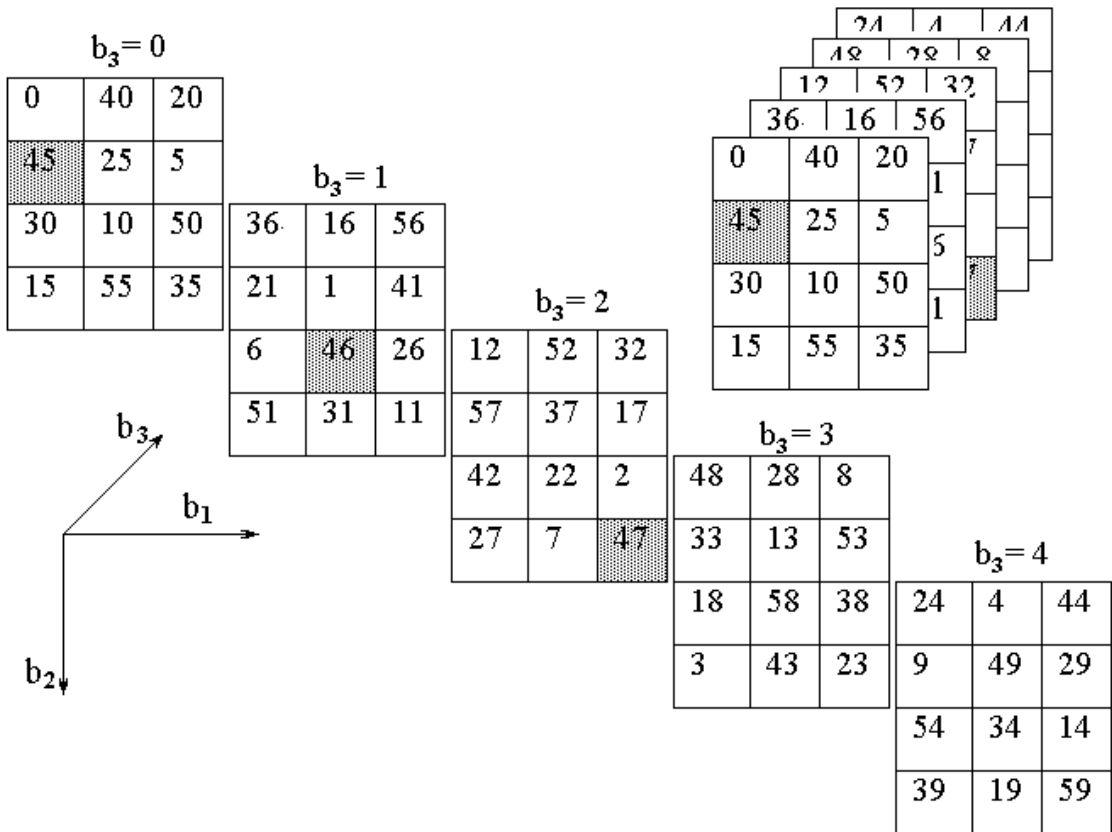


Рис.4.14. Решения для набора модулей $m_1=3, m_2=4, m_3=5$.

При этом наборе модулей решение может быть записано в следующем виде

$$X \equiv 40 b_1 + 45 b_2 + 36 b_3 \pmod{60} . \quad (4-27)$$

На рисунке выделены значения, расположенные на одной из диагоналей, которая начинается в точке $b_1=2$, $b_2=3$, $b_3=2$ со значения 47. Видно, что диагонали могут заканчиваться не обязательно на гранях, но и в любой другой точке плоскости. Выбранная диагональ заканчивается на плоскости $b_3=0$ в точке $b_1=0$, $b_2=1$ со значением 45. Можно заметить, что поскольку диагональ располагается на поверхности тора, продолжение ее находится в плоскости $b_3=4$ в точке $b_1=2$, $b_2=0$ со значением 44.

Рассмотрим другую диагональ, которая заканчивается в точке $b_1=1$, $b_2=2$, $b_3=0$ со значением 10. Ее продолжение на плоскости $b_3=4$ в точке $b_1=0$, $b_2=1$. Далее в плоскости $b_3=3$ в точке $b_1=2$, $b_2=0$.

Таким образом, если каким-либо образом, определить значения в m_3 строках при $b_2=0$, то после выборки из соответствующего массива, исходное значение определяется простым сложением с начальной координатой b_2 .

Номер массива i определяется как $b_3 - b_2 \pmod{m_3}$. Индекс j элемента внутри массива равен $b_1 - b_2 \pmod{m_1}$.

Для сведения задачи к одномерной рассмотрим рис.4.15. На рисунке показано сечение таблицы решений при $b_2=0$.

Видно, что числа, расположенные по отмеченным диагоналям (снизу-вверх, слева-направо) отличаются на величину, определяемую разностью коэффициентов в выражении для решений системы сравнений. Для рассматриваемого случая решение системы

определяется выражением (4-27). Коэффициент при $b_3 - M_3N_3=36$, при $b_1 - M_1N_1=40$. Разность коэффициентов $s=(M_1N_1-M_3N_3)=4$.

-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
20	0	40	20	0	40	20	0	40	20	0
				36	16	56				
				12	52	32				
				48	28	8				
				24	4	44				

i →

j ↓

Рис.4.15. Расположение чисел в таблице решений при $b_2=0$.

Для восстановления всех значений в этом сечении достаточно хранить только один массив AX размером m_1 , в котором записаны решения системы при $b_3=0$, $b_2=0$. Координата начального значения в этом массиве определяется как $j_1=i+j \bmod(m_1)$.

Для нахождения значения в строке $b_3=i$ производится выборка элемента j_1 из начального массива и вычитается из него величина $i*s$. Для устранения операции умножения хранится массив AS размером m_3 со значениями $0, 1s, 2s, \dots (m_3-1)s$.

Таким образом, для определения значения некоторого элемента в таблице решений для трех взаимно простых модулей в точке с координатами b_1, b_2, b_3 необходимо:

1. определить $i=b_3-b_2 \bmod(m_3)$;
2. определить $j=b_1-b_2 \bmod(m_1)$;
3. определить $j_1=i+j \bmod(m_1)$;
4. искомое значение элемента равно $X=AX[j_1]+AS[i]+b_2$.

В пунктах 1,2,3 требуется производить операции вычитания, сложения и нахождения модуля. Операция нахождения модуля в этом

случае состоит из нескольких простых операций, которые эффективно выполняются с помощью базовых команд любого компьютера.

Для распространения на многомерный случай более удобна модификация алгоритма, при которой рассматриваются числа, расположенные на диагоналях, проходящих снизу-вверх, справа-налево (рис.4.15):

1. определить $i = b_2 - b_3 \bmod(m_2)$;
2. определить $j = b_1 - b_3 \bmod(m_1)$;
3. определить $j_1 = i - j \bmod(m_1)$;
4. $X = AX[j_1] + ASP[i] + b_3 \bmod(m_1 m_2 m_3)$.

Массив ASP размером m_2 со значениями i -го элемента $i \bmod(m_1 m_2 m_3)$, где $i = 0, 1, \dots, m_2 - 1$. В этом случае в 4-ом пункте добавляется операция взятия по модулю. Однако эта операция сводится всего лишь к одной операции сравнения и, может быть, к одной операции вычитания.

Многомерный алгоритм.

1. $v_{1,1} = b_1 - b_k \bmod(m_1)$; $v_{2,1} = b_2 - b_k \bmod(m_2)$; ...; $v_{k-1,1} = b_{k-1} - b_k \bmod(m_{k-1})$;
2. $v_{1,2} = v_{1,1} - v_{k-1,1} \bmod(m_1)$; $v_{2,2} = v_{2,1} - v_{k-1,1} \bmod(m_2)$; ...; $v_{k-2,2} = v_{k-2,1} - v_{k-1,1} \bmod(m_{k-2})$;
 $s = s + (M_1 N_1 + M_2 N_2 + \dots + M_{k-1} N_{k-1}) v_{k-1,1} \bmod(m_1 m_2 \dots m_k)$;
3. $v_{1,3} = v_{1,2} - v_{k-2,2} \bmod(m_1)$; $v_{2,3} = v_{2,2} - v_{k-2,2} \bmod(m_2)$; ...; $v_{k-3,3} = v_{k-3,2} - v_{k-2,2} \bmod(m_{k-3})$;
 $s = s + (M_1 N_1 + M_2 N_2 + \dots + M_{k-2} N_{k-2}) v_{k-2,2} \bmod(m_1 m_2 \dots m_k)$;
- ...
- k-1. $v_{1,k-1} = v_{1,k-2} - v_{2,k-2} \bmod(m_1)$;
 $s = s + (M_1 N_1 + M_2 N_2) v_{2,k-2} \bmod(m_1 m_2 \dots m_k)$;
- k. $X = AX[v_{1,k-1}] + s + b_k \bmod(m_1 m_2 \dots m_k)$.

Реализация многомерного алгоритма на языке C++ показана в листингах 1 и 2.

```
// Восстановление фазы табличным методом
// b[]-массив значений b1,b2,...
// N - число сравнений
double RegTable(double *b)
{ double a, s=0;
  for(int i=N-1; i>0; i--)
  { a=b[i];
    for(int j=0; j<i; j++) b[j]=Mod(b[j]-a, Modules[j]);
    if(i<N-1) s= s+ASP[i-1][a];
  }
  return Mod(B1[b[0]]+s+b[N-1], Modules[N]);
}
```

Листинг 1.

массив $K[i] = M_i N_i$, $i=0, \dots, N-1$;

массив $Modules[i] = m_i$ при $i=0, \dots, N-1$ и $Modules[N]=m_1 m_2 \dots m_{N-1}$;

функция $Mod()$ - определение модуля числа последовательным вычитанием.

```
// Определение двухмерного массива
// ASP[i][j],  $i=0, \dots, N-2$ ,  $j=0, \dots, m_i-1$ 
double dX=K[0];
for(i=0; i<N-2; i++)
{ dX+=K[i+1];
  for(int j=0; j<Modules[N-1]; j++)
    ASP[i][j]=fmod(dX*j, Modules[N]);
}
```

Листинг 2.

В предложенном алгоритме вместо r^k точек окрестности необходимо проводить анализ одной точки. Это позволяет на несколько порядков увеличить быстродействие при решении систем сравнений.

4.6. Устранение относительного постоянного сдвига исходных фазовых полей.

При получении исходных фазовых полей, каждое из них может иметь произвольный постоянный фазовый сдвиг. Рассмотрим, как этот постоянный сдвиг влияет на качество восстановления полной фазы.

На рис.4.16 показаны результаты восстановления полных значений по двум остаткам.

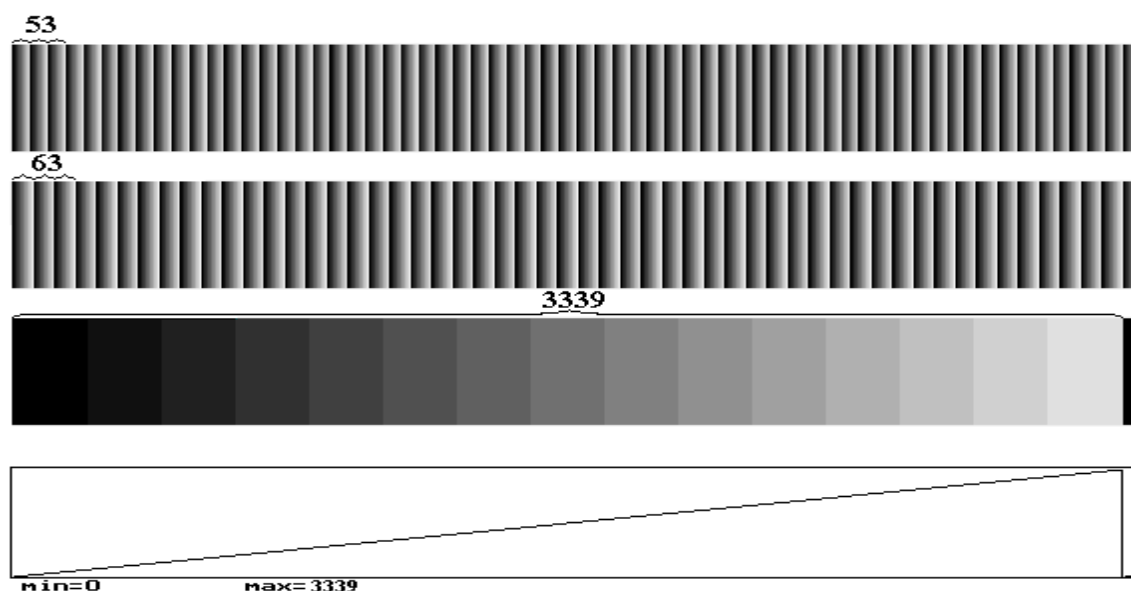


Рис.4.16. Восстановление полной фазы по системе сравнений с модулями 53 и 63.

На графиках представлены все возможные комбинации остатков по модулям $m_1=53$ и $m_2=63$ и приведены решения системы сравнений для каждого из этих сочетаний. Результирующие значения последовательно возрастают в диапазоне 0 до 3339. Затем сочетания остатков и решения системы периодически повторяются.

Если ограничить возможный диапазон, все решения разобьются на ряд подгрупп. Подгруппу составят решения с остатками

равноудаленными от допустимых диагоналей. Число подгрупп определяется размером окрестности грубых промахов и общим числом сравнений. Максимальная величина отклонения в группе не превысит половины окрестности. При произвольном постоянном сдвиге одной системы остатков относительно другой картина будет циклически повторяться. Поэтому достаточно изучить ошибки при восстановлении полной фазы в каждой из этих подгрупп.

На рис.4.17 показаны результаты восстановления полной фазы при ограничении диапазона величиной 315 по тем же остаткам, что и на предыдущем рисунке. Цифры над графиком показывают отклонение остатков в этой подгруппе от ближайшей допустимой диагонали. Часть решений при отклонении равном 5 не определено. Это связано с тем, что расстояния до двух возможных диагоналей одинаковы.

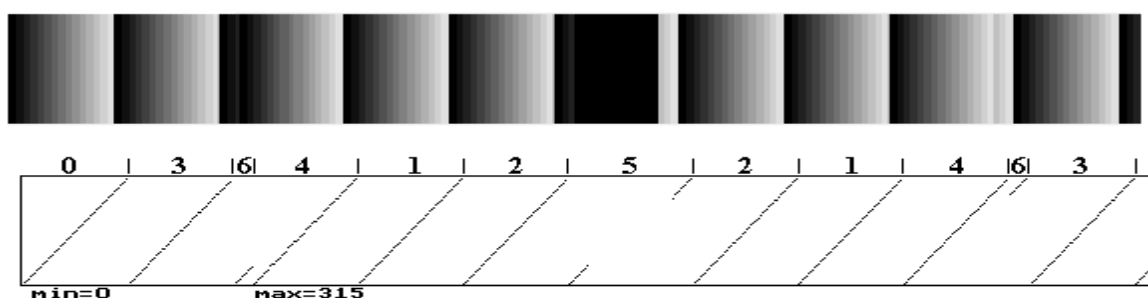


Рис.4.17. Восстановление при ограничении диапазона с коррекцией ошибок.

В случае реального эксперимента фазовые значения квантуются на определенное число уровней (раздел 4.3). Ошибки квантования приводят к неправильному определению результирующих значений. Полная фаза не может быть определена без коррекции. На рис.4.18 показаны результаты восстановления при 256 уровнях (8 двоичных разрядов) без использования алгоритмов коррекции. При

использовании коррекции результаты получаются аналогичными данным на рис.4.17. В этом случае не происходит дополнительных потерь.

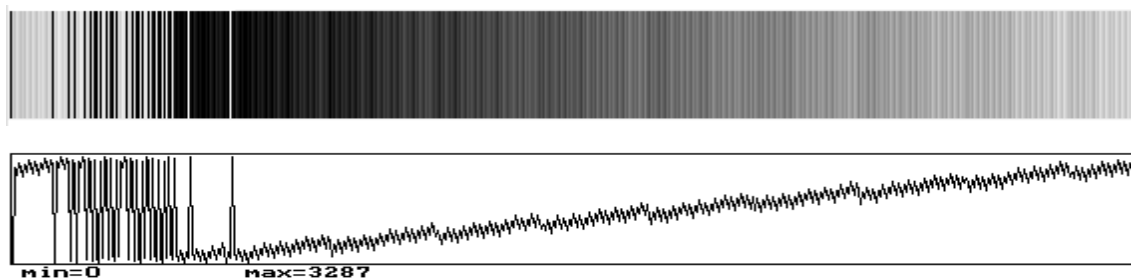


Рис.4.18. Определение полной фазы без коррекции при квантовании на 256 уровней.

Однако квантование на 32 уровня приводит к дальнейшему повышению требований к качеству исходных данных. Если ошибка в определении исходных данных больше чем ± 4 , результат восстанавливается неверно (рис.4.19). Таким образом, постоянный сдвиг одного набора остатков относительно другого может привести к дополнительным ошибкам при коррекции восстановленных значений.

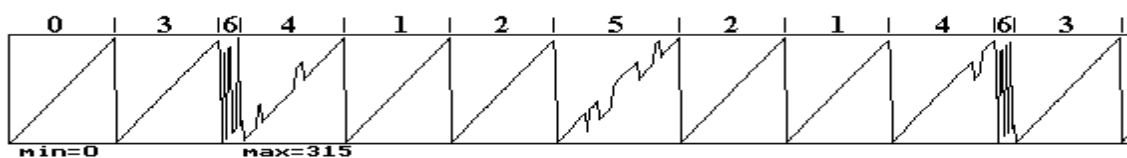


Рис.4.19. Восстановление полной фазы с использованием коррекции при квантовании на 32 уровня.

Для компенсации постоянного фазового сдвига достаточно рассмотреть некоторое конечное число относительных сдвигов в пределах половины окрестности грубых промахов. Эти значения определяются как сдвиги, взятые по модулю равному половине

окрестности грубых промахов. Для приведенного примера, возможные относительные сдвиги - 0,1,2,3,4,5,6. Возможные комбинации сдвигов (0,1), (1,0), (0,2), (2,0), (0,3), (3,0), ..., (0,6), (6,0).

Для каждой комбинации относительных сдвигов ищется среднее по полю отклонение от допустимых диагоналей. Затем выбирается комбинация, для которой эта величина минимальна.

Необходимость коррекции ошибочных результатов приводит к уменьшению максимально возможного диапазона. В следующем разделе рассмотрены некоторые конкретные примеры восстановления полной фазы при использовании различных модулей.

4.7. Компьютерное моделирование целочисленного алгоритма восстановления полной фазы

Целью моделирования являлось определение возможного диапазона при восстановлении полной фазы при различных значениях модулей. Для этого синтезировались эталонные фазовые фронты (клин, сфера) с заданным максимальным размахом. Затем вычислялись остатки от деления фазовых значений в каждой точке поля на ряд взаимно простых модулей. Остатки масштабировались от 0 до 255. Полученные массивы чисел, являлись исходными для восстановления по ним полной фазы. Они соответствуют реальным фазовым распределениям, определенным с точностью до периода, при ценах полос, соответствующих заданным значениям.

На рис.4.21 показан процесс восстановления волнового фронта, имеющего форму клина по двум полям фаз с ценами полос, соответствующими модулям 53 и 63.

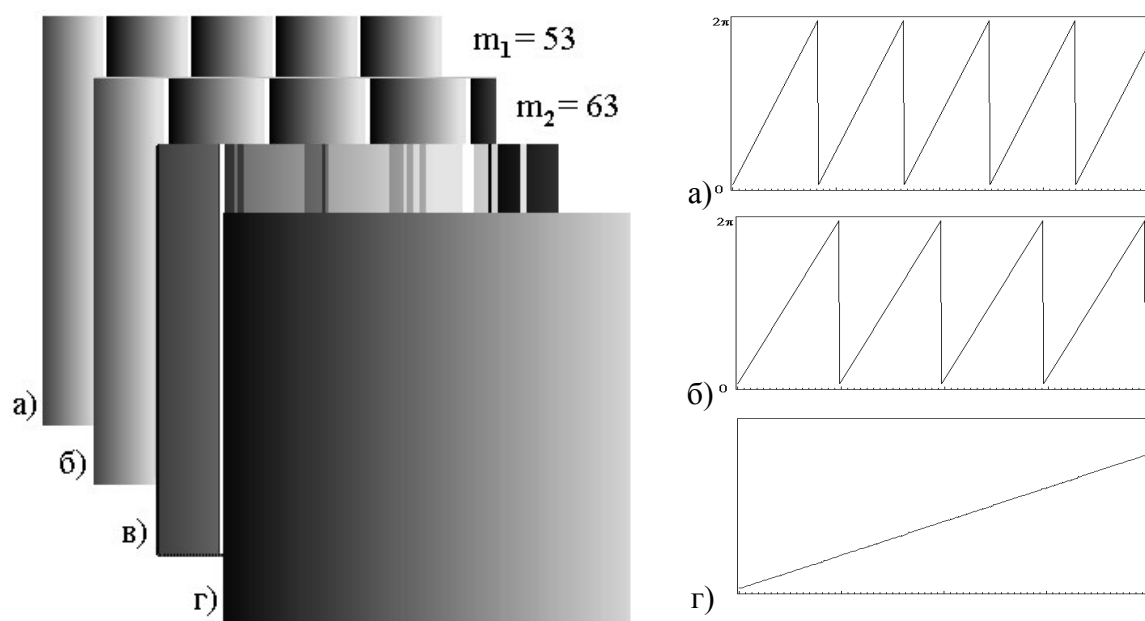


Рис.4.21. Восстановление полной фазы по двум полям фаз, измеренным с точностью до периода.

На рисунке слева показаны фазовые поля, справа - графики по строке.
 а) - исходное фазовое поле, определенное по модулю 53; б) - поле фаз по модулю 63; в) - поле фаз, восстановленное без коррекции ошибок; г) - полная фаза, восстановленная целочисленным методом с коррекцией.

Восстановление без коррекции невозможно из-за эффектов квантования. Поэтому максимальный размах числовых значений составил 314 (пять периодов по 63). В этом случае диапазон окрестности грубых промахов - 10. При увеличении диапазона более 5 периодов размер окрестности грубых промахов сокращается до трех.

Для увеличения диапазона измерений необходимо использовать еще одно дополнительное измерение (рис.4.22).

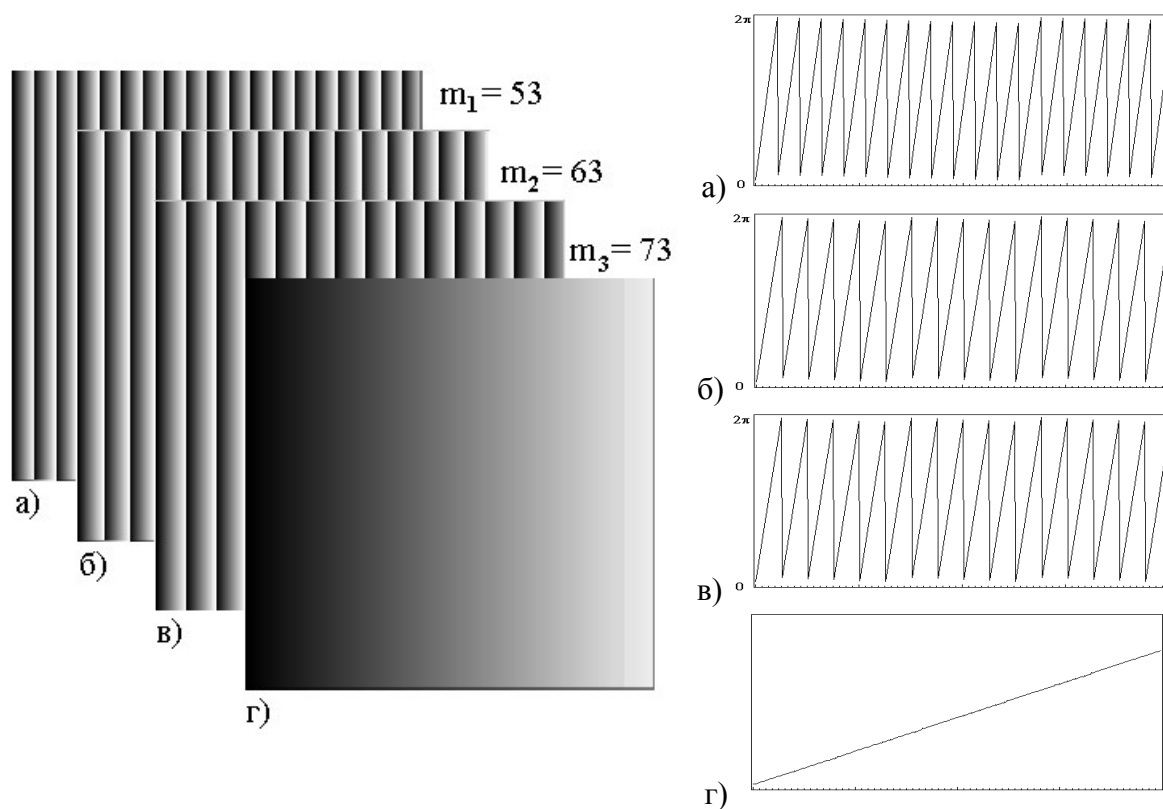


Рис.4.22. Восстановление полной фазы по трем полям фаз, измеренным с точностью до периода.

На рис.4.22 а), б), в) - исходные фазовые поля, определенные по модулям $m_1=53$, $m_2=63$, $m_3=73$; г) - восстановленное поле полных фаз.

При $m_1=53$, $m_2=63$, $m_3=73$ решение системы сравнений определяется следующим выражением:

$$X \equiv 101178 b_1 + 65773 b_2 + 76797 b_3 \pmod{243747}. \quad (4-28)$$

При диапазоне изменения полной фазы 20 периодов (размах числовых значений - 1000), диапазон окрестности грубых сбоев - 53.

При данных значениях модулей максимальный диапазон изменения волнового фронта может составлять до 250 периодов. Диапазон изменения фазы в 250 периодов соответствует 0.1 мм при длине волны источника освещения порядка 0.5 мкм. В этом случае размер окрестности грубых сбоев равен 11, и восстановление возможно. При диапазоне в 260 периодов минимальный размер окрестности равен трем и использование алгоритма приводит к ошибочным значениям.

На рис.4.23 показано устранение фазовой неоднозначности волнового фронта, имеющего форму клина, на рис.4.24 - сферы с диапазоном изменения полной фазы 200 периодов (размах числовых значений - 10000). На рис.4.25 - трехмерный график восстановленного поля фаз, имеющего форму сферы.

В отличие от существующих методов, предложенный способ позволяет восстанавливать волновые поля с большими перепадами в соседних точках. На рис.4.26 показан фазовый фронт с отличиями в соседних точках, сравнимыми с длиной волны. Для моделирования фронта использовались равномерно распределенные случайные числа. Перепад в соседних точках составляет 100, при общем диапазоне изменения поля полных фаз 1000. Это соответствует волновым полям,

образующимся при отражении от объектов с диффузной поверхностью.

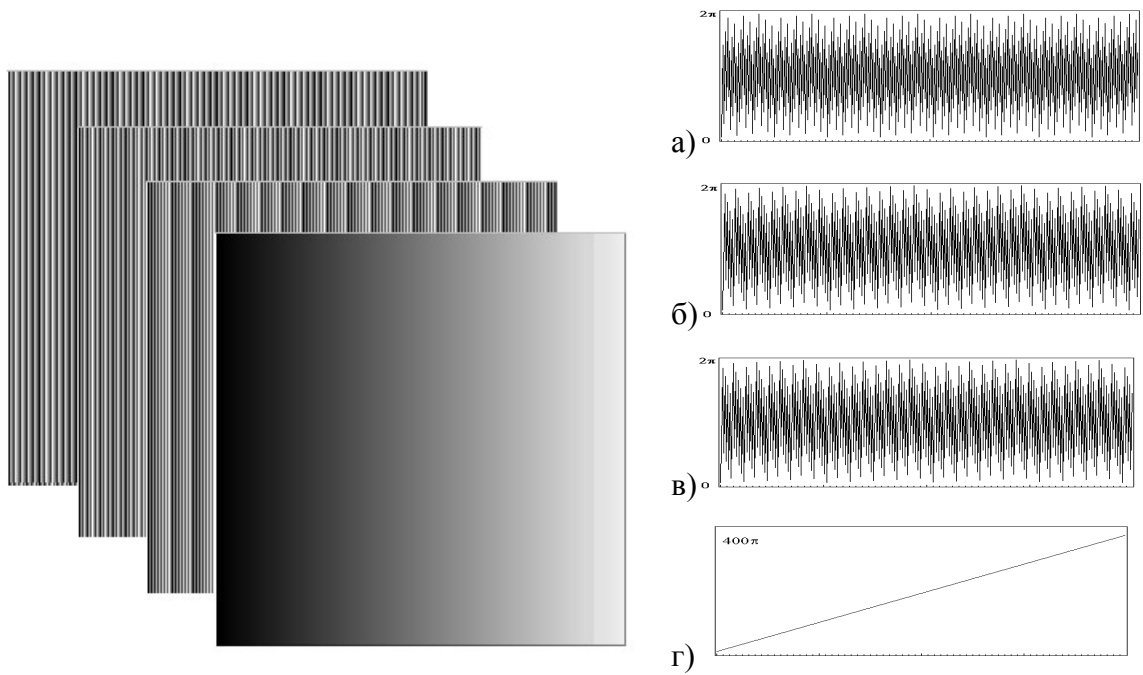


Рис.4.23. Восстановление полной фазы волнового фронта, имеющего форму клина с диапазоном 200 периодов.

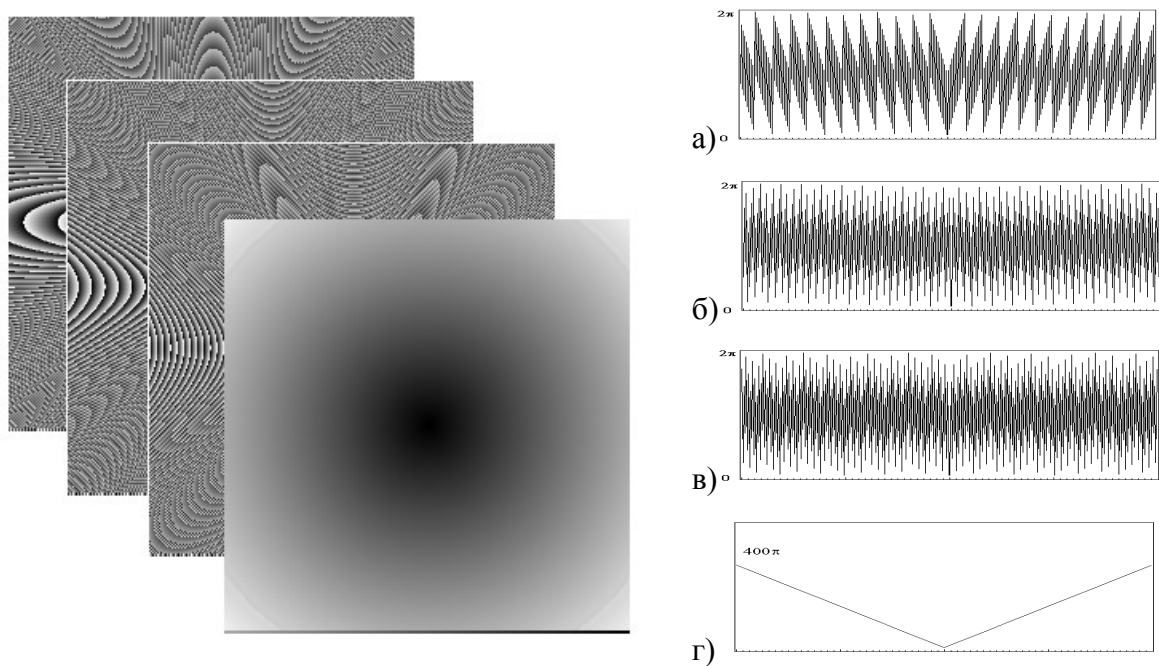


Рис.4.24. Восстановление полной фазы волнового фронта, имеющего форму сферы с диапазоном 200 периодов.

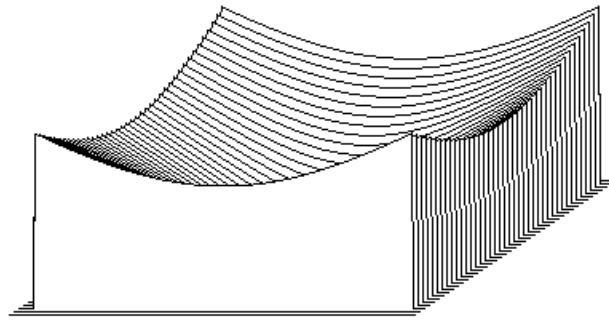


Рис.4.25. Трехмерный график восстановленного сферического поля фаз.

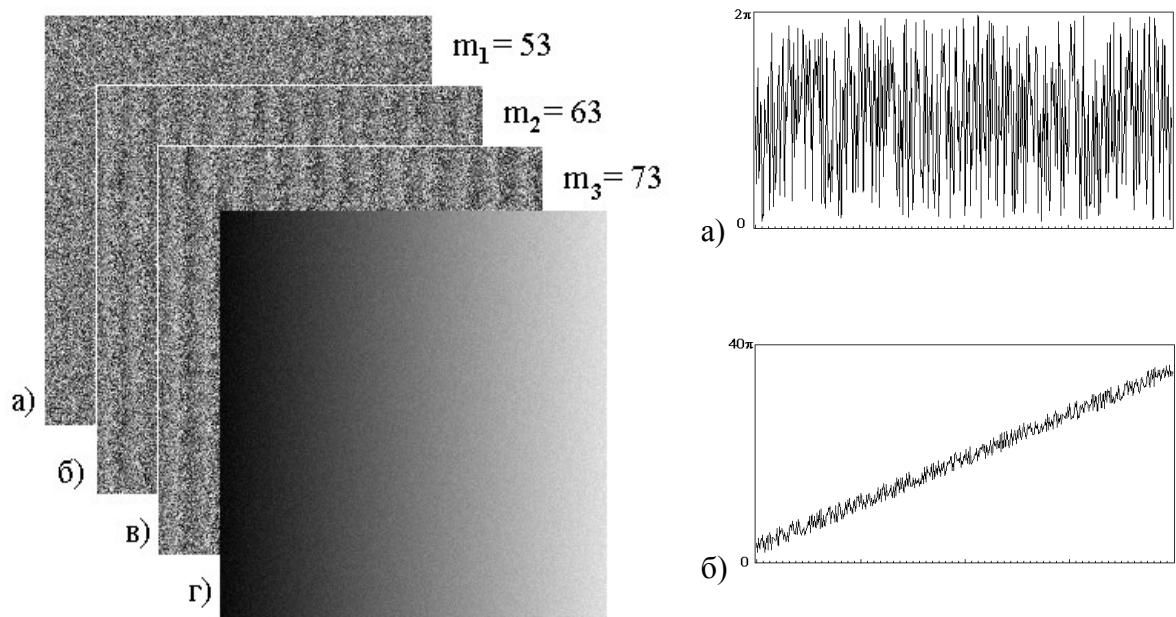


Рис.4.26. Восстановление полной фазы по трем полям фаз с диапазоном 20 периодов и с перепадами в соседних точках, сравнимыми с длиной волны.

В правой части рис.4.26 графики сечений по центральной строке фазового поля: а) - сечение фазового поля; б) - сечение поля восстановленной полной фазы.

На рисунке 4.27- трехмерный график фазового поля после

устранения 2π неоднозначности.

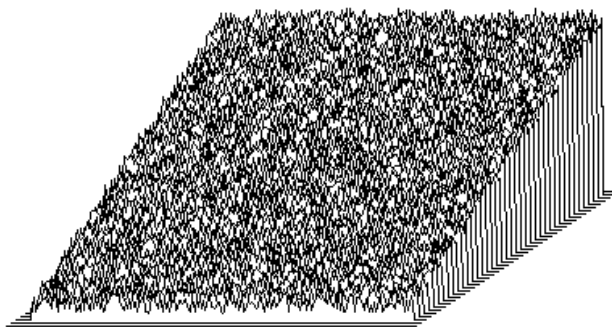


Рис.4.27. Трехмерный график восстановленного поля полной фазы.

Максимальный диапазон, при котором удается устранить фазовую неоднозначность, определяется абсолютной величиной используемых модулей и числом исходных измерений.

Необходимость в коррекции ошибочных исходных данных приводит к снижению максимального диапазона. Размер окрестности должен соответствовать погрешности при измерении исходных данных (чем больше погрешность, тем больше должен быть размер окрестности).

Например, для $m_1=53$, $m_2=63$ и окрестности с размером $r=10$ возможна ошибка при определении исходных значений ± 5 . Это соответствует допустимой относительной ошибке при измерении оптической разности хода в пределах длины волны $\sim 7\%$. В этом случае диапазон - 5 периодов (вместо возможных 53).

При $m_1=531$, $m_2=631$ и $r=30$ допустимая ошибка в определении исходных данных $\sim 2.3\%$, диапазон - около 19 периодов. При тех же модулях и $r=7$ возможная ошибка $\sim 0.5\%$, диапазон - около 80 периодов.

Для трех модулей: $m_1=53$, $m_2=63$, $m_3=73$ при размере окрестности - 10, допустимая ошибка $\sim 6.8\%$, а диапазон - 250 периодов.

При $m_1=531$, $m_2=631$, $m_3=731$ допустимая ошибка $\sim 4\%$, а диапазон - 2600 периодов. При цене полосы 0.5 мкм максимальный диапазон оптического хода волн, который может быть измерен в этом случае, составит более 1.3 мм. При этом погрешность измерений не должна превышать $\lambda/25$.

Чем точнее известны значения модулей, тем в большем диапазоне можно восстановить фазу. Поскольку длина волны когерентного излучения может задаваться с достаточной точностью, методы основанные на использовании источника освещения с переменной длиной волны, являются предпочтительными для задания необходимой цены полосы.

4.8. Определение полной фазы при изменении угла между интерферирующими пучками

Для экспериментальной проверки алгоритма использовалась оптическая схема, представляющая собой интерферометр Тваймана-Грина (Рис.4.28). В опорном плече интерферометра находилось зеркало, закрепленное на пьезокерамике, для задания управляемого фазового сдвига между интерферирующими пучками. Плоское зеркало в другом плече использовалось для изменения угла между интерферирующими пучками. Один из концов зеркала закреплен на шарнире, на другой подавалось воздействие с помощью управляемой от компьютера пьезокерамики. Механическая конструкция закрепления зеркала обеспечивала хорошую повторяемость изменения угла.

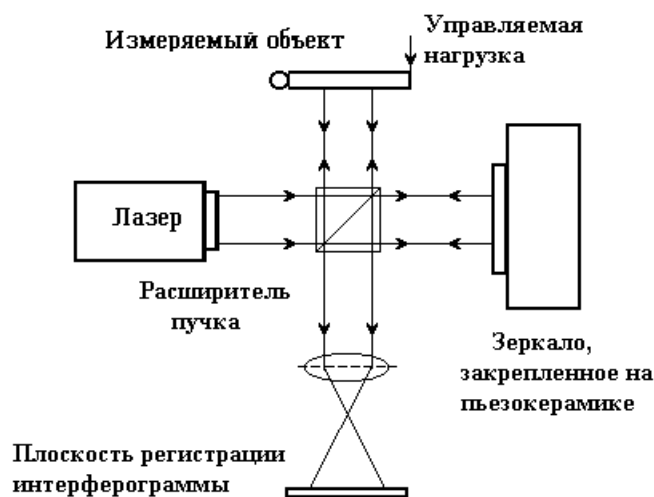


Рис.4.28. Интерферометр Тваймана-Грина с изменяемым углом между интерферирующими пучками.

На рисунке 4.29 показаны серии интерферограмм с фазовыми сдвигами 0 , $\pi/2$, π , $3\pi/2$ и восстановленное по ним поле фаз.

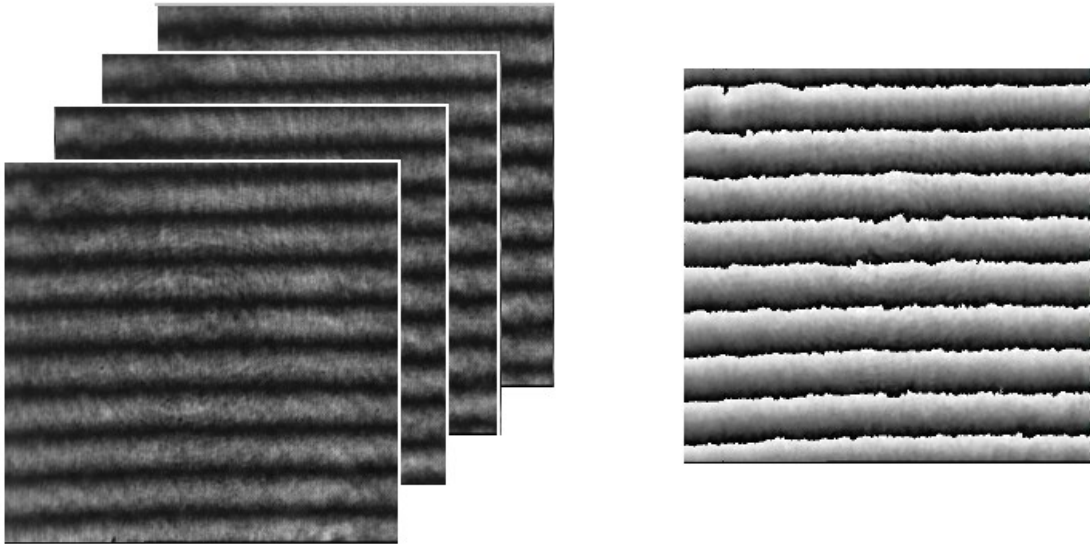


Рис.4.29. Серия интерферограмм и найденное по ним поле фаз.

На рисунке 4.30 показана другая серия измерений при измененном угле между интерферирующими пучками.

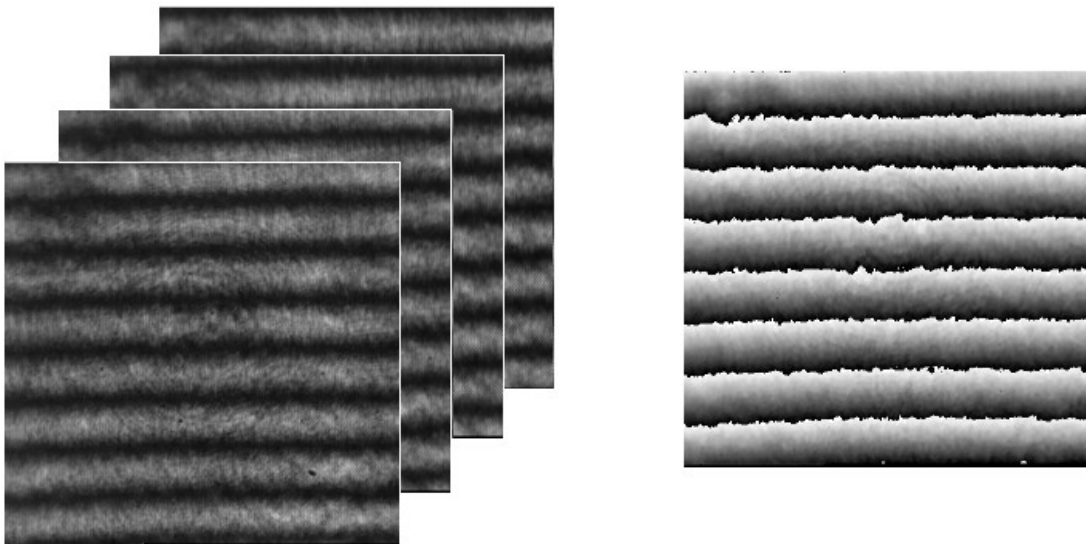


Рис.4.30. Серия интерферограмм и найденное по ним поле фаз при измененном угле между интерферирующими пучками.

Для определения поля фаз использовался алгоритм с коррекцией линейных ошибок задания фазового сдвига с усреднением углов, описанный в Главе 2.

Поля фаз, показанные на рис 4.29 и на рис.4.30, определены по модулю 2π . Для восстановления полной фазы использовался целочисленный алгоритм. Находился средний размер полос для каждой серии измерений, и ему ставилось в соответствие значение модуля, используемого для расшифровки. Для приведенных серий интерферограмм взаимно простые значения модулей составили $m_1=547$ и $m_2=630$. Решение системы сравнений

$$X \equiv 91350 b_1 + 253261 b_2 \pmod{344610}. \quad (4-19)$$

При задании диапазона изменения полной фазы в 15 периодов, диапазон окрестности грубых сбоев - 15. Это значит, что допускается ошибка в определении исходных фазовых значений ± 7 .

Восстановленное поля полной фазы показано на рис.4.31.

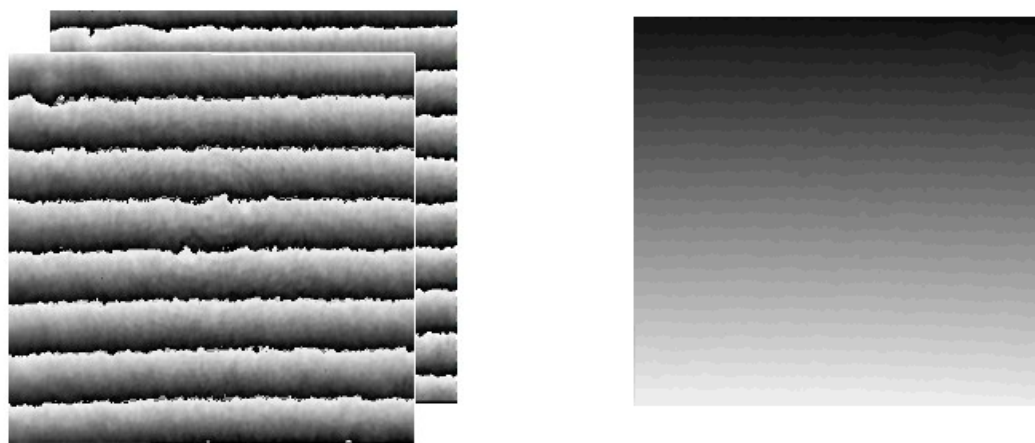


Рис.4.31. Восстановление полной фазы с помощью целочисленного алгоритма.

При восстановлении полной фазы использовались быстрые алгоритмы коррекции.

На рис.4.32 показаны графики сечений по центральному столбцу исходных фаз и поля полной фазы.

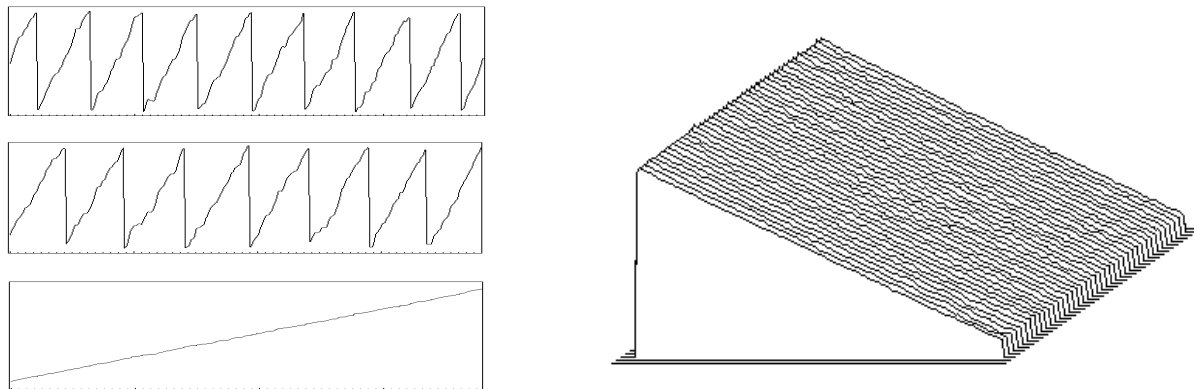


Рис.4.32. Графики сечений по центральному столбцу исходных фаз и восстановленного поля полной фазы. Справа трехмерный график полного поля фаз.

4.9. Выводы

Увеличение диапазона интерференционных измерений существенно расширяет область применения интерференционных измерительных систем.

Применяемые в настоящее время алгоритмы увеличения области фазовой однозначности построены на анализе пространственной структуры поля разностей фаз. При использовании этих алгоритмов накладываются существенные ограничения на вид исследуемых волновых фронтов.

Предложенный нами целочисленный метод значительно расширяет область фазовой однозначности. При этом увеличение динамического диапазона не приводит к уменьшению точности.

Метод не налагает дополнительных ограничений на вид фазового поля и может использоваться при анализе волновых фронтов, значительно отличающихся от опорных. Становится возможным применение интерференционных методик для анализа волновых фронтов, отраженных от объектов с диффузной поверхностью, что позволяет разрабатывать измерительные системы с характеристиками необходимыми для практического измерения деталей в процессе производства без предварительной шлифовки.

Поскольку метод основан на целочисленной арифметике, необходима коррекция измерительных ошибок. Проведен анализ возникающих ошибок. Разработаны быстрые алгоритмы коррекции, основанные на понижении размерности решаемой задачи.

Предложенные алгоритмы восстановления полной фазы просты, легко автоматизируются, позволяют обеспечить динамический диапазон измерений до сотен длин волн без потери

интерферометрической точности.

Использование быстрых алгоритмов восстановления значений числа, заданного остатками, дает возможность разработки точных быстродействующих вычислительных алгоритмов. Применение модулярной арифметики дает значительное преимущество в задачах, в которых основная доля вычислений приходится на точное умножение в сочетании со сложением и вычитанием и в которых очень редко нужно делить или сравнивать числа. Быстрые алгоритмы для восстановления значения числа необходимы для решения основной проблемы модулярной арифметики - сравнения чисел, заданных набором остатков.

5. Разработка и экспериментальное исследование автоматизированных интерференционных измерительных систем

Интерференционные картины содержат очень большой объем информации, который должен быть обработан и расшифрован для получения количественных оценок. Для этого необходимы интерференционные информационно-измерительные системы, в задачу которых входит получение информации, ее преобразование, обработка, расшифровка и представление результатов в соответствующем виде.

5.1. Структура и основные элементы автоматизированной интерференционной системы

Особенностью когерентно-оптических измерительных систем является их гибридный характер. Интерференционные измерительные системы состоят из источника когерентного излучения (лазера), оптической установки (интерферометра), устройства ввода оптических изображений в компьютер и собственно компьютера с набором периферийных устройств. Процессы преобразования информации можно представить в следующем виде /64/ рис.5.1.

Компьютер в подобных системах выполняет функцию сбора и обработки информации /16, 17, 18, 52/. Здесь $\vec{U}(x, y)$ - поле перемещений по поверхности объекта; $\vec{\Phi}(x, y)$ - разность фаз отраженного от объекта и эталонного волновых фронтов; $I(x, y)$ - поле яркости интерферограммы; $D(x, y)$ - поле почернения фотоматериала промежуточного носителя;

$\hat{I}(m,n)$ - цифровой образ поля яркости интерферограммы; $\varphi(m,n)$ - цифровое поле разности фаз, полученное при расшифровке интерферограммы; $\Phi(m,n)$ - поле полных фаз после удаления фазовой неоднозначности; $\vec{U}(m,n)$ - цифровой образ поля перемещений.

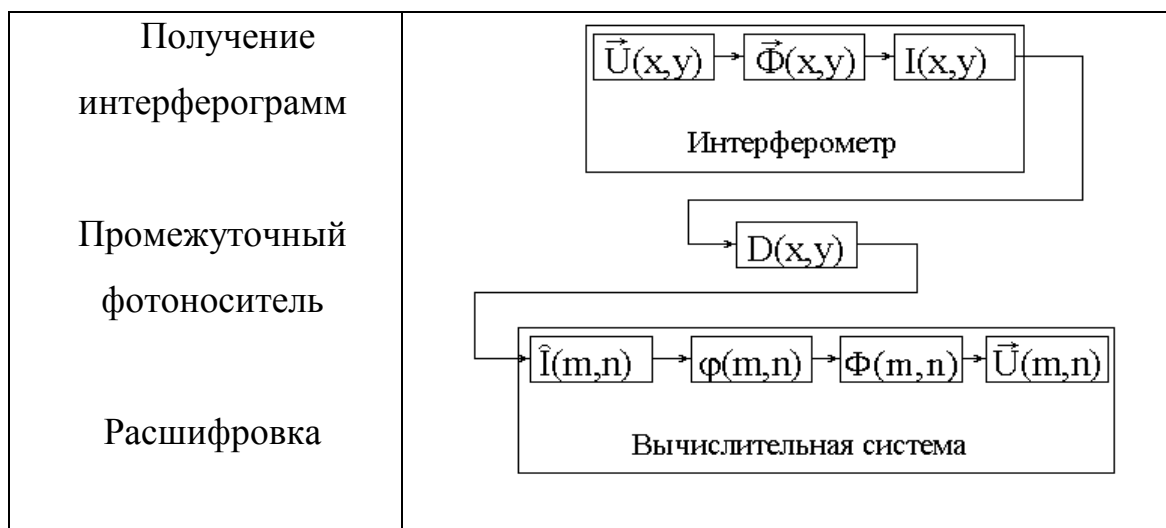


Рис.5.1. Преобразование информации в интерференционных измерительных системах.

Задача расшифровки состоит в определении значений поля разности фаз по измеренным значениям интерференционного сигнала. С математической точки зрения это нелинейная обратная задача, которая решается в условиях априорной неопределенности параметров ($I_0(x,y)$ - средней интенсивности и $V(x,y)$ - модуляции интенсивности или видности) в базовом уравнении двухлучевой интерферометрии.

Нами предложены алгоритмы, которые позволяют преодолеть проблему некорректности. При этом расшифровка ведется по серии интерферограмм, каждая из которых получена при управляемом изменении параметров интерферометра. Кроме высокой точности и эффективности появляется возможность полностью автоматизировать

этот процесс.

Для реализации этих алгоритмов компьютер используется не только для ввода и обработки интерференционных изображений, но и для управления параметрами оптической установки. Преобразование информации, происходящее в этом случае, показано на рис.5.2.

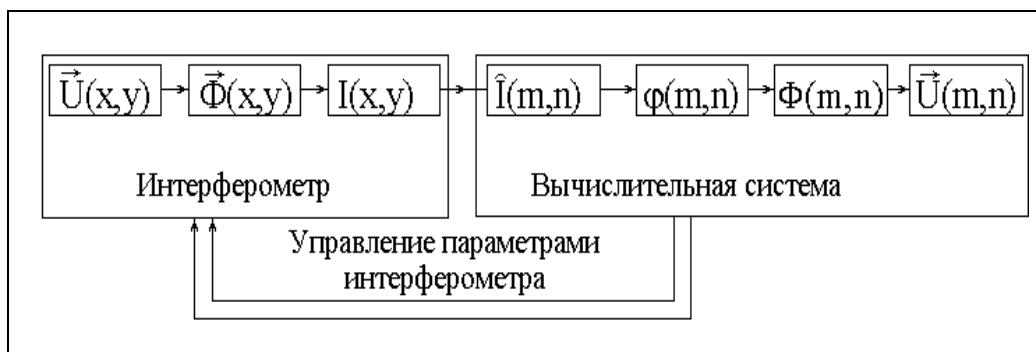


Рис.5.2. Преобразование информации в автоматизированных интерференционных измерительных системах.

В этой схеме отсутствуют промежуточные фотоносители. В настоящее время устройства оцифровки и ввода оптической информации в компьютер обладают более низким пространственным разрешением, чем традиционные фотоматериалы, поэтому необходимы специальные методы и алгоритмы расшифровки, не использующие информацию о пространственном распределении исходного фазового поля. Такие алгоритмы являются локальными, т.е. способны определять значения полной фазы по измерениям в одной пространственной точке.

Алгоритмы основаны на использовании двух видов управляющих воздействий: изменении фазы в опорном пучке интерферометра и изменении цены полосы интерференционной картины.

Рассмотрим основные элементы автоматизированных

интерференционных измерительных систем. Это: программное обеспечение, реализующее алгоритмы обработки и расшифровки интерференционных картин, набор оптико-механических узлов для управления параметрами интерферометра и устройства ввода изображений в компьютер.

5.1.1. Фазовые модуляторы

Управление сдвигом фаз между объектным и опорным пучками в интерферометре осуществляется фазовыми модуляторами.

Разность фаз между опорным и объектным пучками интерферометра определяется разностью длин оптических путей, которые проходят эти пучки. Таким образом, существует возможность управления разностью фаз либо за счет изменения разности хода лучей при постоянном значении показателя преломления, либо за счет изменения скорости распространения световой волны, т.е. изменения показателя преломления. Основные схемы оптических модуляторов приведены в приложении Б.

Наиболее широкое применение при создании фазовых модуляторов нашел пьезоэлектрический эффект. Это объясняется малостью габаритов таких устройств, низкой стоимостью, высокой точностью внесения фазового сдвига, относительно низкими управляющими напряжениями (порядка сотен вольт), низкой потребляемой мощностью, большой механической прочностью, надежностью, высоким быстродействием.

Широкое распространение получила пьезокерамика, создаваемая из материалов на основе твердых растворов цирконата - титана свинца. На рис.5.3 показана конструкция модулятора на основе пьезо-электрического преобразователя.

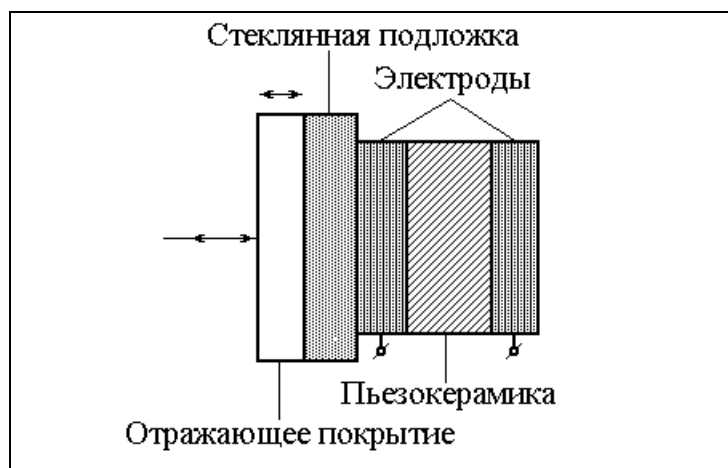


Рис.5.3. Сдвиг фаз перемещением зеркала, закрепленного на пьезокерамике.

При подаче на электроды управляющего напряжения возникает пьезоэффект, приводящий к перемещению отражающего покрытия. Зависимость фазового сдвига от величины приложенного напряжения выражается зависимостью

$$\varphi = \pi V_k/V_0 , \quad (5-1)$$

где V_0 - полуволновое напряжение; V_k - приложенное напряжение.

Нами разработано устройство для сдвига фаз на основе пьезокерамики ЦТС-19. Для управления от компьютера использовалось двухканальное устройство сопряжения с двумя 12-ти разрядными цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП). Полуволновое напряжение модуляторов - 170В. Рабочая апертура - 30мм.

Структурная схема устройства управления показана на рис.5.4.

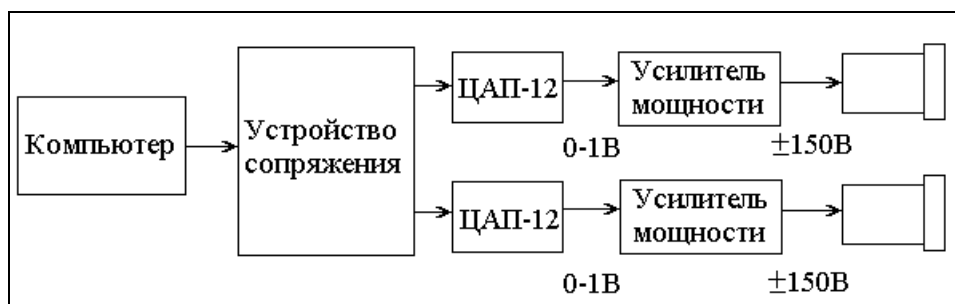


Рис.5.4. Структурная схема устройства управления пьезокерамикой.

Для согласования с полуволновым напряжением пьезокерамики использовались усилители мощности. Выходное напряжение усилителей составляло $\pm 150\text{В}$. Линейность передаточной характеристики обеспечивалась на уровне 0.1%. Время установления управляющего напряжения 10мкс. Суммарное время установки устройства позиционирования $\approx 1\text{мс}$. Точность установки фазового сдвига составляла $\pm 5\%$. Эта погрешность обусловлена характеристиками применяемой пьезокерамики.

Поскольку характеристики алгоритмов пошагового сдвига зависят от точности задания фазового сдвига, то для проведения высокоточных измерений необходимо применять алгоритмы, корректирующие линейные и нелинейные ошибки при установке фазы (Глава 2).

5.1.2. Устройства ввода оптической информации

Одним из основных вопросов при создании автоматизированных когерентно-оптических систем для измерения и контроля деформаций, вибраций и формы поверхности является выбор устройства ввода.

Существует большой спектр подобных устройств. Они различаются рядом характеристик, основными из которых являются: шаг сканирования, число элементов разложения и чувствительность фотоприемника.

Все существующие устройства ввода оптических полей существенно различаются как параметрами, так и областями применения. Перечислим требования, необходимые для создания измерительных когерентно-оптических систем, реализующих алгоритмы фазового сдвига:

- для компенсации вибраций, искажений, вызванных турбулентностью, необходимо уменьшить время ввода серии кадров, по которым вычисляется поле фаз;

- число обрабатываемых элементов определяется скоростью вычислительных процессов и размером поля, в котором необходимо измерить поле разности фаз;

- необходимо обеспечить неизменность нелинейности чувствительности по полю во время съема серии кадров для компенсации геометрических искажений раstra;

В настоящее время наиболее доступны устройства на основе передающих телевизионных трубок (видиконы, плюмбиконы, суперортиконы, диссекторы), твердотельных фотоприемных матриц и линеек (ПЗС, фотодиодные), фотодиодов и фотоэлектронных умножителей (ФЭУ).

Системы на основе передающих телевизионных камер используют

метод сканирования изображения. Опрашивающим элементом здесь является пучок электронов, при помощи которого последовательно считывается потенциальный рельеф с мишени, который представляет собой отпечаток исследуемого изображения. Характерной особенностью таких систем является способность передающих трубок запоминать изображение на достаточное время с возможностью быстрого стирания. Это во многих случаях позволяет расширить круг решаемых задач, например, регистрировать и измерять быстропротекающие процессы, а также работать с объектами лишь при кратковременном освещении.

Устройства на базе телевизионных передающих трубок обладают высокой чувствительностью и быстродействием, зависящим лишь от инерционности отклоняющих систем (ФОС), однако они имеют значительную неравномерность по полю, геометрические искажения, вызванные температурным дрейфом ФОС. Пространственное разрешение таких устройств определяется возможностями используемых телевизионных камер.

Наибольшую чувствительность и разрешающую способность имеют трубки класса суперортикон. Диссекторы позволяют осуществлять произвольный доступ к любой точке и регистрировать мгновенное значение яркости в точке. Однако такие трубки, а также фокусирующие и отклоняющие системы к ним дороги, сложны в настройке.

Трубки класса видикон более дешевы и просты в работе. Однако они обладают малой разрешающей способностью, нелинейностью и нестабильностью развертки, неравномерностью сигнала по полю, невысокой чувствительностью и малым динамическим диапазоном. Максимальное разрешение при использовании стандартных камер определяется параметрами телевизионного сигнала и не превышает 768x576 точек. Для повышения разрешения необходима разработка

высокоточных отклоняющих систем и разработка специальных телевизионных камер. Известны устройства с разрешением 2048x2048 точки.

Наиболее перспективны устройства ввода на базе твердотельных матричных фотоприемников. Это связано с появлением высокоразрешающих твердотельных матриц, в которых геометрические искажения практически отсутствуют. Пространственное разрешение матриц колеблется от 600x500 до 1024x768. В настоящее время появились матрицы с разрешением 3600x3200 элементов. Недостатком приборов на основе таких матриц является небольшая скорость ввода, а также значительная стоимость. Матричные фотоприемники имеют также небольшой диапазон передачи яркости.

Для обеспечения более высокого разрешения можно применять в устройствах ввода линейные приемники оптического излучения, позволяющие достичь разрешения более 10000 элементов по строке. Обычно эти фотоприемники сопрягаются с электромеханическим приводом для сканирования по ортогональной координате, используя при этом специальные методы, можно добиться разрешения по яркости до 12 разрядов.

При квантовании по интенсивности фотоприемник должен обладать очень низкой пороговой чувствительностью, линейной передаточной характеристикой и иметь динамический диапазон не менее 10000. Поставленным требованиям удовлетворяют фотоэлектронные умножители (ФЭУ). При специальном подборе и стабилизированном питании ФЭУ позволяют улавливать отдельные фотоны, а насыщение наступает при сигналах, превышающих нижний порог чувствительности более чем в миллион раз. Однако ФЭУ - это одноканальный прибор, требующий высокостабильного источника питания, при этом скорость

ввода информации низкая, т.к. для обеспечения динамического диапазона по яркости она ограничивается из-за повышения шумов ФЭУ на высоких частотах.

Фотоэлектронные умножители наряду с высокой чувствительностью имеют хорошую стабильность тока эмиссии фотокатода. Линейные размеры анализируемого элемента определяются считывающей диафрагмой и могут изменяться от единиц до тысяч микрометров, что невозможно при использовании других типов фотоприемников. Однако разложение изображения с помощью диафрагмы требует ее перемещения в плоскости вводимого изображения. Наличие механических узлов в устройстве ввода приводит к уменьшению быстродействия, а вибрации и люфты ограничивают точность позиционирования.

Устройства ввода с использованием стандартных TV камер на матрицах ПЗС или видиконах позволяют передавать не более 256 градаций яркости при работе в стандартном телевизионном режиме. Чувствительность камер колеблется от долей люкса до нескольких люкс на мишени фотоприемника. Зависимость преобразования свет-код линейна только в узком диапазоне изменения яркости. Для линейаризации передаточных характеристик необходимо применение корректирующих элементов или специальной корректирующей программы. Достоинство этого способа - быстрый ввод изображения сразу по всему кадру.

Наиболее перспективным методом является использование фотодиодных линеек и фотодиодных матриц, обеспечивающих как высокое разрешение, так и большой динамический диапазон передачи яркости при кодировке полутоновых изображений. Применение подобных устройств позволяет на несколько порядков увеличить скорость ввода по сравнению с одноканальными фотоприемниками при одновременной точной привязке координат считывающей апертуры, как и в

механическом устройстве сканирования. Большой динамический диапазон и линейность передаточной характеристики яркости позволяют производить квантование интенсивности 12-ти разрядным АЦП.

Для ввода изображений в темпе телевизионной развертки нами было разработано устройство ввода на базе передающих трубок со стандартным сигналом. В действующей установке применялась измерительная камера КТ-М с приемной трубкой типа видикон. Параметры стандартной камеры не позволяют использовать ее непосредственно в качестве устройства ввода измерительной системы. Для улучшения характеристик были изменены параметры системы отклонения. Нелинейность была уменьшена до 0,5%, а геометрические искажения до 1%. Геометрические искажения очень сложно устранить, поскольку требуется применение тщательно рассчитанных и точно изготовленных систем фокусировки и отклонения пучка электронов. Повысить точность можно определив коэффициенты нелинейных и геометрических искажений, т.е. создав матрицу пересчета координат. Для измерения геометрических погрешностей на катод телекамеры проецировалась система полос, сформированная с помощью лазерного интерферометра. Данная методика применима при стабильной работе устройства. Была проверена проверка камеры на устойчивость ее выходных параметров в зависимости от времени. Результаты исследований показали, что после тридцати минут прогрева характеристики камеры достаточно стабильны. Дальнейшая обработка производилась с использованием матрицы пересчета координат.

Устройство предназначено для ввода изображений с помощью серийных телекамер со стандартным телевизионным сигналом в форматах 768 на 576, 512x512 или 256x256 точек по 6(8) бит. Ввод производится в темпе телевизионной развертки.

Ряд задач требует ввода изображений с высоким пространственным разрешением. Для этого было разработано гибридное устройство на базе универсального микроскопа, снабженного сканирующим столом. Для ускорения ввода при механическом сканировании столика микроскопа вводится не одна точка, а часть поля изображения, спроектированного оптической системой на фотокатод телевизионной трубки или поле твердотельной матрицы. Изучаемый объект или вводимое изображение перемещается с помощью шаговых двигателей, управляемых от компьютера. Таким образом, удается обеспечить пространственные размеры вводимого изображения в диапазоне 110 на 110 мм с дискретностью перемещения предметного столика 6.25мкм. Со скоростью телевизионной развертки может оцифровываться поле размером от 22 мкм до 400 мкм в зависимости от набора штатных объективов микроскопа. Общий вид устройства показан на рис.5.5.

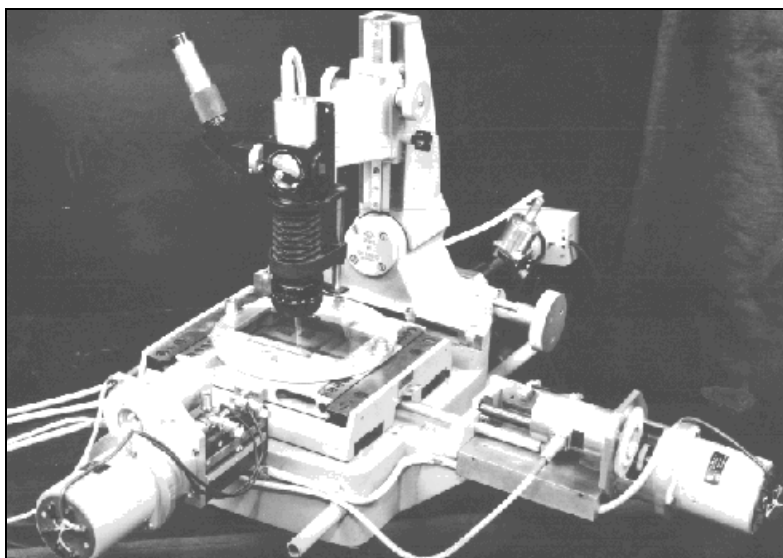


Рис.5.5. Гибридное устройство ввода на основе универсального микроскопа.

Приемное устройство выполнено на основе стандартной телевизионной камеры типа КТМ-1М. Телевизионные камеры вырабатывают стандартный TV сигнал, в котором информация о начале и конце строки и кадра задается соответствующими сигналами врезок синхроимпульсов. При кодировании видеосигнала очень важно обеспечить точную привязку точки считывания по строке.

Генератор частоты квантования подстраиваются к частоте строк видеосигнала. Частота квантования от 512 до 1000 раз больше частоты строк, поэтому фаза генератора квантования имеет разброс к моменту прихода импульса строк. Таким образом, координаты точек сканирования будут определяться не только характеристиками оптической и отклоняющей систем, но и системой синхронизации камеры. Следовательно, возникает неопределенность положения дискретизации точек по строке. В худшем случае, от строки к строке погрешность определения координат точки может превышать шаг дискретизации. Были предприняты меры по стабилизации фазы генератора квантования, что позволило обеспечить неопределенность положения в точке, не более $1/4$ элемента дискретизации.

При пошаговом перемещении возможен сбой в механизме шаговых двигателей. Для устранения ошибок при сшивке кадров и для определения точного значения перемещения устройство снабжено датчиками линейных перемещений по x и y координатам. Датчик включает 12-ти разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), фотоэлектрический преобразователь на основе оптической линейки с периодом раstra порядка 150 мкм. Это позволяет получать пространственные отсчеты с абсолютной погрешностью менее 2,5 мкм.

5.1.3. Программное обеспечение

Программное обеспечение является определяющей частью измерительной системы. Прослеживание тенденций развития систем интерференционного контроля и измерений показывает, что математическое обеспечение развивается значительно быстрее, чем аппаратные средства. В то же время, развитие программного обеспечения приводит к уменьшению сложности оптических установок, поскольку ряд аппаратных ошибок удается преодолеть с помощью математических методов.

Существует разделение программного обеспечения на системы для выделения фазовой информации из интерференционных картин, и системы для расчета по фазовым характеристикам конкретных параметров измеряемых объектов [21, 40]. Системы для выделения фазовой информации являются универсальными для многих типов интерференционных измерительных систем. Расчет параметров зависит от конкретного назначения измерительной системы: измерение рельефа, расчет напряженно-деформированного состояния, анализ качества обработки и т.п.

Для управления оптической установкой, ввода, обработки и расшифровки интерференционных картин разработан программный комплекс Speckle. В настоящее время существуют версии программы, работающие под управлением операционных систем MS-DOS, Windows-3.11, Windows-95/NT. Вид рабочего поля в режиме Windows-95 показан на рис.5.6.

В зависимости от наличия оперативной памяти возможно использование до 8 кадров для хранения изображений формата 512 на 512 точек по 8 бит.

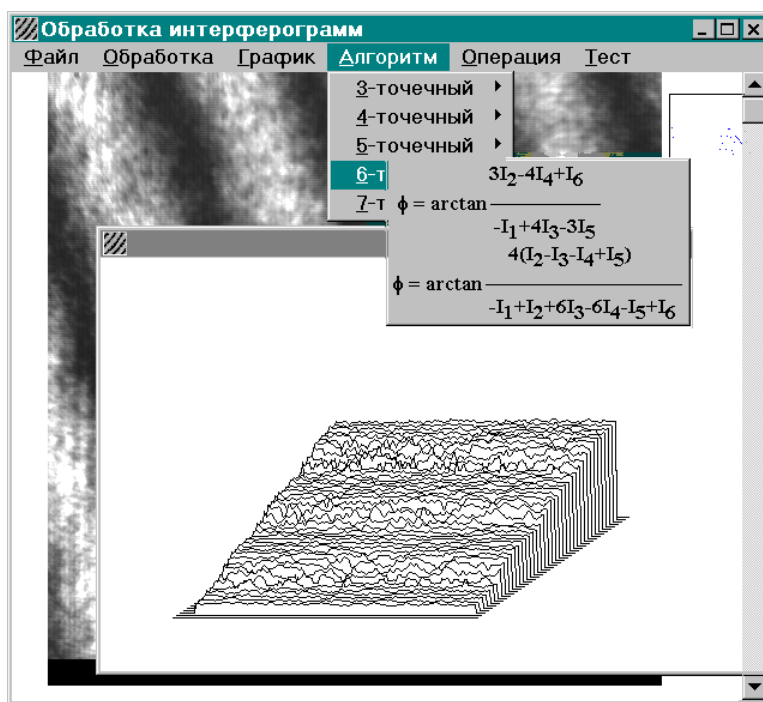


Рис.5.6. Вид рабочего поля программы Speckle в режиме Windows-95.

Для получения распределения фазового фронта производится расшифровка интерферограмм. Расшифровка возможна тремя способами: выделением центров полос, с помощью спектрального анализа и методом управляемого фазового сдвига.

Выделение центров полос происходит следующим образом. Интерферограмма очищается от шумов с помощью одного из предлагаемых фильтров /85, 86/. Далее оператор проводит линию, приблизительно проходящую через центр полосы. Программа находит точные центры перепада и уточняет вид линии. Затем в интерактивном режиме производится нумерация полос. Если полосы монотонно меняются в некотором диапазоне, задается предел монотонности и знак приращения. После этого происходит интерполяция значений в промежуточных точках полиномом или с помощью сплайнов.

Анализ с помощью спектрального анализа производится или с

помощью быстрого преобразования Фурье (одномерное или двумерное) с заданием окна в частотной области или с помощью цифровой фильтрации с заданной полосой пропускания.

Расшифровка с помощью алгоритмов с управляемым фазовым сдвигом производится над набором интерферограмм, загруженным в последовательные кадры памяти. Реализованы алгоритмы: расшифровки по серии интерферограмм до 7-точечных включительно (Глава 2) и алгоритмы расшифровки по серии спеклограмм (Глава 3).

После получения фазового фронта производится анализ. Он состоит из четырех блоков: основной анализ, геометрический анализ, дифракционный анализ, полиномиальная обработка.

При основном анализе вычисляется разность между полем фаз, определенным экспериментально, и некоторым эталонным полем. Результатами работы являются контурная карта волнового фронта, статистические характеристики волнового фронта, среднее радиальное сечение волнового фронта.

При геометрическом и дифракционном анализе определяется геометрическая диаграмма пятен и вычисляется соответствующая энергия. При этом определяется апертурная функция, функция распределения амплитуды, оптическая передаточная функция. Для этих вычислений используется алгоритм быстрого преобразования Фурье. Могут быть получены графики сечений в разных направлениях, трехмерные графики и контурные карты.

При работе с полиномами используются полиномиальные коэффициенты Цернике. Фронт волны, описанный полиномами Цернике, можно поворачивать в пространстве с изменением масштаба и амплитуды, совмещать с другими волновыми фронтами.

Для вывода информации в удобном виде предусмотрен вывод

графиков по строкам и столбцам, вывод трехмерных графиков с различных направлений.

Предусмотрена генерация тестовых картин для проверки метрологических характеристик алгоритмов и для сравнения экспериментально полученных фазовых полей с полями, имеющими идеальный рельеф.

Обработка всех экспериментальных данных, представленных ниже, проводилась с помощью этой системы.

Автоматизированные интерференционные измерительные системы могут использоваться для решения широкого круга задач. Рассмотрим несколько систем, разработанных нами в 1980-1997 годах на основе алгоритмов рассмотренных в этой работе.

5.2. Анализ напряженно-деформированного состояния объектов при использовании голографических накладных интерферометров

В экспериментальной механике при изучении деформированного состояния изделий все чаще применяют оптические методы как классические (метод муаровых полос, поляризационно-оптический), так и методы, основанные на голографических способах записи информации (голографическая интерферометрия, голографический муар). Решение таких задач связано с разработкой автоматизированных систем съема экспериментальной информации и с созданием эффективных алгоритмов компьютерной обработки голографических интерферограмм.

В то же время широкому внедрению метода в практику исследовательских и заводских лабораторий мешают высокие требования к виброизоляции элементов голографического интерферометра.

Рассмотрим решение одной из задач экспериментальной механики - определение деформаций при растяжении изотропной пластинки, ослабленной центральным круговым отверстием. К настоящему времени для различных экспериментальных методов она является классической тестовой задачей. На примере ее решения нами исследовались характеристики алгоритмов расшифровки голографических интерферограмм методом выделения центров полос /9, 25/. Для анализа использовалась система расшифровки на основе компьютера типа PDP-11. Ввод изображений осуществлялся устройством на основе диссектора.

Впервые задачу о распределении напряжений в пластинке бесконечной ширины с круговым отверстием при известных растягивающих усилиях, приложенных к срединной плоскости, решил путем подбора Г.Кирш. В работе /88/ были получены зависимости для

перемещений точек поверхности такой пластины. Компоненты вектора деформаций определяли по закону Гука в соответствии с работой /57/. Таким образом, можно было сравнить полученные экспериментальные результаты с известным теоретическим решением.

Голографические интерферограммы записывались во встречных пучках методом двух экспозиций. Регистрирующая среда крепилась на поверхности исследуемого элемента с помощью прозрачного слоя.

Образцы для испытаний были изготовлены из листового материала Д16Т в состоянии подставки (рис.5.7) (длина 400мм, ширина 40.2мм, толщина 1.06мм, диаметр отверстия 6мм).

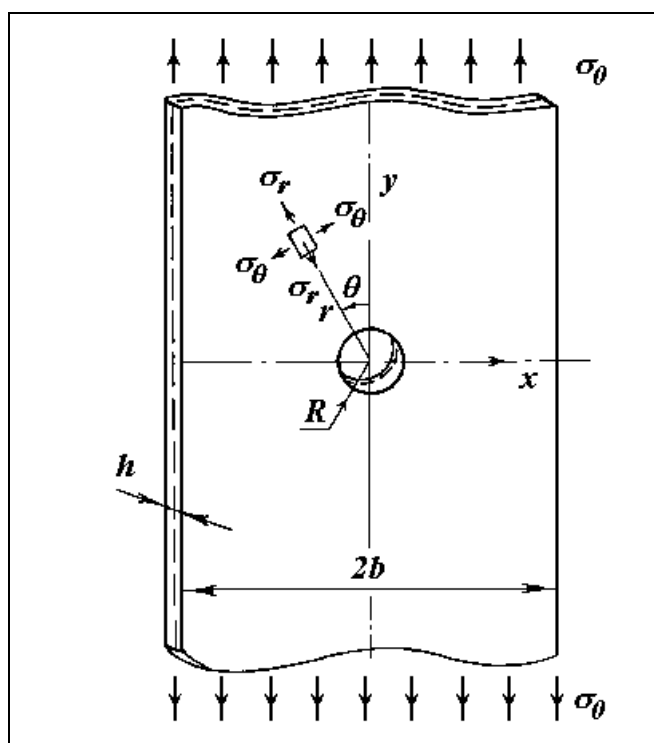


Рис.5.7. Одноосное растяжение пластинки с центральным круговым отверстием

На одной стороне образца с помощью промежуточной оптически прозрачной среды закрепляли фотопластинку. Для крепления фотопластинки ПЭ-2 использовали синтетический каучук СКТН,

отверждаемый катализатором К-16 (смесь 12г СКТН и 0.9г К-18). Показатель преломления каучука n определяли на рефрактометре ИРФ-23 в двух состояниях: недополимеризованном и полностью полимеризованном. Различия в показателях незначительны, $n=1.40125$ и $n=1.40513$ соответственно. Образец испытывали на растяжение на прессе ДМ-30М. Растягивающее напряжение $\sigma_0=65.71$ Мпа. Регистрация восстановленного изображения осуществлялось фотокамерой с объективом «Телемар-22». Для определения компонент тензора деформаций необходима совместная обработка двух интерферограмм, записанных с разных направлений. Располагая фотокамеру дважды в плоскости xOz ($\alpha_1=63^\circ$, $\alpha_2=117^\circ$) и дважды в плоскости yOz ($\beta_3=76.8^\circ$, $\beta_4=103.2^\circ$), наблюдали картины полос, фотографии которых приведены на рис.5.8.

Для определения компонент ε_x , ε_y тензора деформаций использовали следующие уравнения:

$$\varepsilon_x = \frac{\lambda}{2 \cos \alpha} \left(\frac{\partial N_1}{\partial x} - \frac{\partial N_2}{\partial x} \right) \quad (5-2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\lambda}{2 \cos \beta} \left(\frac{\partial N_3}{\partial y} - \frac{\partial N_4}{\partial y} \right) , \quad (5-3)$$

где α и β - углы, отсчитываемые от координатных осей x и y соответственно и определяющие направления наблюдения; N_i ($i=1,2,3,4$) порядковые номера интерференционных полос; λ - длина волны используемого источника света.

Процесс обработки состоял из следующих этапов /9/: ввод интерферограмм в компьютер, выделение центров полос, определение

полей деформаций.

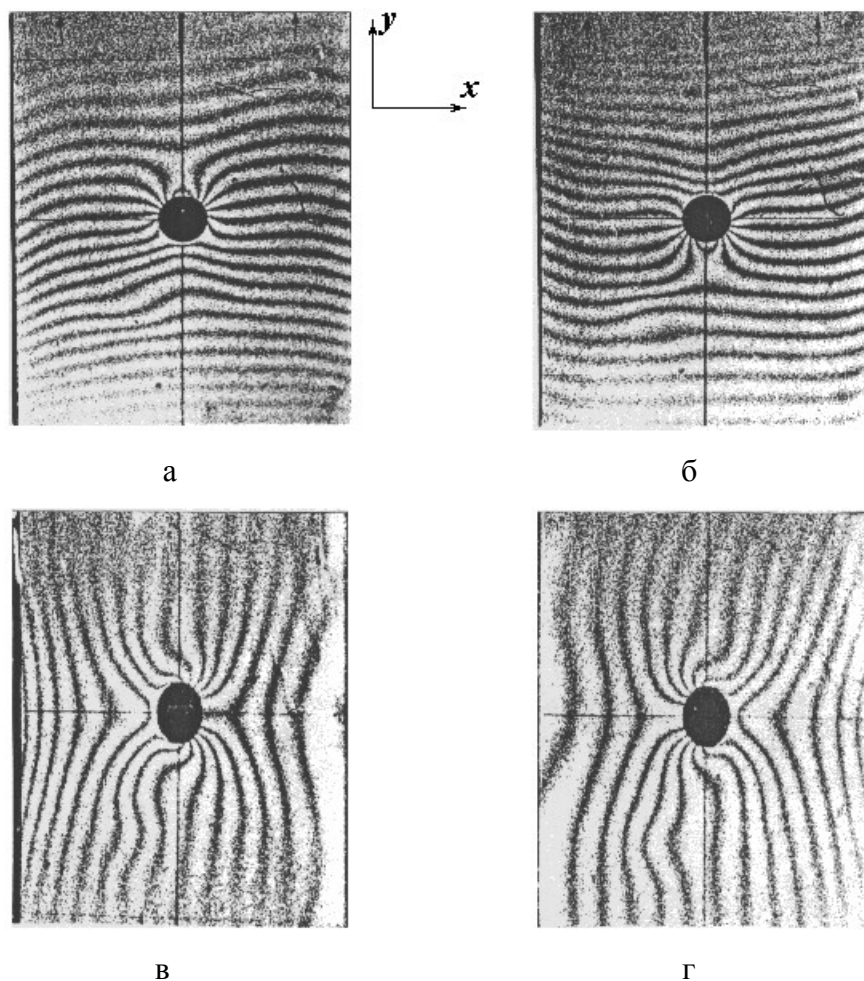


Рис.5.8. Фотографии полос при упругом деформировании материала изделия

$$а - \beta_3=76.8^\circ, б - \beta_4=103.2^\circ, в - \alpha_1=63^\circ, г - \alpha_2=117^\circ.$$

Используемое устройство ввода на основе точечного диссектора имело диаметр фотокатода 100 мм с вырезающей апертурой 100 мкм /51/. Спроектированная оптическая системой на фотокатод диссектора изображение квантовалось на 256 уровней и в виде матрицы 256 на 256 точек записывалось в память компьютера. Вводимый фрагмент интерферограммы составил 40x40мм, поэтому минимальный элемент изображения имел размер ≈ 156 мкм.

После выделения центров полос, в режиме графического редактирования удалялись разрывы, ложные ответвления и соединения, экстраполировались линии в области отверстия. Затем проводилась интерактивная нумерация полос. На рис.5.9 показана одна из картин полос, соответствующая упругому деформированию образца с отверстием, и соответствующие ей выделенные центры полос.

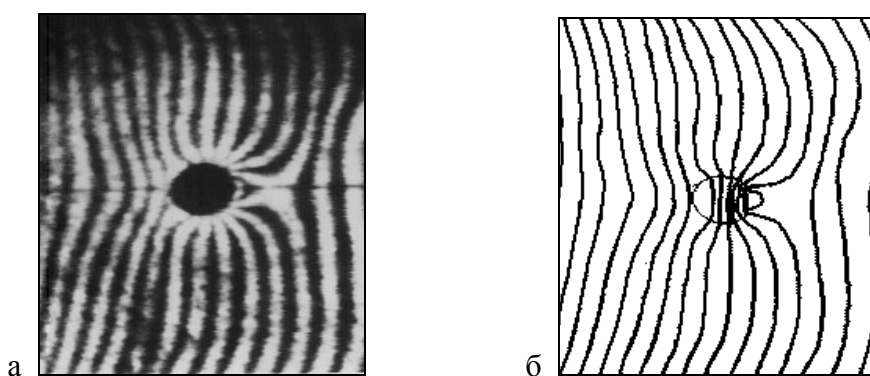


Рис.5.9. Картина интерференционных полос

а - исходная картина полос, б - выделенные центры полос.

При определении относительных деформаций использовалось два подхода /25/. Первый: вначале определялись компоненты вектора перемещений, (при аппроксимации полей перемещений в точках между центрами полос использовались кубические сплайны), затем по соотношениям Коши вычислялись компоненты тензора деформаций. Второй: аппроксимация функции порядков полос осуществлялась с помощью упругой линии статически неопределимой балки переменной жесткости /57/, а затем определялись деформации и интегрированием находились перемещения. Из-за погрешностей в определении центров полос найденные деформации приходилось сглаживать методом наименьших квадратов. Полученные обоими способами результаты оказались практически одинаковыми.

На рис.5.10 показаны деформации, полученные экспериментальным и расчетным путями.

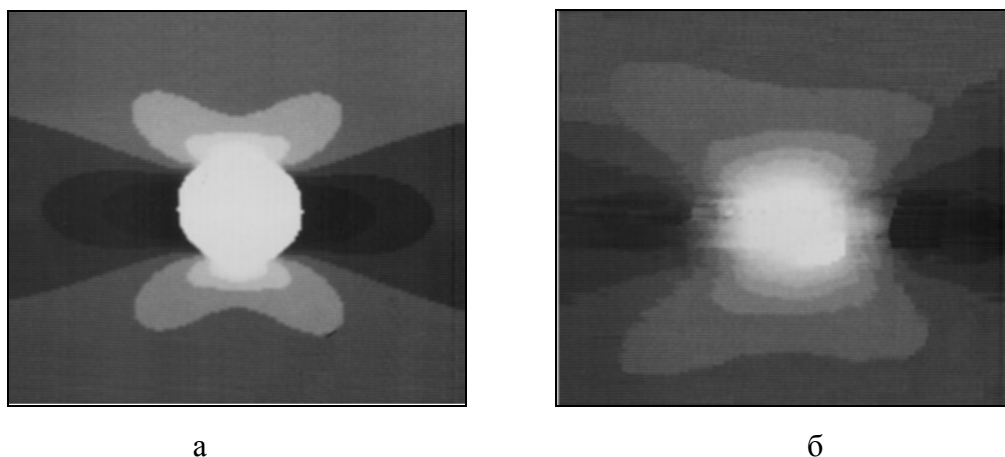


Рис.5.10. Распределение деформации в пластине с отверстием:
а) - по формулам теории упругости; б) - по экспериментальным данным.

На рис.5.11 показан график относительных деформаций $\varepsilon_y/\varepsilon_0$ (ε_0 - деформации на удалении от отверстия) в двух сечениях образца: опасном ($y=0$) и при $y=2R$.

Использование информации лишь о выделенных центрах полос приводит к ошибкам при нахождении производных, используемых при определении тензоров деформации. Максимальная погрешность - вблизи контура отверстия.

Совпадение экспериментального решения тестовой задачи и теоретического решения позволяет говорить о возможности исследования напряженно-деформированного состояния образцов с допустимой для инженерных расчетов точностью, с помощью предложенной нами системы для автоматизации расшифровки голографических интерферограмм.

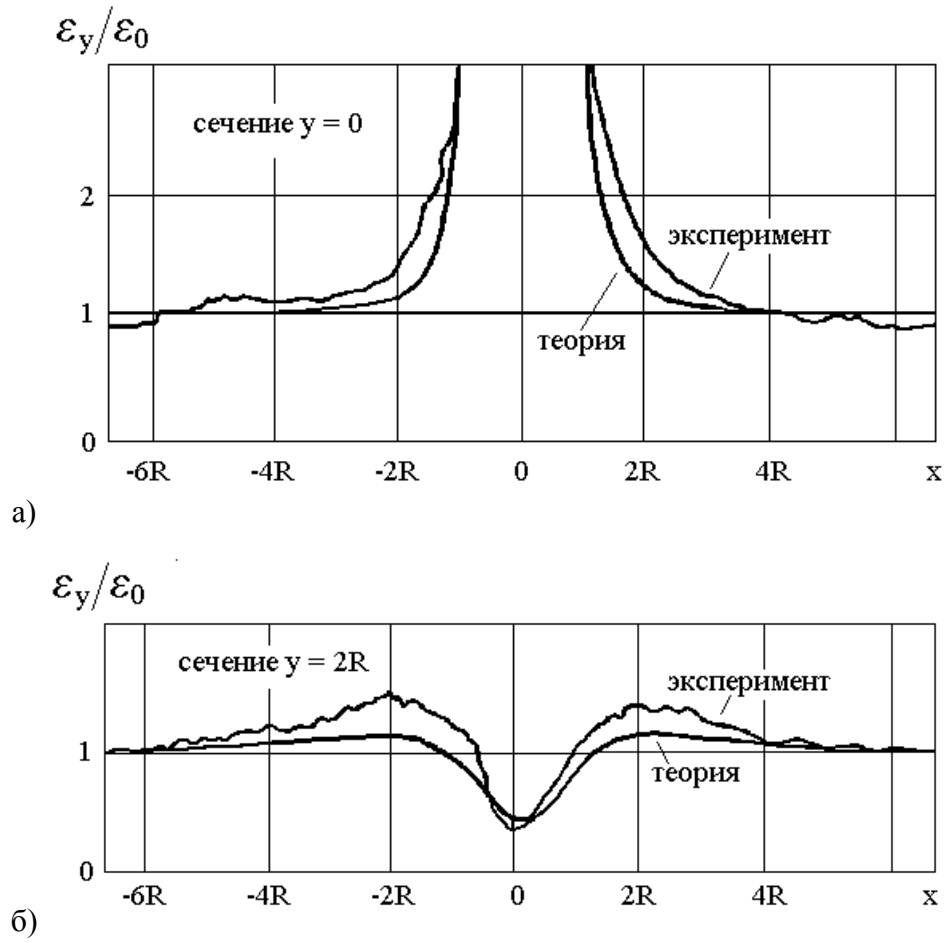


Рис.5.11. Эпюры относительных деформаций в различных сечениях

а) в сечении $y = 0$; б) в сечении $y=2R$.

5.3. Определение отклонений от плоскостности поверхностей оптических элементов

Для измерения плоскостности оптических поверхностей используется промышленные интерферометры типа Физо ИТ-200, ИТ-100 /60/. Оптическая схема интерферометра показана на рис.5.12.

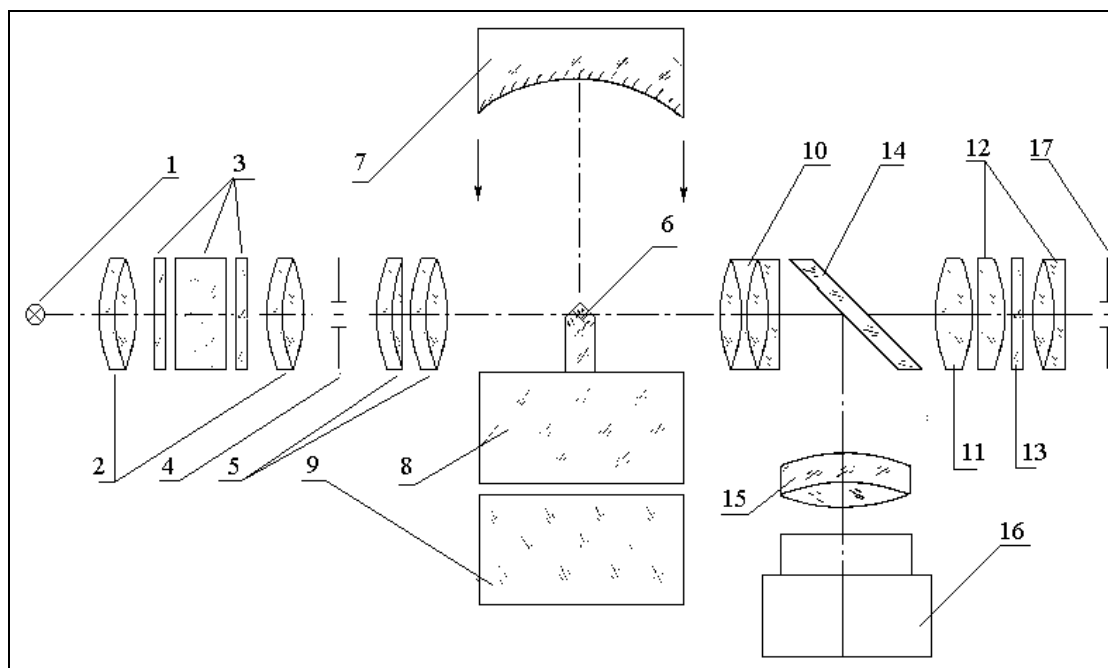


Рис.5.17. Оптическая схема интерферометра ИТ-200.

1-монохроматический источник света; 2-конденсор; 3-интерференционный светофильтр; 4,17-диафрагмы; 5,10,15-объективы; 6-призма; 7-сферическое зеркало; 8-образцовая пластина; 9-проверяемая поверхность контролируемой детали; 11-линза; 12-окуляр; 13-сетка; 14-зеркало; 16-фотокамера.

Коллимированный волновой фронт, отраженный от эталонной поверхности образцовой пластины 8 и проверяемой поверхности детали 9,

образует интерференционную картину. В качестве источника света применяется ртутная лампа СМР-1 ($\lambda=0.546\text{мкм}$ - длина волны зеленой линии ртути) - 1. Интерференционная картина рассматривается в зрительную трубу, состоящую из объектива 10, линзы 11 и окуляра 12 с сеткой 13. С помощью переключаемого зеркала 14 интерференционная картина, локализованная на эталонной поверхности образцовой пластины, может быть зарегистрирована на фотопленку с помощью фотокамеры 16.

Предметный стол может перемещаться в трех направлениях. Наклон предметного стола возможен в горизонтальной плоскости вокруг двух взаимно перпендикулярных осей.

В случае идеальной плоскостности проверяемой поверхности (при правильной юстировке интерферометра) в поле зрения будут видны прямые, равные по ширине, полосы. Если проверяемая поверхность изготовлена с отступлениями от идеальной плоскостности, наблюдаются изгибы и изъёмы полос.

Интерферометр может работать в помещении с перепадом температур в течение суток не более $1.5^{\circ}\text{-}2^{\circ}\text{ C}$. и при отсутствии потока воздуха. Проверяемая деталь перед контролем должна быть выдержана на предметном столике интерферометра некоторое время, которое зависит от толщины и массы детали. Детали диаметром до 150мм должны выдерживаться в течение 30 минут, диаметров свыше 150мм - до одного часа.

Результатом измерений является общая ошибка:

$$N = \frac{H \lambda}{\ell 2}, \quad (5-4)$$

где $H=x-y$, стрелка прогиба; x -отсчет центра интерференционной полосы

по краям поля зрения; у-отсчет в середине изгиба; l - интервал между полосами. Для определения местной ошибки измеряются интервал l_1 и стрелка прогиба H_1 в месте дефекта полосы:

$$\Delta N = \frac{H_1 \lambda}{l_1 2} \quad (5-5)$$

При таких измерениях возможна лишь грубая оценка качества. В настоящее время данная методика не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к контролируемым изделиям.

Для определения количественной информации по всему полю проверяемой детали и для автоматизации процесса обработки проведена модификация интерферометра /35, 38, 66/ (Рис.5.13).

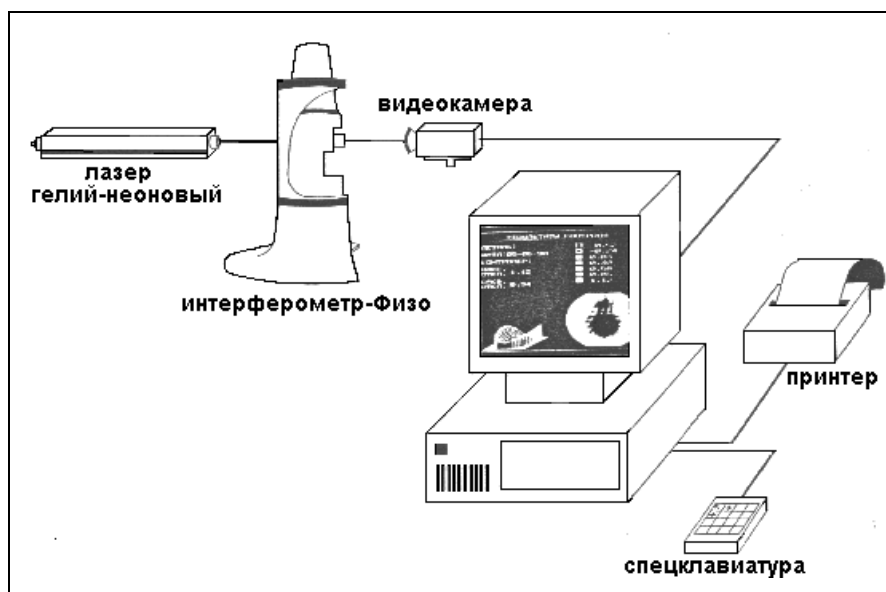


Рис.5.13. Структурная схема системы для контроля плоскостности.

Вместо фотокамеры установлено устройство ввода оптической

информации на основе телевизионной камеры КТ-М. Для повышения качества интерферограмм ртутная лампа заменена гелий-неоновым лазером. Управление режимами работы осуществляется с помощью спецклавиатуры. Исполняющая программа записана в постоянном запоминающем устройстве компьютера.

Обработка проводилась на основе выделения спектральных составляющих, соответствующих полезному сигналу.

Если опорной волной является плоская волна, распространяющаяся под углом θ к нормали интерферограммы, то интенсивность интерференционной картины можно записать как

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cos \{2\pi f_0 + \phi(x,y)\} , \quad (5-6)$$

где $a(x,y)$, $b(x,y)$, $\phi(x,y)$ и f_0 представляют соответственно фоновую интенсивность, амплитуду, фазу и пространственную частоту полос. Зависимость пространственной частоты полос от угла θ :

$$f_0 = \sin\theta / \lambda . \quad (5-7)$$

После одномерного Фурье-преобразования по x получим

$$G(f,y) = A(f,y) + C(f-f_0,y) + C^*(f+f_0,y) , \quad (5-8)$$

где G , A , и C - спектры Фурье, f - пространственные частоты.

Если $a(x,y)$, $b(x,y)$ и $\phi(x,y)$ имеют частоты, намного меньшие, чем f_0 , то функция $C(f-f_0,y)$ может быть выделена фильтрацией относительно f_0 . На этом шаге исключается составляющая $A(f,y)$, представляющая неравномерность освещенности по полю интерферограммы.

На рис.5.14 показана интерферограмма, полученная при контроле реального объекта, и спектр по центральной строке.

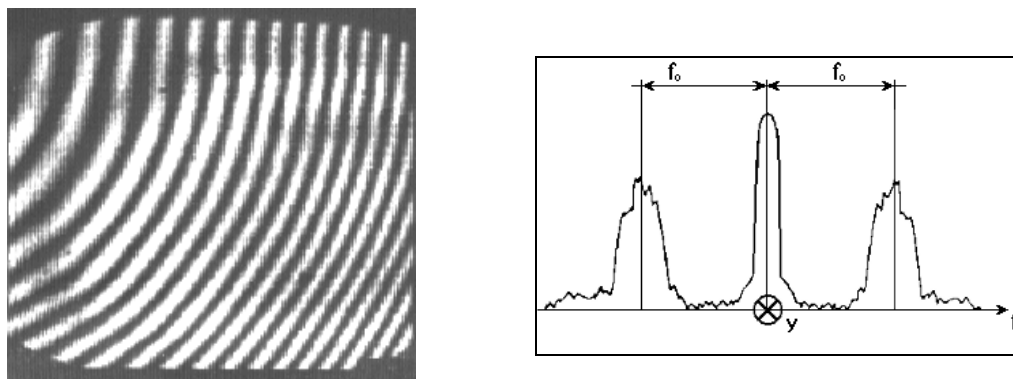


Рис.5.14. Разделение спектров при обработке реальной интерферограммы.

Процесс фильтрации в области пространственных частот может быть заменен анализом непосредственно в пространственной области. Для этого необходимо конструирование цифровых фильтров с параметрами, соответствующими несущей частоте. Цифровая фильтрация дает значительный выигрыш во времени обработки.

Алгоритм расшифровки, реализованный в описываемой системе, основан на специализированной фильтрации в частотной области /35, 38/. Применяемая методика позволяет свести к минимуму аппаратную часть системы и полностью автоматизировать процесс контроля.

На рис.5.15 показана типичная интерферограмма, полученная при контроле одной из деталей, и характеристика детали, выдаваемая после проверки. Характеристика включает максимальное и среднеквадратическое отклонение от плоскостности и рельеф поверхности.

Проведены экспериментальные исследования методических

погрешностей системы при различных формах поверхности.

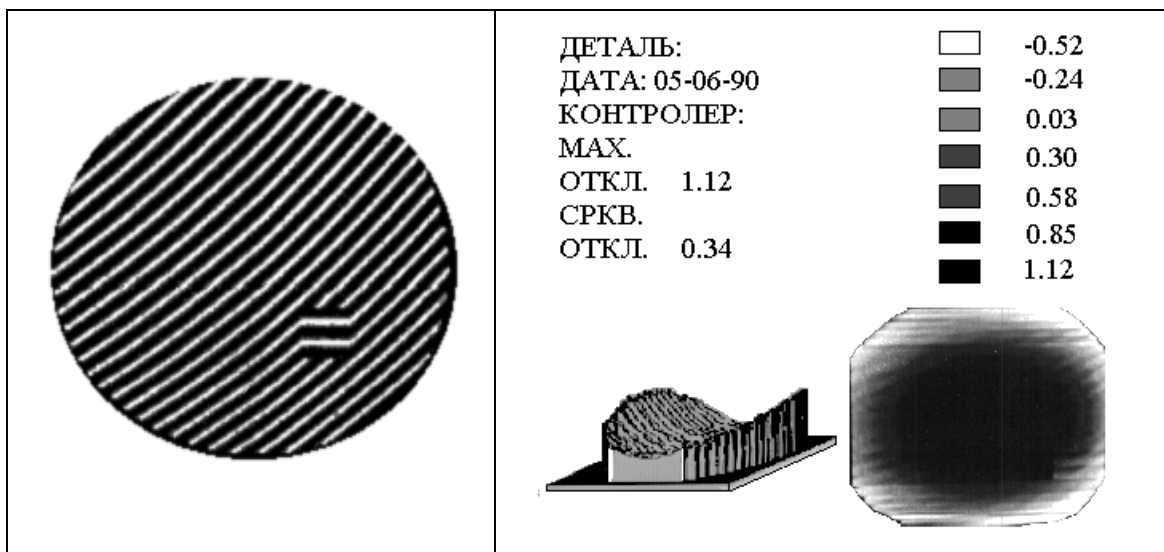


Рис.5.15. Интерферограмма и характеристика проверяемой детали.

Система имеет следующие характеристики:

- диапазон изменения от $\lambda/25$ до 5λ ;
- погрешность в точке - $\lambda/25$;
- среднеквадратичное отклонение - $\lambda/50$;
- используемая длина волны - $\lambda=0.633\text{мкм}$;
- время обработки составляет около минуты.

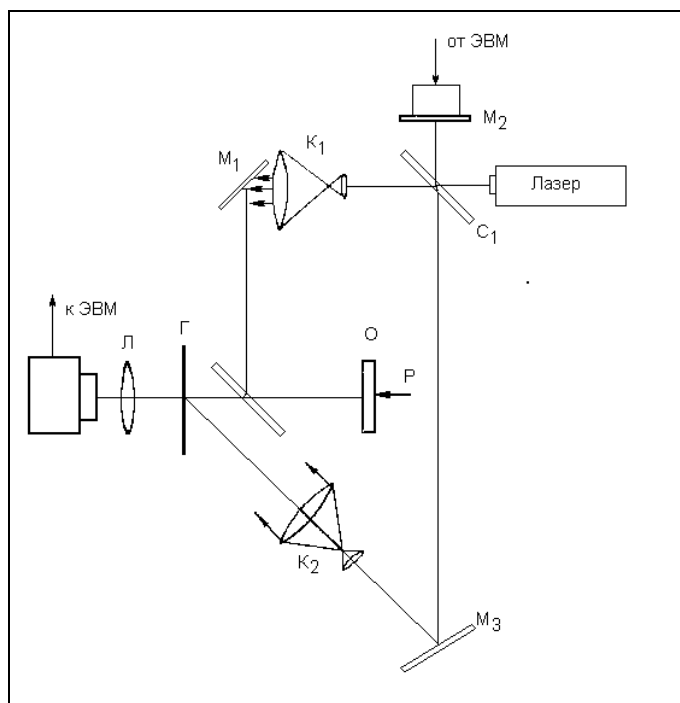
При сравнении результирующего среднеквадратичного отклонения формы поверхности с данными, полученными на интерференционной системе ZYGO Mark-III, получено полное совпадение. Система внедрена на НПО «Новосибирский приборостроительный завод».

5.4. Измерение поля прогиба и рельефа поверхности

В предыдущих разделах рассматривались методы расшифровки (выделение центров полос, и спектральный анализ), которые не требовали модификации оптической схемы интерферометра.

Ниже рассмотрим расшифровку с использованием контролируемого фазового сдвига при экспериментальном измерении поля прогиба мембран и рельефа пробных стекол. Во всех оптических схемах для внесения фазового сдвига использовалось зеркало, закрепленное на пьезокерамике.

Методом голографической интерферометрии реального времени /22, 26/ измерялось поле прогиба мембраны, жестко закрепленной по краям и нагруженной в центре сосредоточенной силой (рис.5.16).



C_1, C_2 - светоделители;
 M_1, M_3 - зеркала;
 M_2 - зеркало, закрепленное на пьезокерамике;
 K_1, K_2 - коллиматоры;
 O - объект, нагруженный силой P ; Γ - голограмма;
 L - объектив, строящий изображение на мишени телевизионной трубки.

Рис.5.16. Схема голографического интерферометра для определения поля прогиба мембраны с шероховатой поверхностью.

Мембрана изготовлена из материала Д16Т, ее диаметр - 42мм, толщина 0.5мм. Интерферограммы получены с помощью интерферометра Майкельсона.

В качестве источника освещения использовался гелий-неоновый лазер ЛГ-38. Голограмма объекта фиксировалась на фотопластинку, которая после проявления устанавливалась на то же самое место. После нагрузки, отраженный от мембраны волновой фронт интерферировал с фронтом, восстановленным от голограммы.

На рис.5.17 приведены фотографии интерферограмм, полученных в результате нагрузки, и трехмерный график прогиба мембраны. Интерферограммы получены при фазовых сдвигах - 0° , 120° , 240° .

С целью определения поля прогибов полупроводниковых кремниевых мембран были проведены исследования полей прогибов в широком диапазоне давлений. Эти исследования необходимы при проектировании и производстве кремниевых интегральных тензопреобразователей. Расчетные методы описывают лишь малые прогибы в области линейной зависимости прогибов от приложенных давлений. В нелинейной области получение данных по определению прогибов затруднено. Существующие экспериментальные методы позволяют регистрировать прогиб только в центре мембраны. Подсчет механических напряжений в связи с этим сопряжен со значительными трудностями.

Для определения формы прогибов мембраны использовался интерферометр Тваймана-Грина, в опорном плече которого помещалось зеркало, закрепленное на пьезокерамике для задания фазового сдвига. При отражении от оптически чистой поверхности мембраны световой пучок интерферировал с опорным пучком. Исследовались кремниевые мембраны размерами 5x5мм, толщиной около 30мкм плоские и

профилированные, с жестким центром, а также плоские мембраны размером 1x1мм. Для обеспечения зеркального отражения на мембраны напылялся слой алюминия.

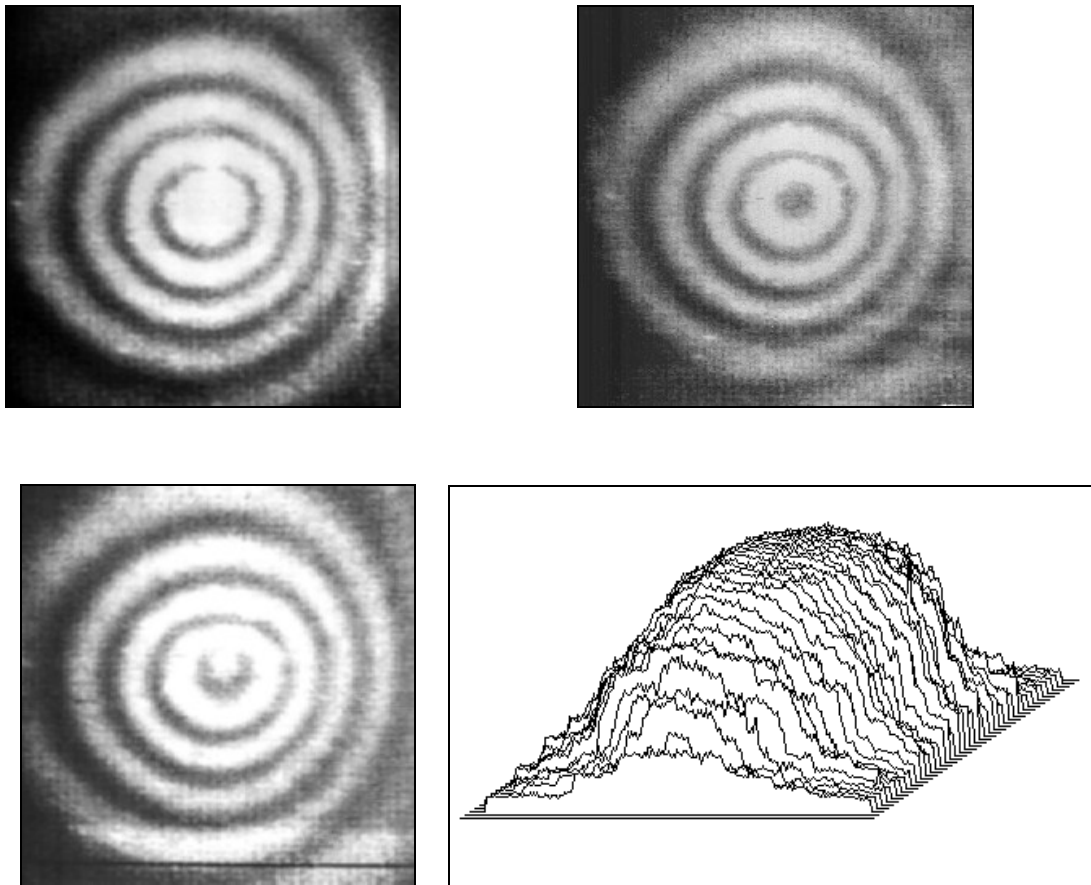


Рис.5.17. Три интерферограммы с фазовым сдвигом 0° , 120° , 240° и график прогиба мембраны от действия нагрузки.

Результаты экспериментов показали, что линейность зависимости прогиба соблюдается до давлений порядка 100Па. Для мембран с жестким центром такой же толщины область линейности расширяется на порядок. При этом распределение прогибов указывает на возможность нетрадиционного (в серединах сторон вблизи края мембран) расположения тензорезисторов. Исследование прогиба кремниевых

мембран позволяет разработать более обоснованный подход к проектированию и изготовлению интегральных тензопреобразователей мембранного типа.

При промышленном изготовлении оптических деталей для контроля поверхности используются пробные стекла. Это вызвано простотой и достаточной эффективностью метода при производстве плоских и сферических поверхностей. Пробные стекла - это стеклянные пластины, одна из поверхностей которых является образцовой.

Эталоны оптических плоскостей изготавливают из стекла, плавленого кварца или из материалов с нулевым коэффициентом расширения. Наиболее часто пробные стекла используют для контроля сферических поверхностей во время полирования. На контролируемую поверхность накладывают эталонную пластину с радиусом кривизны противоположного знака и определяют отклонение от заданного значения, подсчитывая число колец Ньютона. Можно использовать протяженные источники монохроматического света без коллимирующих линз. Применяются натриевые, ртутные, гелиевые лампы. Однако, при соприкосновении с поверхностью контролируемого изделия пробные стекла подвергаются механическим воздействиям и довольно быстро выходят из строя. Поэтому для поддержания производственного процесса необходим достаточный запас эталонов. Изготовление пробных стекол представляет серьезную проблему. При ее решении особенно важно обеспечить процесс измерений с достаточно высокой точностью. Применение метода пробных стекол обеспечивает точность контроля $\lambda/20$, поэтому при изготовлении эталонов необходима более высокая точность.

Для контроля рельефа использовалась система [32, 72], оптическая схема которой представляет интерферометр Тваймана-Грина (рис.5.18).

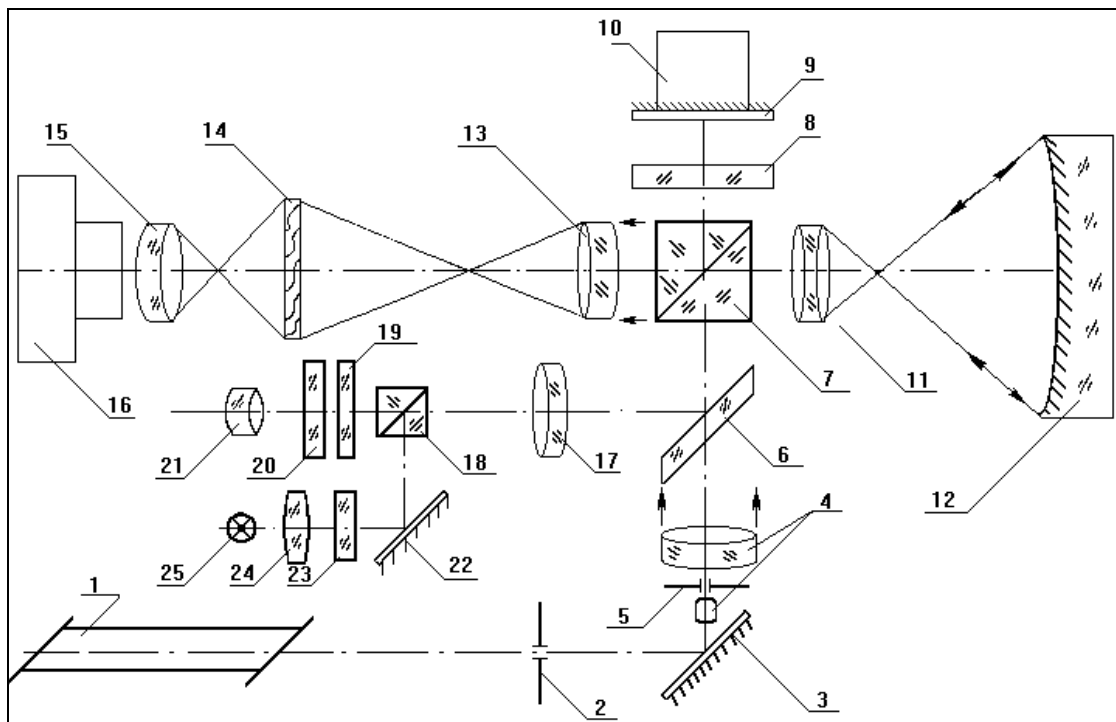


Рис.5.18. Оптическая схема установки для измерения рельефа пробных стекол.

Луч от лазера 1 через систему поворотных зеркал 3 поступает на телескопическую систему 4, служащую для расширения пучка и формирования плоского опорного фронта. Далее расширенный пучок поступает на светоделитель 7, где разделяется на два. Один из них, опорный, попадает на плоское эталонное зеркало 9. Другой с помощью объектива 11, преобразуется в расходящийся пучок и отражается от контролируемой детали 12, а после вторичного прохождения через объектив 11 преобразуется в плоский рабочий пучок. Интерференционная картина переносится в плоскость регистрирующей системы устройства ввода оптических изображений 16. С помощью эталонного зеркала 9, закрепленного на пьезокерамике, вносятся фазовые сдвиги.

Для задания фазового сдвига зеркало, закрепленное на пьезокерамике,

помещалось в опорное плечо интерферометра. Для ввода интерферограмм использовалось устройство на основе телевизионной камеры КТ-М с разрешением 512x512 точек с 256 уровнями квантования. Расшифровка проводилась по алгоритмам, описанным в Главе 2. Полная фаза определялась методом развертки /23/ с использованием двумерной структуры поля. Сначала определялись зоны, в которых фаза плавно менялась в пределах периода. Затем, в зависимости от поведения фазы внутри этих зон, добавлялось или вычиталось целое число периодов.

Система имеет следующие характеристики:

- диапазон изменения от $\lambda/50$ до 10λ ;
- погрешность в точке - $\lambda/50$;
- среднеквадратичное отклонение - $\lambda/100$;
- используемая длина волны - $\lambda=0.633\text{мкм}$.

Система внедрена на НПО «Новосибирский приборостроительный завод».

5.5. Система для определения внеплоскостных деформаций методом цифровой спекл-интерферометрии

В этом разделе рассматривается экспериментальная проверка методики расшифровки цифровых спекл-интерферограмм, основанной на рассмотрении спеклов как информационной части сигнала.

В качестве измеряемого объекта использовалась пластина, один из концов которой был жестко закреплен, другой подвергался нагрузке. Нагрузка осуществлялась с помощью нихромовой нити, нагреваемой током. Величина тока задавалась от компьютера. Схема спекл-интерферометра и структура системы для измерения смещений от нормальных к плоскости объекта нагрузок показана на рис.5.19.

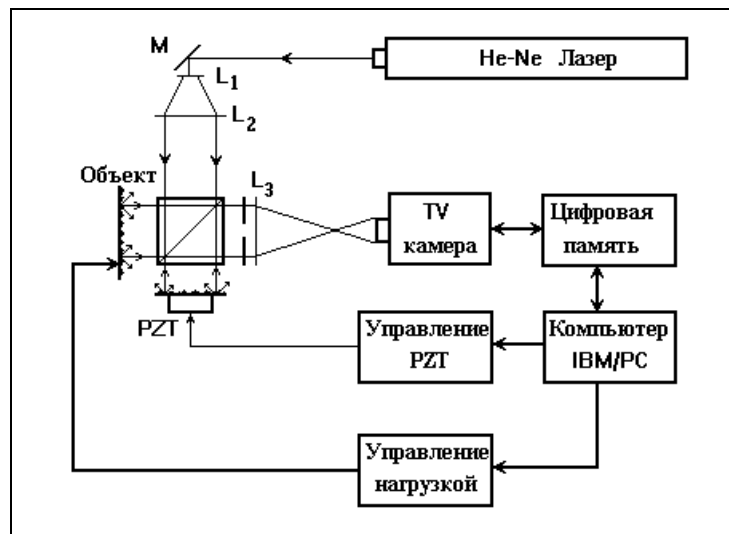


Рис.5.19. Система для измерения нормальных смещений методом корреляционной спекл-интерферометрии.

В качестве источника освещения использовался гелий-неоновый лазер типа ЛГ-38 с мощностью излучения порядка 50 мВт. Световой пучок от

лазера расширялся линзами L_1 , L_2 и попадал на интерферометр Тваймана-Грина, в одном плече которого находилась диффузная поверхность, близкая по отражению к исследуемому объекту, закрепленная на пьезокерамике, в другом исследуемый объект. С помощью апертуры, находящейся перед формирующей изображение линзой L_3 , регулировался размер спеклов. На пьезокерамику подавалось напряжение с цифро-аналогового преобразователя, управляемого от компьютера. Через другой канал ЦАП производилось контролируемое управление нагрузкой.

Изображение фиксировалось телевизионной камерой типа видикон и преобразовывалось в цифровой вид. Используемое устройство ввода оптических сигналов позволяло оцифровывать изображение в темпе телевизионной развертки. Цифровые кадры с размерами 512 на 512 точек с 256 градациями интенсивности записывались в память компьютера типа IBM-PC для дальнейшей обработки. Исследуемая область имела размеры 50x50 мм (рис.5.20).

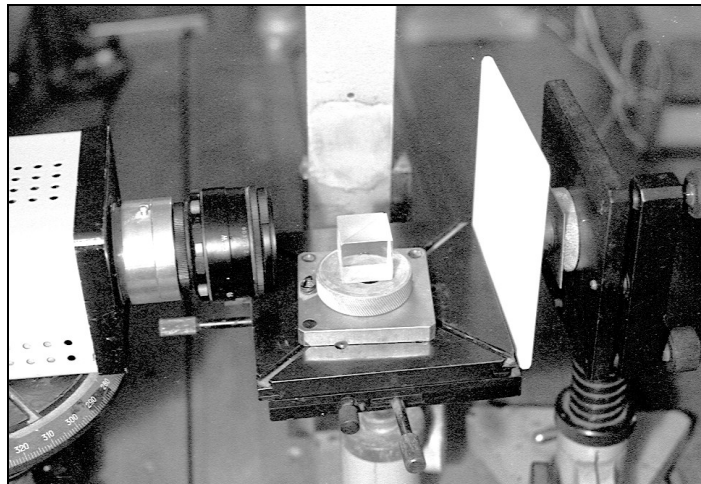


Рис.5.20. Экспериментальная установка.

Перед деформацией опорная поверхность сдвигалась на расстояния,

соответствующие фазовым перемещениям 0 , $\pi/4$, $3\pi/2$. Запоминались изображения, соответствующие сдвигам. Затем объект нагружался, и на пьезокерамику подавалось напряжение, соответствующее $\pi/2$, $3\pi/4$, π . Таким образом, фиксировалось шесть кадров. Вычисление арктангенса дает значение фаз, пропорциональное смещению объекта от нагрузки.

На рис.5.21 а,б,в,г показаны картины корреляционных полос при фазовых сдвигах между опорными пучками 0 , $\pi/2$, π , $3\pi/4$, используемые при расшифровке.

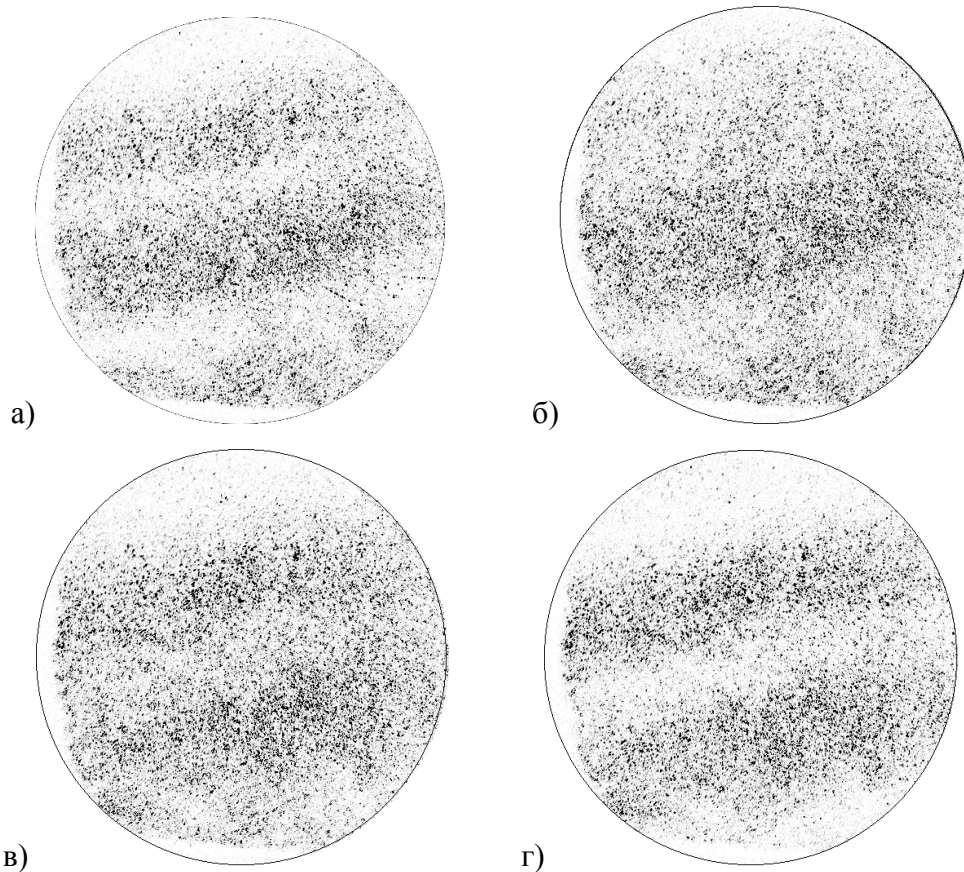


Рис.5.21. Корреляционные полосы при фазовых сдвигах 0 , $\pi/2$, π , $3\pi/4$.

(Негатив)

Использовалась выражение (3-26), полученное в Главе 3, которое учитывает спеклы как информационную часть сигнала.

На рис.5.22 а,б представлены значения фаз, соответствующих смещению поверхности объекта от нагрузки. Вычисления производились по обычной четырехточечной формуле со сглаживанием интерференционных полос и по предложенному нами алгоритму, соответственно.

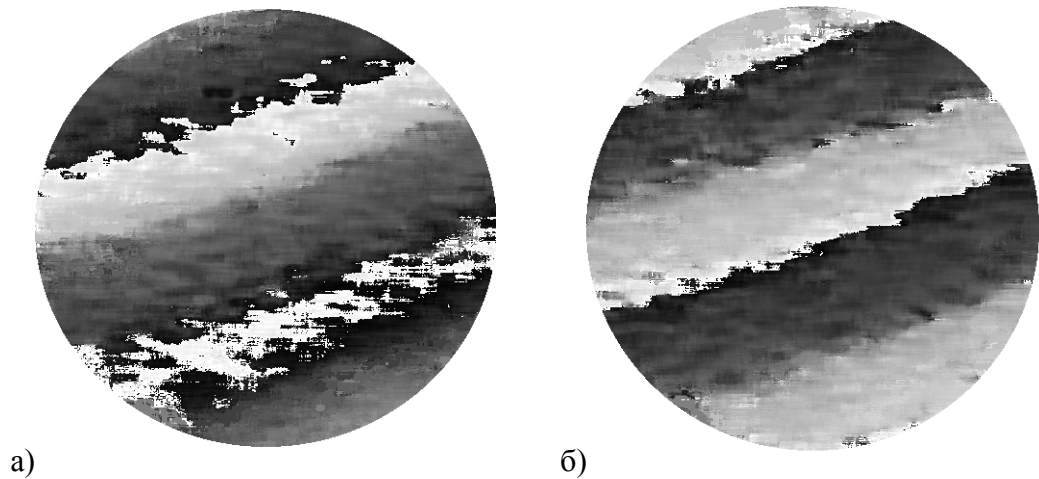


Рис.5.22. Поле фаз при вычислении по формулам (3-11) - рис.5.22а и (3-19) -рис.5.22б.

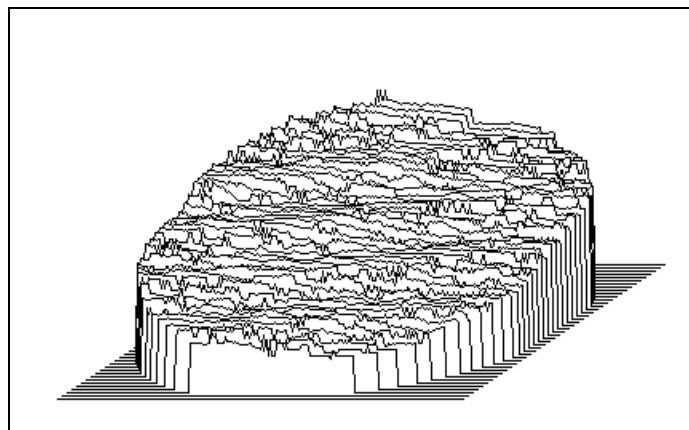


Рис.5.23. Поле фаз после удаления фазовой неоднозначности.

На рис.5.23 показано поле фаз после устранения фазовой неоднозначности.

Сравнение результатов с тестовыми измерениями на голографической системе показало, что точность измерений перемещений точек поверхности при деформации объекта составила не менее $\lambda/20$ - $\lambda/30$. Время получения серии спеклограмм и определения по ним фазового фронта, соответствующему деформации, составило порядка трех минут.

5.6. Разработка измерителя абсолютных линейных перемещений

Основной частью существующих измерителей абсолютных перемещений на основе кодовых оптических линеек, является шкала, состоящая из набора растров. При перемещении подвижной части, на которой закреплено оптическое устройство считывания, относительно неподвижной шкалы в момент пересечения растровых отметок вырабатывается кодовый сигнал, соответствующий определенному перемещению. Каждый растр кодовой шкалы обеспечивает определение одного бита в коде абсолютного перемещения. Количество растров определяется числом состояний, которые должны различаться на заданном диапазоне. Таким образом, при точности измерений порядка 1 мкм и диапазоне до 1 м необходимо 20 двоичных разрядов в коде перемещений. Изготовление шкал с таким количеством растров является технологически сложным процессом. Поэтому измерители абсолютных перемещений на основе кодовых шкал имеют большую стоимость.

Число растров на кодовой шкале можно уменьшить, если из одного растра в каждом положении получать более одного бита информации.

Этого можно достичь, например, использованием оптических дифракционных элементов, обеспечивающих угловое отклонение считывающего светового пучка в каждой точке измерительной шкалы $\approx 83,3^\circ$. Однако изготовление подобных линеек с необходимыми метрологическими свойствами является пока весьма сложным и трудно реализуемым процессом.

Другой возможностью является использование методов специального кодирования измерительных сигналов в модифицированных измерителях относительных перемещений на основе фотоэлектрических растровых

преобразователей. На этом принципе был разработан датчик абсолютных перемещений с использованием метода целочисленного кодирования /37, 41, 42, 46, 67/.

Для определения абсолютного перемещения предлагается использовать фотоэлектрический преобразователь, обеспечивающий считывание синусоидальных и косинусоидальных периодических сигналов различного периода при перемещении подвижной части измерителя относительно неподвижной. Информацию о перемещении можно извлечь из текущей фазы информационного сигнала. Для этого измеряются амплитуды синусного и косинусного сигналов, по которым определяется фаза

$$\varphi = \arctan \frac{A_s}{A_c}, \quad (5-9)$$

где A_s и A_c - амплитуды синусного и косинусного сигналов. Поскольку \arctan периодическая функция, фаза φ может быть определена только в пределах периода. Фаза, соответствующая абсолютному перемещению, определяется суммированием числа полных периодов

$$\Phi = 2\pi n + \varphi, \quad (5-10)$$

где n - число полных периодов. Поэтому, такие приборы называются преобразователями накопительного типа. Величину абсолютного перемещения определяют из следующего выражения

$$X = \frac{\Phi T}{2\pi}. \quad (5-11)$$

Однако процесс накопления часто приводит к ошибкам, вызванным единичными сбоями. Используя аппарат целочисленной арифметики, описанный в Главе 4, можно определять полную фазу по значениям, известным с точностью до периода и определенным в каждой выбранной точке.

При переходе от системы фаз к системе остаточных функций возникают эффекты квантования, рассмотренные в Главе 4. Для их устранения необходимо использовать аналого-цифровые преобразователи с согласованным уровнем квантования. Набор остатков функций с различными периодами позволяет однозначно восстановить абсолютные значения перемещения. Это можно сделать, воспользовавшись теоремой об остатках. При одновременном измерении фазы гармонических сигналов, периоды которых соотносятся как взаимно простые числа, в диапазоне определяемом произведением периодов, набор фаз никогда не повторится. Следовательно, этот набор будет определять одно уникальное значение в этом периоде.

Как было показано в главе 4, диапазон измерения перемещений можно расширить, увеличивая число сравнений при различных модулях либо абсолютные значения модулей. Увеличение абсолютных значений эквивалентно повышению точности измерений.

Таким образом, если одновременно измерять несколько периодических сигналов с разными периодами, то совокупность фаз определяет единственное значение абсолютного перемещения. Например, для нахождения абсолютного перемещения в диапазоне до 1м необходимы три системы сравнений с различными периодами порядка 100мкм. В пределах каждого из периодов необходимо отличать не менее 100 точек.

При использовании четырех растров можно выбрать шкалу с

размерами растров 29, 31, 37, 41. В этом случае точность измерения перемещений должна составить не менее 1 мкм, а диапазон измерений абсолютных перемещений - 1.363 м.

Конкретные значения периодов определяются из условия взаимной простоты чисел, соответствующих периодам, и из технологических условий изготовления оптических линеек.

Возможность получения нескольких взаимосвязанных гармонических функций с различными периодами существует. В настоящее время выпускаются преобразователи линейных перемещений последовательного счета, в которых при перемещении подвижной части относительно неподвижной вырабатываются сигналы близкие к синусоидальной форме.

Принцип работы преобразователя показан на рис.5.24. Общий вид преобразователя на рис.5.25.

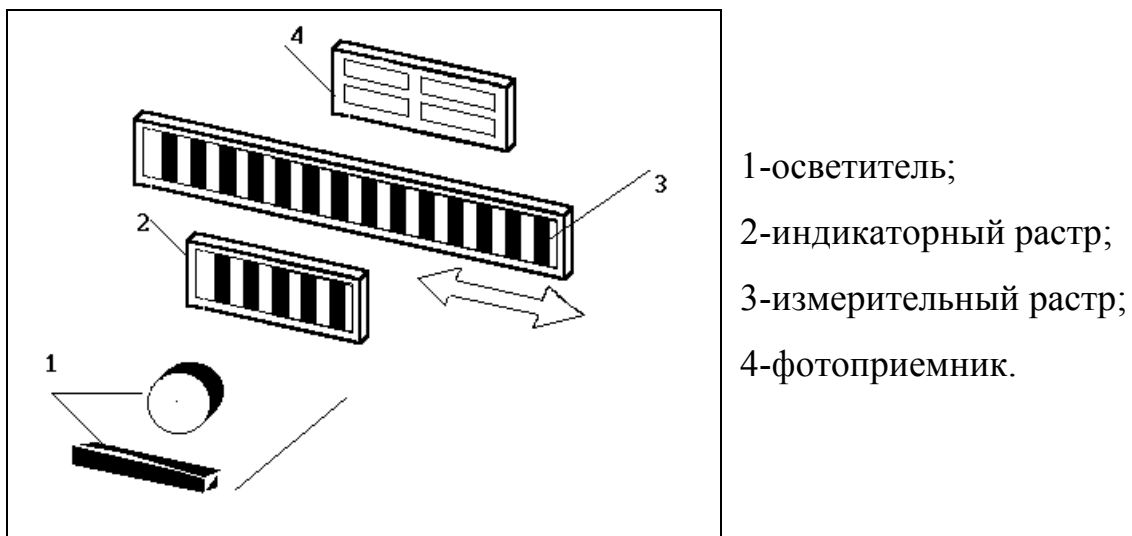


Рис.5.24. Структурная схема преобразователя линейных перемещений.

Свет от осветителя проходит через измерительный и индикаторный растры, расположенные в непосредственной близости друг от друга. Модулированный по амплитуде световой поток поступает на

фотоприемник, который вырабатывает пропорциональный по освещенности фототок.

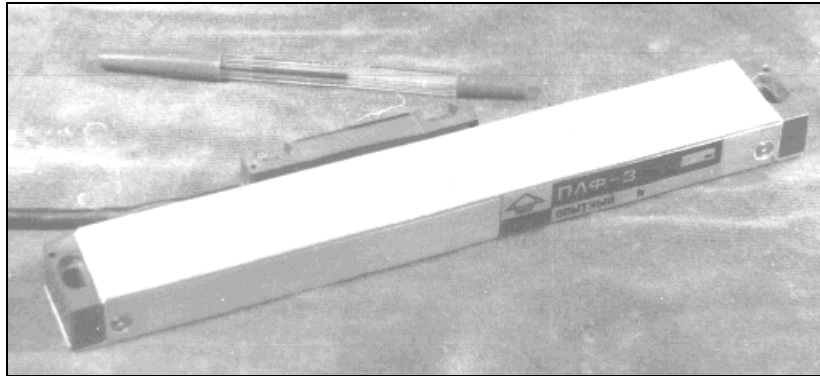


Рис.5.25. Общий вид преобразователя.

Измеритель состоит из подвижной и неподвижной частей. При перемещении измерительной меры относительно индикаторного растра за счет эффекта оптического наложения возникает периодическое изменение интенсивности проходящего света, которое детектируется фотодиодами.

Индикаторный растр и растр на оптической линейке имеют одинаковую форму и представляют собой чередующиеся прозрачные и непрозрачные промежутки равного размера, при этом период растра исследуемого преобразователя был равен 20 мкм. Регистрируемый сигнал при прохождении через растровое сопряжение, выполненное с зазором, величиной около двух растровых периодов, за счет дифракционных эффектов и пространственного усреднения по 100 периодам, приобретает форму, близкую к гармонической /56/.

Интенсивность света считывается с помощью четырех фотодиодов. Фотодиоды сдвинуты друг относительно друга на четверть периода. Фотодиоды, сдвинутые на половину периода, соединяются параллельно по два, для исключения постоянной составляющей сигнала. Таким

образом, с выходов фотодиодов выделяются токовые сигналы синусоидальной и косинусоидальной формы. Выбором соответствующей геометрии и размера растров можно добиться синусоидальной формы сигналов, снимаемых с фотоприемника. Необходимо было проверить качество этих сигналов.

Для измерения точной формы сигнала и исследования метрологических характеристик измерителей линейных перемещений была разработана интерференционная система /42/ (рис.5.26).

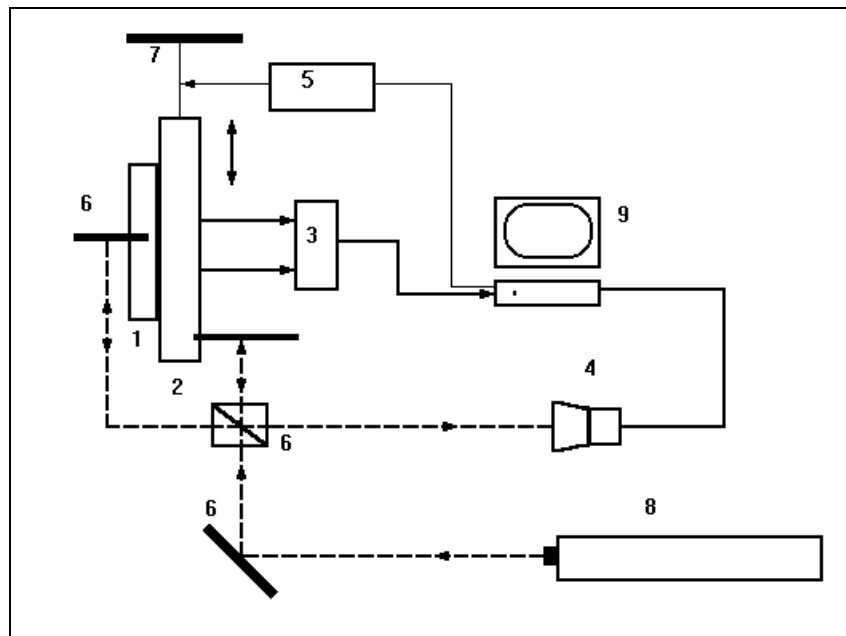


Рис.5.26. Измерительная система для измерения качества сигналов датчика линейных перемещений.

На рисунке штриховыми линиями показан ход оптических лучей.

Используются следующие обозначения:

- 1-неподвижная часть преобразователя линейных перемещений;
- 2-перемещаемая часть;
- 3-аналогово-цифровой преобразователь;
- 4-устройство ввода оптических изображений;
- 5-шаговый двигатель с

устройством управления; 6-зеркала; 7-стальная струна; 8-лазер; 9-компьютер.

Система состоит из интерферометра Тваймана-Грина, интерферирующие пучки в котором отражаются от зеркал, закрепленных на подвижной и неподвижной частях измерителя. Схема построена так, чтобы обеспечить измерение относительных перемещений подвижной и неподвижной частей. Наблюдаемая интерференционная картина имеет структуру параллельных полос с шагом 0.5 длины волны.

Перемещение подвижной и неподвижной частей оптического преобразователя осуществлялось с помощью управляемого от компьютера шагового двигателя, передающего усилие на стальную струну, связанную с подвижной частью линейки. Это позволило вследствие снижения "дребезга" интерференционных полос, вызванного вибрациями шагового двигателя уменьшить измеряемый шаг перемещения до 0.05 длины волны. При этом интерференционные полосы перемещаются пропорционально заданному шаговому двигателем сдвигу.

Интерференционная картина с помощью устройства ввода оптических изображений вводилась в компьютер для контроля за точностью задаваемого перемещения. Использовалось устройство ввода на основе телевизионной камеры с форматом 768x576x8 бит.

Расстояние между полосами определялось выделением пиков после пространственного усреднения по нескольким полосам.

Аналоговый сигнал с выхода измерителя поступал на вход двухканального 12-разрядного аналогово-цифрового преобразователя для регистрации в компьютере синусоидального и косинусоидального сигнала с выхода датчика. В компьютере производилось цифровое сравнение значения сигналов с преобразователя со значениями перемещений, полученных в интерферометре.

Экспериментальная установка обеспечивала измерения амплитуды информационных сигналов синуса и косинуса с разрешением 4096 отсчетов. При этом линейная погрешность измерений перемещений составляла около 0.05 мкм. Для устранения влияний внешних факторов на повторяемость результатов измерений были приняты специальные меры по температурной стабилизации установки, исключению турбулентности воздушной среды и защите от вибраций.

В результате исследований было установлено, что форма выходных сигналов близка к гармонической. Разброс значений фаз информационного сигнала для взаимно соответствующих точек периода на измеряемой длине линейки 150 мм, составляет не более 0.5%. Это соответствует возможности использования 200 отсчетов на измеряемом периоде 20 мкм. Такая повторяемость является достаточной для реализации алгоритма целочисленного кодирования. Таким образом, серийно изготавливаемые измерители линейных перемещений имеют характеристики, достаточные для изготовления на их основе измерителей абсолютных перемещений.

Измеритель абсолютных перемещений может быть изготовлен на основе преобразователей накопительного типа. Схема измерителя показана на рис.5.27.

Устройство работает следующим образом. Свет, излучаемый осветителем 3, проходит через измерительный 1 и индикаторный 2 растры, расположенные в непосредственной близости. Модулированный по амплитуде световой поток поступает на фотоприемник 4, который вырабатывает пропорциональный по освещенности фототок. Фототок поступает на вход АЦП 5, где преобразуется в цифровой код, который поступает в блок целочисленной обработки 6, где производится расчет перемещения и выдача результатов в блок индикации 7.

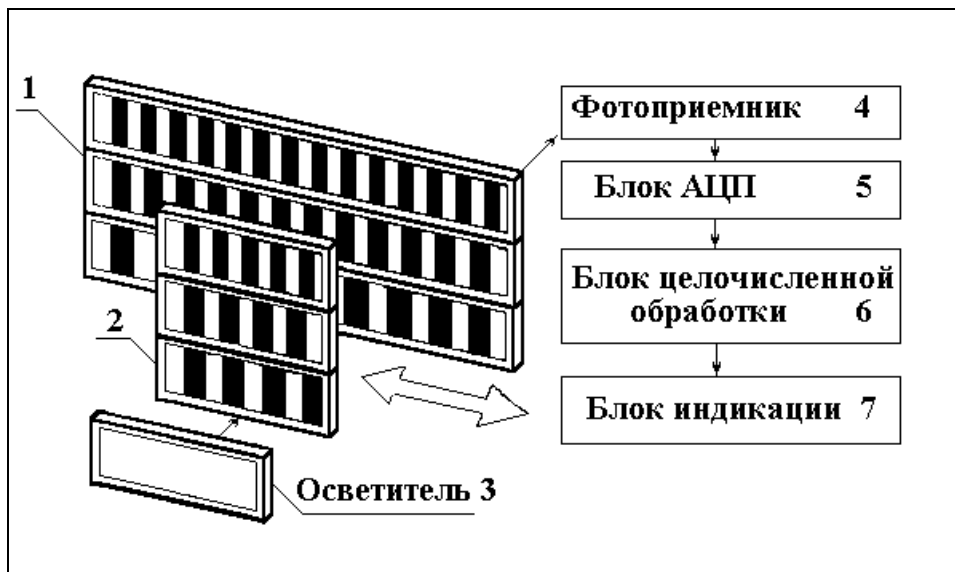


Рис.5.27. Структурная схема измерителя абсолютных перемещений.

1-шкала измерительных растров; 2-шкала индикаторных растров;
 3-осветитель; 4-фотоприемник; 5-аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); 6-блок целочисленной обработки;
 7-блок индикации.

Предложенный измеритель имеет, в отличие от других существующих измерителей абсолютных перемещений, более простую конструкцию за счет уменьшения количества растровых шкал. В отличие от преобразователей последовательного счета не требуется накопления значений, определенных на предыдущих шагах, используются лишь локальные измерения. Кроме того, определение абсолютного перемещения производится по измерениям в одной точке шкалы. Нет никакой связи со скоростью перемещения, поэтому достоверность и скорость измерения существенно увеличиваются.

5.7. Выводы

1. На основе разработанных методов расшифровки созданы интерференционные измерительные системы для экспериментальных исследований образцов, как с зеркальной, так и с диффузной поверхностью.

2. При использовании серийных интерферометров, не позволяющих вводить дополнительные оптические элементы для внесения фазового сдвига, использовались традиционные алгоритмы расшифровки на основе выделения центров полос или на основе частотного анализа.

3. Использование алгоритмов на основе внесения управляемого фазового сдвига требует модификации схем оптических установок. При этом процесс измерения становится полностью автоматическим. Погрешность измерений составляет 1/100 часть длины волны лазерного источника освещения.

4. Методы расшифровки на основе управляемого сдвига используются как для измерения рельефа объектов с оптически чистой поверхностью с помощью классических интерферометров, так и для исследования напряженно-деформированного состояния объектов с диффузной поверхностью методом голографической интерферометрии.

5. Спекл-интерференционные системы, разработанные на основе предложенных алгоритмов расшифровки с анализом информационной составляющей спекл-структуры, позволяют обеспечить точность, сравнимую с интерференционными измерениями.

6. Предложенные методы устранения фазовой неоднозначности на порядок расширяют диапазон измерений при сохранении интерференционной точности.

7. Разработанное аппаратное и программное обеспечение позволяет

использовать как традиционные методы расшифровки, так и методы на основе новых предложенных алгоритмов.

Заключение

В соответствии с целями исследований, в диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Разработаны методы повышения точностных характеристик интерференционных измерений, основанные на новых способах расшифровки интерферограмм, корректирующих линейные, нелинейные и случайные ошибки при задании пошагового фазового сдвига.

Коррекция линейных ошибок достигается с помощью усреднения по полю приращений сдвигов, определяемых при пошаговом смещении референтной фазы. Коррекция нелинейных и случайных ошибок осуществляется через определение экстремума минимаксной функции по полю.

2. Разработаны методы повышения точностных характеристик в спекл-интерферометрии, основанные на введении пошагового фазового сдвига и анализе модельных уравнений, описывающих процесс образования спеклограмм. Чувствительность спекл-интерферометрических измерений при этом приближается к уровню, достигаемому в голографической интерферометрии.

3. Разработан метод повышения динамического диапазона интерференционных измерений, основанный на полихроматической интерферометрии с не кратными ценами интерференционных полос, за счет чего область фазовой однозначности увеличивается на порядок. Проведен анализ погрешностей, разработаны быстрые алгоритмы коррекции ошибок, возникающих в процессе измерений фазовых полей.

4. Разработан абсолютный измеритель перемещений. Работа измерителя основана на целочисленном алгоритме устранения фазовой неоднозначности. Это позволило повысить метрологические параметры

устройства и значительно упростить его конструкцию. При использовании всего трех шкал возможный диапазон измерения абсолютных перемещений более 1 м.

5. Разработано методическое, алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированных интерференционных измерительных систем. Методики расшифровки и обработки интерферограмм реализованы в виде универсального программного комплекса, который является аппаратно независимым и может использоваться при разработке измерительных систем, предназначенных для решения широкого круга задач. Предложенные методы, технические решения, алгоритмическое обеспечение создали основу для построения нового типа интерференционных измерительных систем на уровне лучших мировых образцов, являющихся более простыми, дешевыми и надежными. Использование интерференционных измерительных систем в условиях реального производства показало их высокую эффективность.

Список использованной литературы

1. Александров Е.Б., Бонч-Бруевич А.М. Исследование поверхностных деформаций с помощью голограммной техники// ЖТФ.- 1967.- Т.37.- Вып.2.- С.360-367.
2. Бакут П.А., Троицкий И.Н., Демин А.А., Сафронов А.Н. Современное состояние фазовой проблемы в оптике// Зарубежная радиоэлектроника.- 1978.- № 11.-С.3-40.
3. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем- Л., Машиностроение.- 1986.- 223с.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики- М.:Наука.- 1973.- 719с.
5. Вест Ч. Голографическая интерферометрия- М.:Мир.- 1982.- 497с.
6. Виноградов И.М. Основы теории чисел- М: Главная редакция физико-технической литературы изд-ва "Наука".- 1972.- 168с.
7. Витриченко Э.А., Лукин В.П., Пушной Л.А., Тартаковский В.А. Проблемы оптического контроля.- Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние.- 1990.- 351 с.
8. Васильев В.Н., Гуров И.П. Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим сигналам.- СПб.:БХВ - Санкт-Петербург.- 1998.- 240 с.
9. Герасимов С.И., Гужов В.И., Жилкин В.А., Козачок А.Г. Автоматизация обработки интерференционных картин при исследовании полей деформаций// Заводская лаборатория.-1985.- №4.-С.77-80.
10. Гильберт Д., Кон_Фоссен С. Наглядная геометрия.-М.Наука.- 1981.- 344с.
11. Голографические измерительные системы. Вып.1 /Под ред. Козачка А.Г.- Новосибирск.-1976.- 100с.

12. Голографические измерительные системы. Вып.2 /Под ред. Козачка А.Г.- Новосибирск.-1978.- 160с.
13. Голографические измерительные системы. Вып.3 /Под ред. Козачка А.Г.- Новосибирск.-1980.- 126с.
14. Голографические неразрушающие исследования/Под ред. Эрф Р.К. - М.: Машиностроение.- 1979.- 448с.
15. Гужов В.И., Дружинин А.И. Программно-аппаратный комплекс сопряжения устройства микрофильмирования "КАРАТ" с ЭВМ в голографической измерительной системе// Голографические измерительные системы. Вып.3/ Новосибирск.- 1980.- С.93-100.
16. Гужов В.И., Дружинин А.И., Козачок А.Г., Логинов А.В. Измерительно-вычислительная система для анализа напряженно-деформированного состояния объектов// Автометрия.-1982.- №4.-С.102-103.
17. Гужов В.И., Дружинин А.И., Козачок А.Г. и др. Некоторые вопросы использования мини и микро-ЭВМ в системах автоматизации обработки когерентно-оптической информации// Автоматизация научных исследований/ Материалы 16 Всесоюзной школы по автоматизации научных исследований.- Горький.-1982.-С.43-46.
18. Гужов В.И., Дружинин А.И., Логинов А.В., Сарнадский В.Н. и др. Исследование возможности использования системы автоматизации обработки оптической информации для решения задач фазометрии// Отчет о научно-исследов. работе.- Гос.рег. №У000197.-Новосибирск.- 1983.-236с.
19. Гужов В.И., Родионов В.А Система создания и редактирования трехмерных сцен// Системы автоматизации обработки оптической информации/ Новосибирск.-1984.-С.106-111.

20. Гужов В.И., Родионов В.А. Цифровое моделирование оптических систем для фазометрии// Системы автоматизации обработки оптической информации/ Новосибирск.-1984.-С.112-121.
21. Гужов В.И., Денисюк С.Г., Дружинин А.В., Логинов А.В. и др. Разработка и исследование комплекса программно-аппаратных средств для фазометрии в оптическом диапазоне длин волн// Отчет о о научно-исследов. работе.- Гос.рег. № У07908.- Новосибирск.- 1984.- 184с.
22. Гужов В.И., Тимшин А.В., Цигуткин В.И. Специфика цифровой обработки голографических интерферограмм в системах с управляемым фазовым сдвигом// Автоматизация научных исследований/ Тезисы докладов 19 Всесоюзной школы.- Новосибирск: ИАЭ СО АН СССР.- 1985.- С.169.
23. Гужов В.И., Тимшин А.В. Устранение фазовой неопределенности при расшифровке голографических интерферограмм// Интерференционно-оптические методы механики твердого тела и механики горных пород/ Тезисы докладов Всесоюзного семинара.- Новосибирск: ИГД СО АН СССР.- 1985.-С.141.
24. Гужов В.И., Лопарев Е.Г., Солодкин Ю.Н. Автоматизация получения, обработки и расшифровки спекл-интерферограмм// Интерференционно-оптические методы механики твердого тела и механики горных пород/ Тезисы докладов Всесоюзного семинара.- Новосибирск: ИГД СО АН СССР.- 1985.-С.142.
25. Гужов В.И., Козачок А.Г., Жилкин В.А., Герасимов С.И. Автоматизация обработки оптической информации, получаемой с использованием голографических накладных интерферометров// Тезисы докладов Пятой Всесоюзной конференции по голографии. Часть 2.- Рига.- 1985.- С.321-322.

26. Гужов В.И., Козачок А.Г., Лопарев Е.Г., Орлов М.Г., Чернобровин В.В. Голографическая измерительная система для определения поля разности фаз методом контролируемого фазового сдвига// Автометрия.- 1986.- №2.- С.116-118.

То же в:

Guzhov V.I., Kozachok A.G., Loparev E.G., Orlov M.G., Chernobrovin V.V. Holographic measurement system for detemining a phase difference field through the insertion of a controlled phase shift// Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- 1986.- No.2.- P.123-125.

27. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Способ определения разности фаз. - Заявка 4087285. А.с. № 1357712, 1986, БИ.- №45.- 1987.
28. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н., Тимшин А.В., Чернобровин В.В., и др. Анализ и исследование возможности информационно-вычислительного комплекса в интерферометрах с контролируемой обратной связью// Отчет о о научно-исследов. работе.- Гос.рег. № У42700.- Новосибирск.- 1987.- 83с.
29. Гужов В.И. Разработка и исследование когерентно-оптических измерительных систем для определения фазовых характеристик волновых полей.- Диссертация на соискание ученой ст. к.т.н.- Новосибирск.- 1987.- 160с.
30. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Использование свойств целых чисел для расшифровки интерферограмм// Оптика и спектроскопия.- 1988.- т.65.- вып.5.- С.1123-1128.
31. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Оценка точности целочисленного интерферометра// Оптика и спектроскопия.- 1988.- т.65.- вып.6.- С.1313-1316.
32. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н., Тимшин А.В., Чернобровин В.В., Ягнокова Т.В. Разработка и исследование когерентной измерительной системы с

управляемым фазовым сдвигом для автоматизированного контроля формы высокоточных оптических поверхностей// Отчет о НИР о научно-исследов. работе.- Гос.рег. №У28465.- Новосибирск.- 1988.- 97с.

33. Гужов В.И., Котарский Б.С. Влияние разрядности при квантовании интенсивности на погрешность определения фазы в системах с управляемым фазовым сдвигом// Автометрия.- 1990.- №2.- С.70-72.

То же в:

Guzhov V.I., Kotarskii B.S. Effect of number of intensity quantization levels on the error in the phase determination in systems with a controllable phase shift// Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- 1990.- No.2.- P.72-74.

34. Гужов В.И., Цигуткин В.И. Расшифровка сдвиговых интерферограмм в системах контроля формы оптических поверхностей// Методы и применение голографической интерферометрии/ Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума.- Куйбышев.- 1990.- С.28.

35. Гужов В.И., Кузнецова И.В., Тимшин А.В., Солодкин Ю.Н., и др. Разработка и изготовление цеховой системы для контроля плоскостных оптических элементов// Отчет о о научно-исследов. работе.- Гос.рег. № У53123.- Новосибирск.- 1990.- 80с.

36. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Способ определения разности фаз световых волн. - А.с. № 1619033, 1990- БИ.-№1.-1991.

37. Гужов В.И., Кузнецова И.В., Солодкин Ю.Н. Интерференционное устройство для измерения перемещений объектов. - А.с. № 1663416, 1991.- №26.- 1991.

38. Гужов В.И., Подъяков А.Е., Солодкин Ю.Н., Штейнгольц З.И. Восстановление фазы волнового фронта на основе одномерного преобразования Фурье// Автометрия.- 1992.- №6.- С.21-24.

То же в:

Guzhov V.I., Pod'yakov A.E., Solodkin Yu.N., Shteingolts Z.I. Reconstruction of a wavefront phase using a one-dimensional fourier transform// Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- 1992.- No.6.- P.20-22.

39. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах// Автометрия.- 1992.- №6.- С.24-30.

То же в:

Guzhov V.I., Solodkin Yu.N. The accuracy of determining the total phase difference in integer interferometers// Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- 1992.- No.6.- P.23-28.

40. Гужов В.И., Козачок А.Г., Цигуткин В.И. Автоматизация обработки интерферограмм в когерентно-оптических измерительных системах// Проблемы электротехники. Автоматика/ Тезисы докладов конференции с международным участием.- Новосибирск.- НГТУ.- 1993.- С.59-61.

41. Гужов В.И. Разработка измерителей линейных перемещений на основе растровых оптических линеек// Измерения, контроль и автоматизация производственных процессов/ Тезисы докладов 3 Международной конференции-Т.1,ч.1.- Барнаул.- 1994г.- С.173.

42. Гужов В.И., Нечаев В.Г., Корнев В.М., Штейнгольц З.И. Измерение абсолютных перемещений на основе растровых оптических линеек с целочисленным кодированием// Автометрия.- 1995.- №1.- С.77-81.

То же в:

Guzhov V.I., Nechaev V.G., Kornev V.M., Shteingolts Z.I. Measuring absolute displacements on the basis of raster gratings on glass with integer coding // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- 1995.- No.1.- P.70-73.

43. Гужов В.И. Практические аспекты измерения фазы в интерферометрии// Автометрия.- 1995.- №5.- С.25-31.

То же в:

Guzhov V.I. Practical aspects of phase measurement in interferometry// Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- 1995.- No.5.- P.23-28.

44. Гужов В.И. Измерение фазовых характеристик оптических волновых фронтов методом сдвиговой интерферометрии// Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета/ Новосибирск: НГТУ. -1995.- №2.- С.125-131.

45. Гужов В.И. Использование теоремы об остатках для устранения фазовой неоднозначности// Второй Сибирский Конгресс по Прикладной и Индустриальной Математике.- Новосибирск.- 1996.-С.217.

46. Гужов В.И., Нечаев В.Г. Измеритель абсолютных перемещений. Патент №2097685. G01 В 11/00. Приоритет изобретения 13.05.1996.-№33.-1997.

47. Гужов В.И., Козачок А.Г., Нечаев В.Г. Измерение деформаций диффузных поверхностей методом цифровой спекл-интерферометрии// Оптический журнал.-1996.- №10.-с.73-76

48. Гужов В.И., Нечаев В.Г., Мишина Е.М. Коррекция нелинейных ошибок задания начальной фазы при расшифровке интерферограмм методом пошагового сдвига// Автометрия.- 1997.- №4.- С.35-42.

То же в:

Gushov V.I., Nechaev V.G., Mishina E.M. Correction of nonlinear errors of initial phase setting in interferogram decoding by phase shifting interferometry// Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- 1997.-No.4.

49. Гужов В.И. Расширение области фазовой однозначности при интерференционных измерениях// Автометрия.- 1998.-№3.-С.99-107.

То же в:

Guzhov V.I. Extension of phase unambiguety region in interference measurements// Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- 1998.-№3.-P.80-87.

50. Гужов В.И. Коррекция ошибок при восстановлении полной фазы по системе остаточных функций// Третий Сибирский Конгресс по Прикладной и Индустриальной Математике.- Новосибирск.- 1998.

51. Гурьев Л.П., Кунов В.М., Нечаев В.Г. Устройство ввода голографических интерферограмм в ЭВМ// Голографические измерительные системы/ Новосибирск.- 1976.- С.93-99.

52. Гурьев Л.П., Гужов В.И., Де С.Т. и др. Универсальная измерительно-вычислительная система для обработки голографических изображений// Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ/ Материалы 6 Всесоюзной конференции.- Новосибирск: ИАЭ СО АН СССР.-1981.- С.122-123.

53. Де С.Т., Козачок А.Г., Логинов А.В. и др. Универсальный ионный газовый лазер// Материалы Всесоюзной конференции «Использование оптических квантовых генераторов в современной технике».- Л.:ЛДНП.- 1975.- С.90-91.

54. Де С.Т., Козачок А.Г., Логинов А.В., Солодкин Ю.Н. Измерение параметров рельефа поверхностей методом двухдлинноволновой голографической интерферометрии// Голографические измерительные системы/ Новосибирск.- 1976.- С.23-30.

55. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия- М.: Мир.- 1986.-328с.

56. Дюрели А., Паркс В. Анализ деформаций с использованием муара- М.: Мир.-1974.-359с.
57. Жилкин В.А., Герасимов С.И. О возможности изучения деформированного состояния изделий с помощью накладного интерферометра// Журнал технической физики.- 1982.-Т.51.- №10.- С.2079-2085.
58. Зайдель А.Н. Ошибки измерения физических величин.- Л.:Наука.- 1974.- 97с.
59. Звело О. Физика лазеров.- М.: Мир.- 1979.- 373с.
60. Интерферометры ИТ-200, ИТ-200А, ИТ-200В.// Техническое описание и инструкция по эксплуатации.- Л.:ЛОМО.- 17с.
61. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. Т.2 - М.:Мир.- 1977.-724с.
62. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия.- М.:Наука.- 1979.- 136с.
63. Козачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике- М.: Машиностроение.- 1984.- 176с.
64. Козачок А.Г. Голографические измерительные системы.- Диссертация на соискание уч. ст. д.т.н.- Киев.- 1989.- 36с.
65. Козачок А.Г., Гужов В.И., Цигуткин В.И. Разработка методов и технических средств для систем цифровой обработки сигналов в ИК-диапазоне// Высшая школа России и конверсия/ Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции.- Москва: ГК РФ по высшему образованию.-1993.-С.193-194.
66. Козачок А.Г., Солодкин Ю.Н., Гужов В.И., Цигуткин В.И., Котарский Б.С. Разработка и исследование методов расшифровки голографических интерферограмм, использующих математический

- аппарат многомодульной арифметики// Отчет о о научно-исследов. работе.- Гос.рег. № 01.920005753.-Новосибирск.- 1993.- 29с.
67. Козачок А.Г., Гужов В.И., Нечаев В.Г. Разработка и исследование абсолютных преобразователей линейных перемещений с кодированием на основе целочисленной теоремы об остатках// Измерительные информационные системы/ Тезисы докладов Международной конференции.- Москва: Международное научно-техническое общество приборостроителей и метрологов.- 1994.- С.40-42.
68. Козачок А.Г., Гужов В.И., Нечаев В.Г., Котарский Б.С., Тарновский А.В. Разработка и исследование алгоритмов, методов и технических средств цифрового представления, сжатия и организации полутонных изображений в информационных картографических системах// Отчет о о научно-исследов. работе.- Гос.рег. № г.р. 02.9.40 004672.- Новосибирск.- 1994.- 44с.
69. Козачок А.Г., Гужов В.И., Нечаев В.Г., Котарский Б.С., Тарновский А.В. Разработка и исследование когерентно-оптических методов измерения и контроля деформаций, вибраций и формы поверхности объектов больших размеров сложной формы// Отчет о о научно-исследов. работе.- Гос.рег. №02.9.50 000181.- Новосибирск.- 1994.- 92с.
70. Козачок А.Г., Гужов В.И., Нечаев В.Г., Котарский Б.С., Мишина Е.М. Разработка и исследование автоматизированных систем определения полей смещений и деформаций на поверхности деформируемых диффузно-отражающих объектов средствами цифровой спекл-интерферометрии// Отчет о научно-исследов. работе.- Гос.рег. № 01.9.40 009101.- Новосибирск.- 1996.- 51с.
71. Кольер Р. Дж., Беркхард С.Б., Лин Л.Х. Оптическая голография- М.: Мир.- 1973.- 688с.

72. Корнев В.М., Гужов В.И., Солодкин Ю.Н., Штейнгольц З.И. Использование управляемого фазового сдвига для определения рельефа поверхности// Методы контроля формы оптических поверхностей/ Тезисы докладов Всесоюзного семинара.- М.:МДНТП.- 1989.
73. Карпюк Б.В., Солодкин Ю.Н. Анализ погрешностей измерения фазы интерферометров с управляемым фазовым сдвигом // Автометрия.- 1992.-№6.-С.16-21.
74. Малеев Н.М., Павликов А.И. Стабилизация мощности ионного газового ОКГ// Голографические измерительные системы. Вып.2/ Новосибирск.- 1978.- С.100-1006.
75. Мэйтлэнд А. Введение в физику лазеров- М.:Глав.ред.физ.- мат.литературы.- 1978.- 408с.
76. Островский Ю.И. Голография и ее применение- Л.: Наука.- 1973.-180с.
77. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия- М. :Наука.- 1977.- 339с.
78. Оптическая голография/ Под.ред. Г.Колфилда: Пер. с англ.- М.:Машиностроение.- 1985.- 400с.
79. Ореб, Браун, Харихарен. Система с микроЭВМ для сбора и обработки цифровой информации// Приборы для научных исследований.- 1982.- №5.- С.153-155.
80. Островский Ю.И., Шепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций.- М.:Наука.- 1988.-248с.
81. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций.- М.: Наука.- 1975.- 704с.
82. Применение спекл-интерферометрии для контроля качества промышленных изделий: Методические указания.- Горький: ВНИИНМАШ Гф.- 1980.- 137с.

83. Преснухин Л.Н., Шаньгин В.Ф., Майоров С.А., Меськин И.В. Фотоэлектрические преобразователи информации.- М.: Машиностроение.- 1974.- 375с.
84. Прэтт У. Цифровая обработка изображений.-М.: «Мир».-1982.- Кн.1.-312с.
85. Сарнадский В.Н. Использование рекуррентного цифрового фильтра при обработке голографических изображений// Голографические измерительные системы/ Новосибирск.- 1980.- С.100-106.
86. Сарнадский В.Н. Произвольно ориентированный цифровой низкочастотный фильтр для обработки изображений, реализуемый на микроЭВМ// Системы автоматизированной обработки изображений/ Новосибирск.- 1984.- С.158-173.
87. Системы автоматизированной обработки изображений/ Под ред. Козачка А.Г.- Новосибирск.- 1984.- 177с.
88. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций.- М.: Наука.-1975.- 704с.
89. Франсон М. Голография- М.: Мир.- 1972.- 248с.
90. Франсон М. Оптика спеклов.- М.:Мир.-1980.-171с.
91. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы- М:Энергия.- 1974.- 320с.
92. Цапенко М.П. Развитие измерительных информационных систем// Приборы и системы управления.- 1978.- №8.- С.4-6.
93. Ai C., Wyant J.C. Effect of piezoelectric transducer nonlinearity on phase shift interferometry// App.Opt.- 1987.- V.26.- No.6.- P.1112-1116.
94. Andresen K. Displacement and strain calculation by the phase shift method// App.Opt.- 1987.- V.26.- No 14.- P. 2747-2751.
95. Andresen K., Klassen D. The Phase Shift Method Applied to Cross Grating Moire Measurement// Opt.& Lasers in Engineering.- 1987.- No.7.- P.101.

96. Aparicio J.A., Molpeceres J.L., A.M. de Frutos, C. de Casto, Caceres S., Frechoso F.A. Improved algorithm for the analysis of holographic interferograms// *Optical Engineering*.-1993.- Vol.32. -No.5.- P.963-969.
97. Bruning J.H., Herriot D.R., Gallagher J.E., Rosenfeld D.P., White A.D., Brangaccio D.J. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses// *Applied Optics*.- 1974.- V.13.- No.11.- P.2693-2703.
98. Carre P. Installation et utilisation du comparateur photoelectrique et interferential du Bureau International des Poids et Mesures// *Metrologia*.- 1966.- V.2.- No.1.- P.13-23.
99. Chiglia D., Mastin G., Romero L. Cellular automate method for phase unwrapping// *Opt.Soc.Am.A*.- 1987.- No.4.- P.267-280.
100. Cheng Y.-Y., Wyant J.C. Two-wavelength phase shifting interferometry// *Appl.Opt*.- 1984.- V.23.- P.4539.
101. Cheng Y.-Y., Wyant J.C. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry// *Appl.Opt*.- 1985.- V.24.- No.18.- P.3049-3052.
102. Cochran E.R., Creath K. Combining multiple-subaperture and two-wavelength techniques to extend the measurement limits of an optical surface profiler// *Appl.Opt*.- 1988.- V.27.- No.10.- P.1960-1966.
103. Crane R. Interference phase measurement// *Applied optics*.- 1969.- V.8.- No.3.- P.538-542.
104. Creath K. Phase-shifting speckle interferometry// *Applied Optics*.- 1985.- V.24.- No.18.- P.3053-3058.
105. Creath K., Cheng Y.-Y., Wyant J.C. Contouring aspheric surfaces using two-wavelength phase-shifting interferometry// *Optica Acta*.- 1985.- V.32.- No.12.- P.1455-1464.
106. Creath K., Wyant J.C. Direct phase measurement of aspheric surface contours// *Proc.SPIE*.-1986.-V.645.-P.101-106.

107. Creath K. Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry// *Appl.Opt.*- 1987.- V.26.- No.14.- P.2810-2816.
108. Creath K. Phase-measurement interferometry techniques// *Progr. in Optics*, E.Wolf, ed./ Elsevier Science Publishers, Amsterdam.- 1988.- V.XXVI, P.349-393.
109. Creath K. Holographic contour and deformation measurement using a 1.4 million element detector array// *Appl.Opt.*- 1989.- V.28.- No.11.- P.2170-2175.
110. Dan X., Gong Y., Wang S. Image processing method for speckle pattern fringe analysis based on a microcomputer// *Optical Engineering.*- Vol.32.- No.6.- P.1344-1347.
111. Dandliker R., Thalmann R., Willemin J.F. Fringe interpolation by two-reference-beam holographic interferometry: reducing sensitivity to hologram misalignment// *Optics Communications.*- 1982.- V.42.- No.5.- P.301-306.
112. H.Diao, Y.Zou, H.J.Tiziani Design consideration of a dual-beam ESPI optical system for contouring// *Optic.*- 1993.- Vol.93.- No.2.- P.45-51.
113. Dirckx J.J.J., Decraemer W.F., Dielis G. Phase shift method based on object translation for full field automatic 3-D surface reconstruction from moire topograms// *Appl.Opt.*- 1988.- V.27.- No.6.- P.1164-1169.
114. Dirckx J.J.J., W.F.Decraemer Automatic calibration method for phase shift shadow moire interferometry// *Applied Optics.*- 1990.- V.29.- No.-10.- P.1474-1476.
115. Dorband B., Tiziani H.J. Testing aspheric surfaces with computer-generated holograms: analysis of adjustment and shape errors// *Applied Optics.*-1985.- V.24.-No.16.-P.2604-2611.

116. Dorrio B.V., Doval A.F., Lopes C., Soto R., Blanco-Carcia J., Fernander J.L. Fizean pase-measuring interferometry using the moire effect// *Applied Optics*.-1995.- V.34.- No.19.- P.3639-3643.
117. Fercher A.F., Vry U. Two-wavelength speckle interferometric technique for rough surface contour measurement// *Optical Engineering*.- 1986.- V.25.- No.5.- P.623-626.
118. Fischer D., Golub G., Haid O., Leiva C., Widlung O. On Fourier-Toeplitz Method for Seperable Eliptic Problems// *Mathematic of Computation*.- 1974.-V.28.-No.126.-P.349-368.
119. Frost R.L., Rushfoth C.K., Baxter B.S. Fast FFT - based algorithm for phase estimation in speckle imaging// *Applied Optics*.-1980.-v.24.-No.14.- P.4241-4246.
120. Genender M.I., Gushov V.I., Kozachok A.G.,Solodkin Yu.N. Geometric Form Definition of Cosmic Technical Object/ The first Sino-Soviet symposium on astronautical science and technology.Abstacts.- Harbin. China.-1991.-P.31.
121. Greirloff J. Phase unwrapping by regions// *Proc.SPIE*.- 1987.- V.818.- P.2-9.
122. Greivenkamp J.E. Sub-Nyquist interferometry// *Appl.Opt*.-1987.- V.26.- No.24.- P.5245-5258.
123. Greivenkamp J.E., Sullivan K.G., Palum R.G. Resolving interferometric step-height measurement ambiaguities using a priori information// *Optical Engineering*.- 1991.- V.30.- No.11.- P.1821-1824.
124. Peter de Groot Phase-shift calibration errors in interferometers with spherical Fizeau cavities// *Applied Optics*.- 1994.- V.34.- No.16.- P.2856-2863.

125. Peter de Groot Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window// Applied Optics.- 1994.- V.34.- No.16.- P.2856-2863.
126. H.Gugel, G.Hausler, R.Lampalser Phase-measuring triangulation with enhanced measuring range// Optik. Annual report.-1994.-Physikalisches Institut der Universitat Erlangen-Nurnberg.- P.58.
127. G.Gulker, K.Hinsch, C.Holscher, A.Kramer, N.Nennaber. Electronic speckle pattern interferometry system for in situ deformation monitoring on buildings// Optical Engineering.-1990.-V.29.-No.7.-P.816-820.
128. Gushov V.I., Solodkin U.N. Using integer properties for automatic processing of fringe pattern.// Physical Research. Fringe'89. Automatic Processing of Fringe Patterns.-Akademie-Verlag Berlin.-1989.-P.76-78.
129. Gushov V.I., Solodkin Yu.N. Automatic Processing of Fringe Patterns in Integer Interferometers// Optics and Lasers in Engineering.-1991.-No.14.- P.311-324.
130. Gushov V.I., Nechaev V.G. In-plane deformation measurements by digital phase-shifting speckle-interferometry// International Conference Photomechanics'95. Abstracts.- Novosibirsk.-1995.-P.23-24.
131. Gushov V.I., Nechaev V.G. In-plane deformation measurement by digital phase-shifting speckle-interferometry// Proc.SPIE.-1996.-Vol.2791.- P.165-169.
132. Gushov V.I., Kozachok A.G. The analysis of interference fringe with correction of non-linear distortions// Abstract. The first Korea-Russia International Symposium on Science and Technology.- Ulsan, Republic of Korea-1997.-P.77.
133. Halioua M., Krisnamurthy R.S., Liu H.-C., Fu-Pen Chiang Automated 360° profilometry of 3-D diffuse object// Applied Optics.-1985.-V.24.-No.14.- P.2193-2196.

134. Hariharan P., Oreb B.F., Brown N. Digital phase-measurement system for real-time holographic interferometry// *Optics Communication*.- 1982.- V.41.- No.6.- P.393.
135. Hariharan P., Oreb B.F., Eiju T. Digital Phase-Shifting Interferometry: a Simple Error-Compensating Phase Calculation Algorithm// *Appl.Opt.*- 1987.- V.26.- P.2504-2506.
136. Hildebrand B.P., Haines K.A. Multiple-Wavelength and Multiple-Source Holography Applied to Contour Generation.- *J.Opt.Soc.Am.*- 1967.- V.57.- P.155-162.
137. Huntley J.M. Noise-immune phase unwrapping algorithm// *Appl.Opt.*- 1989.- V.28.- P.3268-3270.
138. Huntley J.M., Salner H. Temporal phase unwrapping algorithms for automated interferogram analysis// *Appl.Opt.*- 1993.- V.17.- P.3047-3052.
139. Ichioka Y., Inuica M. Direct phase detecting system// *Applied Optics*.- 1972.- V.11.- No.7.- P.1507-1514.
140. Koronkevitch V.P., Korolkov V.P., Poleshchuk A.G., Palchikova I.G. and ets. Kinofoms: technologies, new elements, and optical systems// Preprint №421.-IAE, Novosibirsk.- 1989.- 54p.
141. Kothiyal M.P., Delisle C. Shearing interferometer for phase shifting interferometry with polarization phase shifter// *Applied Optics*.- 1985.- V.24.- No.24.- P.4439-4442.
142. Kreis T.M., Kreitlow H. Quantitative evaluation of holographic interferograms under image processing aspects// *Proc.SPIE*.-1979.- V.210.- P.196-202.
143. Kikuta H., Iwata K., Nagata R. *Appl.Opt.*- 1986.- V.25.- P.2976.
144. Kinnstactter K., Lohmann A.W., Schwider J., Streibl N. Accuracy of phase shifting interferometry// *Appl.Opt.*- 1988.- V.27.- No.24.- P.5082-5089.

145. Kujawinska M. Use of phase-stepping automatic fringe analysis in moire interferometry// *Appl.Opt.*- 1987.- V.26.- No.22.- P.4712-4714.
146. Kujawinska M. Use of phase-stepping automatic fringe analysis in moire interferometry// *Appl.Opt.*- 1987.- V.26.- No.22.- P.4712-4714.
147. Kujawinska M. Multichannel grating phase-stepped interferometers// *Optica Applicata.*- V.17.- No.4- P.313-332.
148. Kwon O.Y., Wyant J.C., Hayslett C.R. Rough Surface Interferometry at 10.6 mm// *Appl.Opt.*- 1980.- V.19.- P.1862.
149. Makosch G., Prein F. Phase-locked interferometry for automatic mask alignment in projection printers// *Appl.Opt.*- 1987. -No.26.- P.2828.
150. Macy W.W, JR. Two-dimensiomal fringe-pattern analysis// *Applied Optics.*- 1983.- V.22.- No.3.- P.3898-3901.
151. Malacara D., Cornejo A., Murty V.R.K. Bibliography of various optical testing methods// *Applied Optics.*- 1975.- V.14.- No.5.- P.1065-1080.
152. Massie N.A. Real-time digital heterodyne interferometry: a system// *Applied Optics.*- 1980.- V.19.- No.1.- P.154-160.
153. Matthews H.D., Hamilton D.K., Sheppard C.J.R. Surface Profiling by Phase-Locked Interferometry// *Applied Optics.*- 1986.- V.25.- P.2372-2374.
154. Meadows D.M., Jonson W.O., Allan J.B. Generation of Surface Contours by Moire Patterns// *Applied Optics.*- 1970.- P.942-947.
155. Mertz L. Complex interferometry// *Applied Optics.*- 1983.- V.22.- No.10.- P.1535.
156. Mikhaltsova I.A., Nalivaiko V.I., Soldatenkov I.S. Kinoform axicons// *Optik.*- 1984.- V.67.- No.3.- P.267-278.
157. Mohan N.K., Saldner H., Molin N.-E. Electronic speckle pattern interferometry for simultaneous measurement of out-of-plane displacement and slope// *Optics Letters.*- 1993.- V.18.- No.21.- P.1861-1862.

158. Mohanty R.K., Joenathan C., Sirohi S. Speckle and speckle-shearing interferometers combined for the simultaneous determination of out-of-plane displacement and slope// *Applied Optics*.- 1985.- V.24.- No.18.- P.3106-3109.
159. Moore D.T., Murray R., Neves F.B. Large Aperture ac Interferometer for Optical Testing// *Applied Optics*.- 1978.- V.17.- P.3959-3963.
160. Moore A.J., Tyrer J.R., Santoyo F.M. Phase extraction from electronic speckle pattern interferometry addition fringes// *Applied Optics*.- 1994.- V.33.- No.31.- P.7312-7325.
161. Moran S.E., Law R.L., Craid P.N., Golberg W.M. Optically phase-locked electronic speckle pattern interferometer// *Appl.Opt.*- 1987.- V.26.- No.3.- P.475-491.
162. Nakadate S., Yatagai T., Saito H. Computer-aided speckle-pattern interferometry// *Applied Optics*.- 1983.- V.22.- No.2.- P.237-243.
163. Nakadate S., Saito H. Fringe scanning speckle-pattern interferometry// *Applied Optics*.- 1985.- V.24.- No.14.- P.2172-2180.
164. Ohyama N., Shimano T., Tsujiuchi J., Honda T. Analysis of systematic phase errors due to nonlinearity in fringe scanning systems.- *Optics Communication*.- 1986.- V.58.- No.4.- P.223-225.
165. Openheim A., Schafer R. *Digital Signal Processing*. Chapter 10// Prentice-Hall International, New York.- 1975.- P.507-511.
166. Oreb B.F., Sharon B., Hariharan P. Electronic speckle pattern interferometry with a microcomputer// *Appl.Opt.*- 1984.- V.23.- No.22.- P.3949-3941.
167. Paoletty D., Spagnolo G.S. Automated digital speckle pattern interferometry contouring in artwork surface inspection// *Optical Engineering*.- 1993.- V.32.- No.6.- P.1348-1353.

168. Parker R.J., Jones D.G. Holography in an industrial environment// Optical Engineering.- 1988.- V.27.- No.1.- P.55-66.
169. Pawell R., Stetson K. Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction.- J.Opt.Soc.Am.- 1965.- V.55.-P.1593.
170. Pedrini G., Tiziani H.J. Double-pulse electronic speckle interferometry for vibration analysis// Applied Optics.- 1994.- V.33.- No.34.- P.7857-7863.
171. Prettyjohns K.N., S.L.DeVore, Dereniak E.L., Wyant J.C. Design and operation of a real time interferometer working at 3.8mm// Proceeding of SPIE.- 1983.- V.429.- P.142-147.
172. Prettyjohns K.N., DeVore S.L., Dereniak E.L., Wyant J.C. Direct Phase Measurement Interferometer Working at 3.8mm// Appl.Opt.- 1985.- V.24.- P.2211.
173. Quiroda J.A., Bernabeu E. Phase-unwrapping algorithm for moisy phase-map processing.- Applied Optics.- 1994.- V.33.- No.29.- P.6725-6731.
174. Ramesh K., Pramod B.R. Digital image processing of fringe pattern in photomechanics// Optical Engineering.- 1992.- Vol.31.- No.7.- P.1487-1498.
175. Rimmer M.P., King C.M., Fox D.G. Computer program for the analysis of interferometric test data// Applied Optics.- 1972.- V.11.- No.12.- P.2790-2796.
176. Robinson D.W. Automatic fringe analysis with a computer image-processing system// Applied Optics.- 1983.- V.22.- No.14.- P.2169-2176.
177. Robinson D.W., Williams D.C. Digital phase stepping speckle interferometry// Optics Communications.- 1986.- V.57.- No.1.- P.26-30.
178. Robinson D.W., Williams D.C. Digital phase stepping speckle interferometry// Optics Communications.- 1986.- V.57.- No.1.- P.26-30.
179. Roddier C., Roddier F. Interferogram analysis using Fourier transform techniques// Appl.Opt.- 1987.- V.26.- No.9.- P.1668-1673.

180. Ru Q.S., Honda T., Tsujiuchi J., Okyama N. Fringe analysis by using the Fourier-transform method// *Opt.Comm.*- 1988.- V.66.- P.21-24.
181. Sasaki O., Okazaky H. Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurement// *Applied Optics.*- 1986.- V.25.- No.18.- P.3137-3140.
182. Sasaki O., Okazaky H. Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurement// *Applied Optics.*- 1986.- V.25.- No.18.- P.3137-3140.
183. Schmidt-Weinmar H.G. Spatial distribution of magnitude and phase of optical-wave fields// *J.Opt.Soc.Am.*- 1973.- V.63.- No.5.- P.547-555.
184. Schehem M. Precision optical wavefront measurement// *Proceeding of SPIE.*- V.306.- 1981.- P.183-191.
185. Schmit J., Creath K. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry// *Appl.Opt.*- 1995.- V.34.-No.19.- P.3610-3619.
186. Schwider J., Burow R.,Elsner K.-E.,Grzanna J., Spolaczyc R.,Mezkel K. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources// *Applied Optics.*- 1983.- V.22.- No.21.- P.3421-3432.
187. Schwider J., Falkenstorfer O., Schreiber H., Zoller A., Streibl N. New compensating four-phase algorithm for phase-shift interferometry// *Opt.Eng.*- 1993.- V.32.- P.1883-1885.
188. Sommargren G.E. Double-exposure holographic interferometry using common-path referance waves// *Applied Optics.*- 1977.- V.16.- No.6.- P.1736-1741.
189. Srinivasan V., Liu H.C., Halioua M. Automated Phase-Measuring Profilometry of 3-D Diffuse Objects// *Appl.Opt.*- 1984.- V.23.-P.3105.
190. Srinivasan V., Liu H.C., Halioua M. Automated Phase-Measuring Profilometry: A Phase Mapping Approach// *Appl.Opt.*- 1985.- V.24.-P.185.

191. Stephenson P., D.R.Burton, M.J.Lalor Data validation techniques in a tiled phase unwrapping algorithm// Opt.Eng.- 1994.- V.33.- No.11.- P.3703-3708.
192. Strand T.C., Katziz Y. Extended unambiguous range interferometry// Appl.Opt.- 1987.- V.26.- P.4274.
193. Suzuki T., Sasaki O., Maruyama T. Phase locked laser diode interferometry for surfase profile measurement// Applied Optics.- 1989.- V.28.- No.20.- P.4407-4410.
194. Takasaki H. Moire Topography// Appl.Opt.- 1970.- V.9.- P.1467-1472.
195. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interfermetry// J.Opt.Soc.Am.- 1982.- V.72.- No.1.- P.156-160.
196. Takeda M., Tung Z. Subfringe holographic interferometry by computer-based spatial-carrier fringe-pattern analysis// J.Optics(Paris).- 1985.- V.16.- No.3.- P.127-131.
197. Takeda M., Ru Q.-S. Computer-based highly sensitive electron-wave interferometry// Appl.Opt.- 1985.- V.24.- No.18.- P.3068-3071.
198. Takeda M., Yamamoto H. Fourier-transform speckle profilometry: three-dimensional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/or spatially isolated surfaces// Appl.Opt.- 1994.- V.33.- No.34.- P.7829-7837.
199. Thalmann R., Dandliker R. Holografic contouring using electronic phase measurement// Optical Engineering.- 1985.- V.24.- No.6.- P.930-935.
200. Towers D., Judge T., Bryanston-Cross P.J. A quasi heterodyne holographic technique and automatic algorithms for phase unwrapping// Proc.SPIE.- 1989.- V.1163.- P.95-119.
201. Wang J.Y., Silva D.E. Wave-front interpretation with Zernike polinomials// Appl.Opt.- 1980.- V.19.- No.9.- P.1510-1518.

202. Well R.H., Hughes G.W. Detectors for scanning video imagers// Appl.Opt.- 1993.- V.32,- No.31.- P.6227-6235.
203. Welford W.T. Some Applications of Projected Interference Fringes// Opt.Acta.-1969.- V.16.- P.371.
204. Windecker R., Tiziani H.J. Topometry of technical and biological objects by fringe projection// Appl.Opt.- 1995.- Vol.34.- No.19.- P.3644-3650.
205. Wyant J.C. Use of an ac Heterodyne Lateral Shear Interferometer with Real-Time Wavefront Correction Systems// Appl.Opt.- 1975.- V.14.-P.2622.
206. Wyant J.C. Testing aspherics using two-wavelength holography// Applied Optics.- 1971.- V.10.- No.9.- P.2113-2118.
207. Wyant J.C. Interferometric optical metrology: basic system and principles// Laser Focus.- 1982.- P.65-67.
208. Wyant J.C., Oreb B.F., Hariharan P. Testing aspherics using two-wavelength holography: Use of digital electronic techniques// Applied Optics.- 1984.- V.23.- No.22. - P.4020-4023.
209. Wyant J.C., Creath K. Recent advances in interferometric optical testing// Laser Focus.- 1985.- V.21.- No.11.- P.118-132.
210. Wygant R.W., Almeida S.P., Soares O.D.D. Surface inspection via projection interferometry// Appl.Opt.- 1988.- V.27.- No.22.- P.4626-4630.
211. Yatagai T., Nakadate S., Idesawa M., Saito H. Automatic fringe analysis using digital image processing techniques// Optical Engineering.- 1982.- V.21.- No.3.- P.432-435.
212. Yatagai T., Inaba S., Nakano H., Suzuki M. Automatic flatness tester for VLSI// Proceeding of SPIE.- 1983.- V.429.- P.130-135.
213. Zygo. Phase-Measuring interferometry benefits from Data-Processing Power// Laser Focus/Electro-Optics.- 1986.- No.22.- P.42-43.

Приложение А

Необходимые условия для однозначного определения разности фаз

Рассмотрим интерференцию двух когерентных волн.

Падающая электромагнитная волна с напряженностью электрического поля \bar{E} делится на два когерентных пучка: на объектную (тестирующую) волну с напряженностью поля \bar{E}_T и опорную (эталонную) волну с напряженностью поля \bar{E}_P . В качестве делителя луча обычно используется полупрозрачное зеркало. После прохождения соответствующих путей и накопления фазовых задержек происходит суперпозиция волн \bar{E}_P и \bar{E}_T на втором светоделителе. Напряженность результирующего поля определяется следующим выражением

$$\bar{E}_S = \bar{E}_P + \bar{E}_T . \quad (\text{A-1})$$

Так как в оптическом диапазоне волн существуют только квадратичные низкочастотные детекторы, интенсивность определяется как

$$I(x, y) = \bar{E}_S * \bar{E}_S^* , \quad (\text{A-2})$$

где напряженность электрического поля является комплексной величиной

$$\bar{E}(x, y, t) = \bar{E}(x, y) \exp(-j\omega t), \quad (\text{A-3})$$

с комплексной пространственной амплитудой и гармонической зависимостью от времени. Комплексная пространственная амплитуда имеет вид

$$\bar{E}(x, y) = A(x, y) \exp(-j\varphi(x, y)), \quad (\text{A-4})$$

где A модуль напряженности поля, а φ представляет фазовый член. Подставляя (A-1) в (A-2), интенсивность в выходном зрачке координатной системы интерферометра может быть записана как

$$I(x, y) = \bar{E}_s * \bar{E}_s^* = (\bar{E}_p + \bar{E}_r) * (\bar{E}_p^* + \bar{E}_r^*) . \quad (\text{A-5})$$

Т.к. \bar{E}_p , \bar{E}_r когерентные пучки, они имеют одну и ту же зависимость от времени, и выражение (A-5) примет вид

$$I(x, y) = |(\bar{E}_p + \bar{E}_r)|^2 = |\bar{E}_r|^2 |1 + \bar{a}|^2, \quad (\text{A-6})$$

где вектор $\bar{a} = \bar{E}_p / \bar{E}_r$.

Комплексную амплитуду неизвестного поля в плоскости регистрации можно определить, изменяя опорную волну \bar{E}_r в плоскости регистрации при неизменном поле \bar{E}_p . С этой целью регистрируются три интерференционные картины

$$I^l = \left| \bar{E}_p + \bar{E}_r^l \right|^2, \quad l = 1, 2, 3. \quad (\text{A-7})$$

Для каждого из трех различных опорных полей выделим мультипликативный элемент $\Delta^l \bar{E}_r$

$$\bar{E}_r^l = (\Delta^l \bar{E}_r) \bar{E}_r = [(\Delta^l A_r) \exp(i\Delta^l F_r)] \bar{E}_r, \quad (\text{A-8})$$

где $\Delta^1 A_r$ и $\Delta^1 F_r$ описывают изменение соответственно амплитуды и фазы. Перепишем (А-7) в виде

$$I^1 = \left| \bar{E}_p + (\Delta^1 \bar{E}_r) \bar{E}_r \right|^2 = |\bar{E}_r|^2 \left| \bar{a} + \Delta^1 \bar{E}_r \right|^2, \quad (\text{А-9})$$

где вектор $\bar{a} = \bar{E}_p / \bar{E}_r$. Тогда (А.9) будет иметь следующий вид

$$I^1 = |\bar{E}_r|^2 \{ [\text{Re}(\bar{a}) + \text{Re}(\Delta^1 \bar{E}_r)]^2 + [\text{Im}(\bar{a}) + \text{Im}(\Delta^1 \bar{E}_r)]^2 \}. \quad (\text{А-10})$$

Сгруппируем члены с неизвестным \bar{a} в правой части

$$\begin{aligned} K^1 &= \frac{I^1}{|\bar{E}_r|^2} - \text{Re}(\Delta^1 \bar{E}_r)^2 - \text{Im}(\Delta^1 \bar{E}_r)^2 = \\ &= \text{Re}(\bar{a})^2 + \text{Im}(\bar{a})^2 + 2 \text{Re}(\Delta^1 \bar{E}_r) \text{Re}(\bar{a}) + 2 \text{Im}(\Delta^1 \bar{E}_r) \text{Im}(\bar{a}) \end{aligned} \quad (\text{А-11})$$

Для $l=1,2,3$ получим систему уравнений

$$\frac{K^1 - K^2}{2} = [\text{Re}(\Delta^1 \bar{E}_r) - \text{Re}(\Delta^2 \bar{E}_r)] \text{Re}(\bar{a}) + [\text{Im}(\Delta^1 \bar{E}_r) - \text{Im}(\Delta^2 \bar{E}_r)] \text{Im}(\bar{a}), \quad (\text{А-12а})$$

$$\frac{K^2 - K^3}{2} = [\text{Re}(\Delta^2 \bar{E}_r) - \text{Re}(\Delta^3 \bar{E}_r)] \text{Re}(\bar{a}) + [\text{Im}(\Delta^2 \bar{E}_r) - \text{Im}(\Delta^3 \bar{E}_r)] \text{Im}(\bar{a}), \quad (\text{А-12б})$$

Система из двух уравнений с двумя неизвестными $\text{Re}(\bar{a})$ и $\text{Im}(\bar{a})$ может быть разрешена, если детерминант системы не равен нулю. Это условие выполняется в следующих случаях.

Переменные $\Delta^1 E_r$, $\Delta^2 E_r$, $\Delta^3 E_r$ не должны быть все линейно зависимы, но две из них могут быть линейно зависимы друг от друга, если третья линейно независима с разностью первых двух. Это может

быть достигнуто, например, использованием аттенюатора (линейно зависимый элемент) и фазосдвигающего элемента (линейно независимый).

Наиболее распространенные алгоритмы расшифровки, способные определять фазовые значения в пределах периода, основаны на достижении линейной независимости с помощью управляемого изменения фаз между опорным и объектным пучками.

Приложение Б

Нахождение границ окрестности грубых сбоев

Приведем алгоритм нахождения максимальных границ окрестности грубых промахов на примере системы из двух сравнений.

Решение системы, пользуясь Т.1 можно записать в виде

$$X = M_1 N_1 b_1 + M_2 N_2 b_2 \pmod{m_1 m_2} \quad (\text{Б-1})$$

Решим теперь обратную задачу: по заданному X найдем координаты в массиве решений. Нас интересуют координаты в первой строке и в первом столбце. Найдем их решая следующие сравнения первой степени:

$$M_1 N_1 b_1^i \equiv x_i \pmod{m_1 m_2} \quad (\text{Б-2})$$

$$M_2 N_2 b_2^j \equiv x_i \pmod{m_1 m_2} \quad (\text{Б-3})$$

Общий вид сравнений первой степени

$$a x \equiv b \pmod{m} \quad (\text{Б-4})$$

Вопрос о существовании и количестве решений определяется следующей теоремой /590/.

Теорема Б.1.

Пусть $\text{НОД}(a,m)=d$ (наибольший общий делитель a и m равен d). Сравнение $ax \equiv b \pmod{m}$ невозможно, если b не делится на d . При b кратном d сравнение имеет d решений.

Рассмотрим сравнение (Б.2). По Теореме 1 (Глава 4)

$$M_s N_s = \frac{m_1 \dots m_k}{m_s} N_s . \quad (\text{Б-5})$$

Пользуясь следующим свойством

$$\text{НОД}(am,bm)=\text{НОД}(a,b) m , \quad (\text{Б-6})$$

и выражением (Б-5) получим выражение для $\text{НОД}(a,m)$

$$\text{НОД}(M_s N_s, m_1 \dots m_k) = \text{НОД}(N_s, m_s) \frac{m_1 \dots m_k}{m_s} , \quad (\text{Б-7})$$

причем достаточно ограничиться случаем $\text{НОД}(N_s, m_s)=1$. Из теоремы Б.1 следует, что сравнение (Б-2) имеет $d = \frac{m_1 \dots m_k}{m_s}$ решений, при условии, что x_s кратно d . Используя это выражение и (Б-5), перепишем (Б-2) в виде:

$$\frac{m_1 \dots m_k}{m_s} N_s b \equiv k \frac{m_1 \dots m_k}{m_s} \pmod{m_1 \dots m_k} . \quad (\text{Б-8})$$

Пользуясь свойством сравнений, разделим обе части сравнений и модуль на общий делитель:

$$N_s b_s^k \equiv k \frac{m_1 \dots m_k}{m_s} \pmod{m_s} . \quad (\text{Б-9})$$

Выбирая диапазон D так, чтобы

$$x = k \frac{m_1 \dots m_k}{m_s} < D , \quad (\text{Б-10})$$

находим все k при которых неравенство (Б-10) выполняется, и для каждого из них находим b_s^k , решая сравнение (Б-9). Таким образом, по каждой переменной находим координаты в таблице решений, удовлетворяющие выбранному диапазону. Определив расстояние между ближайшими точками в этом списке, учитывая координаты граничных точек, найдем размер окрестности грубых промахов по этой переменной.

Приведем способ решения сравнения (Б-4), основанный на теории непрерывных дробей. Ограничимся случаем $\text{НОД}(a,m)=1$.

Разложим в непрерывную дробь отношение

$$\frac{m}{a} = q_1 + \frac{1}{q_2 + \frac{1}{q_3 + \dots \frac{1}{q_n}}} . \quad (\text{Б-11})$$

Затем находим P_{n-1} , последовательно вычисляя

$$P_s = q_s P_{s-1} + P_{s-2} . \quad (\text{Б-12})$$

Сравнение имеет решение:

$$X \equiv (-1)^n P_{n-1} b \pmod{m} . \quad (\text{Б-13})$$

Рассмотрим систему сравнений с $m_1=53$ и $m_2=63$. Решение системы:

$$X \equiv 1008 b_1 + 2332 b_1 \pmod{3339}. \quad (\text{Б-14})$$

Для нахождения границы окрестности грубых погрешностей по строке решим сравнение

$$1008 b_1 \equiv x \pmod{53 \cdot 63}, \quad (\text{Б-15})$$

которое является решением системы при $b_2=0$. Находим из (Б.10)

$$x = k \cdot 63 < D, \quad \text{где } k = 0, 1, \dots, k_{\max}. \quad (\text{Б-16})$$

Шаг изменения k равен 1, т.к. $\text{НОД}(N_S, m_S) = \text{НОД}(16, 53) = 1$. Учитывая вышеизложенное, перепишем (Б-15) в виде:

$$16 b_1 \equiv x \pmod{53}. \quad (\text{Б-17})$$

Имеем

$$53:16 = \underline{3} + 5/16; \quad 16:5 = \underline{3} + 1/5; \quad 5:1 = \underline{5}; \quad (\text{Б-18})$$

Откуда $q_1=3$, $q_2=3$, $q_3=5$ и пользуясь (Б.13) получим

n	0	1	2	3
q_n		<u>3</u>	<u>3</u>	<u>5</u>
P_n	1	3	<u>10</u>	53

Таб.А-1. Поиск решения сравнения (Б-15)

В данном случае $n=3$, $P_{n-1}=10$, $b=k$, и решение сравнения (Б-15) запишется в виде

$$b_1 \equiv 10k \pmod{53} . \quad (\text{Б-19})$$

Поскольку нас интересуют координаты в таблице решений, то $b_1 = 10k$. Ограничив диапазон величиной $D=300$, получим из (Б-15) $k=0,1,2,3,4$ и, соответственно, $b_1^k=0,10,20,30,40$. Учитывая и граничное значение (52), минимальное расстояние между диагоналями по этой переменной равно 10.

Приложение В

Материалы, подтверждающие внедрение и использование результатов диссертации

1. Акт внедрения комплекса программно-аппаратных средств (ОКБ «ТОПАЗ» ГП «НПО Астрофизика» г.Москва)
2. Справка о внедрении измерительной системы для автоматизированного контроля высокоточных оптических поверхностей (НПО «НПЗ» г.Новосибирск)
3. Акт внедрения измерительной системы для определения отклонений от плоскостности оптических элементов (НПО «НПЗ» г.Новосибирск)
4. Справка о внедрении системы ввода и обработки рентгенологических данных (НИИТО г.Новосибирск)
5. Справка о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы (НГТУ)