

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

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)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Новосибирск  
1999

Работа выполнена в Новосибирском Государственном Техническом Университете

Научный консультант:

д.т.н., проф. Козачок Аркадий Григорьевич

Официальные оппоненты:

д.т.н., заслуженный деятель науки РФ

Чугуй Юрий Васильевич

д.т.н. Василенко Леонид Семенович

д.т.н., проф. Ринкевичюс Бронюс Симович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный институт  
точной механики и оптики (Технический университет)

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 1999 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д.063.34.08 по защите диссертаций при Новосибирском  
Государственном Техническом Университете

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского  
Государственного Технического Университета.

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 1999 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

В.Л.Полубинский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1.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.

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.

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  $1000-2000 \text{ мм}^{-1}$ . 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.

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 применение их сопряжено со значительной сложностью получения интерферограмм. Методы спекл-интерферометрии значительно лучше адаптируются к производственным условиям, но они уступают по точности классической и голографической интерферометрии. Все интерференционные методы обладают фазовой неоднозначностью, что приводит к ограничению динамического диапазона измерений.

Разработка эффективных высокоточных методов 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.

2.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.

3.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».

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

5.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 методы расшифровки для анализа интерференционных картин, полученных методами классической, голографической или спекл-интерферометрии.

#### 6. Практическая ценность и реализация результатов работы.

Использование интерференционных измерительных систем, разработанных на основе предложенных методов, позволяет существенно расширить область применения систем, увеличить точность и диапазон измерений, упростить 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 тем.

#### 7. На защиту выносятся:

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

-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;  
 -алгоритмическое и программное обеспечение автоматических интерференционных измерительных систем;  
 -измеритель абсолютных перемещений, позволяющий по серии локальных измерений определять величину перемещений.

8. 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 автоматизации" (Новосибирск, 1996), на Международном симпозиуме "The first Korea-Russia International Symposium on Science and Technology" (Ulsan, Republic of Korea, 1997), на Втором и Третьем Сибирских Конгрессах по Прикладной и Индустриальной Математике (Новосибирск, 1996, 1998) на Международной конференции "Прикладная оптика-98" (Санкт-Петербург, 1998).

9. Личный вклад. Постановка задач, способы их решения и основные научные результаты принадлежат лично автору. Экспериментальные исследования, разработка электронных блоков и аппаратных средств, программного обеспечения выполнены сотрудниками лаборатории автоматизации экспериментальных исследований НГТУ при участии и под руководством автора.

10. Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 52 печатных работах.

11. Структура и объем диссертации. Содержание диссертации изложено во введении, пяти главах и заключении.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Введение.

Во введении определена цель работы, показана актуальность, научная новизна и практическая значимость решаемых задач.

### Глава 1. Методы анализа интерференционных картин.

В главе приведен анализ интерференционных методов определения фазовых характеристик волновых полей, полученных при отражении от исследуемых объектов и рассмотрены существующие методы расшифровки.

Интенсивность оптического сигнала при интерференционных измерениях определяется как

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

где  $(\varphi_p - \varphi_r)$  - разность фаз между объектной и опорной волнами,  $I_0(x, y)$  - средняя интенсивность,  $V(x, y)$  - модуляция интенсивности или видность.

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

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

Различные алгоритмы определения разности фаз по интерференционным картинам можно разделить на две группы.

-Расшифровка ведется по одной интерферограмме. Недостающую информацию пытаются получить анализом статистических свойств распределений интенсивности по полю интерферограммы. К статическим методам можно отнести: методы, основанные на выделении центров полос и на разделении частотных составляющих в спектральной плоскости.

-Расшифровка производится по серии интерферограмм, каждая из которых получена при заданном изменении параметров

интерферометра. Комплексная амплитуда неизвестного поля определяется путем изменения опорной волны при неизменном объектном волновом поле.

Можно показать, что для однозначного определения фазовых значений необходимо не менее трех уравнений, причем мультипликативные составляющие изменений амплитуд и фаз должны быть все линейно зависимы, или две из них могут быть линейно зависимы друг от друга, если третья линейно независима с разностью первых двух. Наиболее часто используемые алгоритмы расшифровки, основаны на достижении линейной независимости с помощью управляемого изменения фаз между опорным и объектным пучками.

В этом случае уравнение (1) может быть переписано в виде

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

где  $f$  - некоторая известная фазовая добавка.

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

Поскольку косинус - периодическая функция, значения фаз могут быть восстановлены только в пределах 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 значительно расширить диапазон измерений. Другими словами, необходимо увеличить область однозначного определения фазовых значений, или устранить фазовую неоднозначность в требуемом диапазоне. В главе рассмотрены основные методы устранения фазовой неоднозначности, проведен анализ их недостатков.

## Глава 2. Расшифровка интерферограмм методом пошагового фазового сдвига.

Наибольшее применение при построении интерференционных измерительных систем в последние годы получили методы расшифровки на основе пошагового фазового сдвига. Это вызвано простотой внесения отдельных значений фазового сдвига, достаточно быстрыми алгоритмами и высокой точностью расшифровки. При этом существующие схемы интерферометров достаточно просто модифицируются. Важно отметить, что компоненты интерферометра не идеальны, поэтому необходимым этапом при высококачественных

измерениях являются калибровочные операции.

Недостатком метода является то, что ошибки при внесении фазового сдвига существенно сказываются на результатах измерения. Проведен метрологический анализ существующих алгоритмов. Показано, что методическая ошибка при определении разности фаз имеет тот же порядок, что и ошибка при задании сдвига.

Для уменьшения влияния линейных ошибок при задании сдвига можно проводить две серии измерений и усреднять результирующие фазовые значения. Тот же эффект достигается, если объединить исходные данные и проводить расшифровку по формуле, в которой суммируются числители и знаменатели выражений, используемых для каждой серии. Можно уменьшить число интерферограмм, если использовать алгоритмы со сдвигом на  $\pi/2$ . В этом случае необходимо только одно добавочное измерение в следующей серии. Таким образом, на основе трехточечных и четырехточечных алгоритмов конструируются алгоритмы с различным числом сдвигов. Нами показано, что использование числа сдвигов более шести нецелесообразно, поскольку уровень корректируемых ошибок становится меньше, чем погрешности, вызванные другими системными ошибками.

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

Нами предложен способ, основанный на модифицированном алгоритме Carre, при использовании которого погрешность определения разности фаз значительно меньше, чем у существующих многоточечных алгоритмов. Алгоритм Carre, получен при допущении, что последовательные фазовые сдвиги отличаются на одну и ту же величину. В этом случае можно явно определить сдвиг по формуле

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

Этот угол определяется с большой погрешностью в областях с фазовыми значениями близкими 0,  $\pi$ ,  $2\pi$ . Для уменьшения погрешности эти области исключались из рассмотрения. Угол сдвига находится усреднением по полю. Затем, после подстановки в выражение

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \operatorname{tg}\alpha \quad , \quad (4)$$

находится искомая фаза. Модифицированный алгоритм наиболее явно исправляет ошибочные значения вблизи точек перехода через  $2\pi$ . Это позволяет использовать простые схемы устранения фазовой неоднозначности. Результаты эксперимента сопоставлялись с измерениями тестовой поверхности на интерферометре с калиброванным фазосдвигающим устройством. Экспериментальная проверка показала, что среднеквадратичное отклонение составляет менее  $\lambda/60$ .

Однако алгоритмы, устраняющие влияние линейных ошибок при задании сдвига, неустойчивы к нелинейным и случайным ошибкам. Нелинейность может быть вызвана, например, гистерезисом, вибрациями при движении пьезокерамики или вибрациями установки при проведении эксперимента. Для коррекции нелинейных ошибок автором предложен новый алгоритм.

Значения сдвига могут быть определены из уже имеющихся интерферограмм. Из базового уравнения для двухлучевой интерферометрии видно, что к трем неизвестным,  $I_0$ ,  $V$  и  $\phi$ , добавляется еще и угол сдвига  $\delta$ . Если допустить, что в некоторой окрестности сдвиг фаз примерно одинаков, можно получить добавочное уравнение из соотношений, полученных в других точках детектора. В каждой точке  $3+m-1$  неизвестных  $D, V, \phi, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m$  ( $\delta_0 = 0$ ). При четырех фазовых сдвигах в каждой произвольной точке будет 6 неизвестных -  $I_0, V, \phi, \delta_1, \delta_2, \delta_3$  ( $\delta_0 = 0$ ) и четыре уравнения. 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. Для поиска неизвестных может быть использован метод наименьших квадратов при минимизации функции ошибки

$$\epsilon = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (I_{ij} - \hat{I}_{ij})^2, \quad (5)$$

где  $\hat{I}_{ij}$  - действительно измеренные значения  $j$ -ой интерферограммы в  $i$ -ой точке, а  $I_{ij}$ , соответствующие уравнению (2). Моделирование показало, что при нахождении неизвестных возникает существенное расхождение с действительными сдвигами. Это вызвано тем, что существует очень много локальных минимумов, каждый из которых удовлетворяет соотношению (5). Попадание в тот или иной минимум

зависит от выбора начальных значений. Таким образом, возможна коррекция только небольших, в пределах нескольких градусов, фазовых ошибок.

Для поиска действительных значений сдвига фаз при значительной ошибке предлагается искать значения экстремумов минимаксной функции  $R()$  в некоторой окрестности предполагаемых фазовых сдвигов (считается, что фазовый сдвиг в этих точках одинаков). Выбор минимаксной функции определяется следующими соображениями. В какой-либо точке делаются четыре измерения при фазовых сдвигах  $0, \delta_1, \delta_2, \delta_3$ . Но, реальные фазовые сдвиги могут отличаться от предполагаемых. Значения фаз определяются по трехточечной формуле при начальных значениях сдвигов. Т.к. 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 соответствующее фазовому сдвигу 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.

Минимаксная функция определяется как

$$R(0, \delta_1, \delta_2, \delta_3) = \frac{1}{N(x,y)} \sum \frac{\left| \max_{s=0...3} \phi^s(x,y) - \min_{s=0...3} \phi^s(x,y) \right|}{\frac{1}{4} \sum_{s=0...3} \phi^s(x,y)}, \quad (6)$$

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.

Средний размах находится для всех допустимых значений фазовых сдвигов

$$\delta_j^i = \delta_j \pm ik, \quad i=0,1, \dots, n. \quad (7)$$

Набор фазовых сдвигов  $0, \delta_1^i, \delta_2^j, \delta_3^k$ , при которых достигается глобальный минимум (6), считается действительным. После нахождения действительных сдвигов для расшифровки использовался следующий алгоритм:

$$\phi = \arctan \frac{(I_2 - I_4) \sin \delta_1 + (I_3 - I_1) \sin \delta_2 + (I_4 - I_2) \sin \delta_3 + (I_1 - I_3) \sin \delta_4}{(I_4 - I_2) \cos \delta_1 + (I_1 - I_3) \cos \delta_2 + (I_2 - I_4) \cos \delta_3 + (I_3 - I_1) \cos \delta_4} \quad (8)$$

Для оценки эффективности алгоритма проводилось математическое и экспериментальное моделирование. Среднеквадратичное отклонение измеренной разности фаз по полю от действительных значений составило  $\lambda/100$ .

### Глава 3. Методы расшифровки цифровых спекл-интерферограмм.

Создание простых, надежных и эффективных измерительных систем возможно на основе методов спекл-интерферометрии.

В данной Главе рассмотрен метод получения и расшифровки спекл-интерферограмм, основанный на внесении управляемого фазового сдвига между интерферирующими пучками до и после деформации объекта и позволяющий приблизить точность спекл-интерференционных систем к точности голографических измерительных систем.

Цифровая спекл-интерферометрия основана на использовании компьютерных систем обработки изображений для корреляционного сравнения спеклограмм исходной и деформированной поверхностей объекта. Исследования в этой области получили новый импульс в связи с появлением высокоразрешающих приемников изображений, а также малогабаритных твердотельных лазеров. Однако погрешность фазовых измерений значительно выше, чем у интерференционных и голографических систем. В то же время потенциальные возможности методов цифровой спекл-интерферометрии достаточно велики.

Рассмотрим процесс получения спеклограмм. На рис.1 показан интерферометр, отличающийся от традиционных тем, что у него заменена зеркальная опорная поверхность на диффузную.

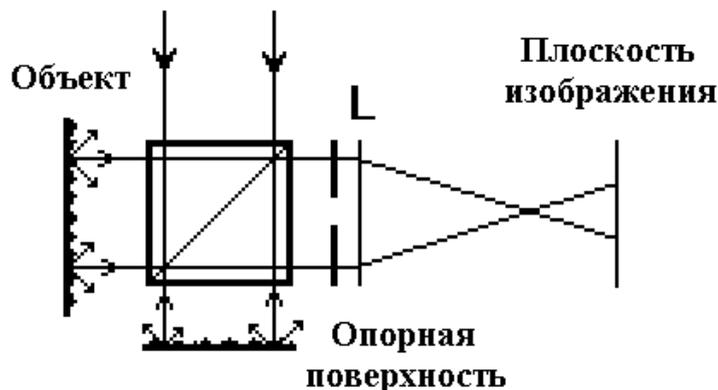


Рис.1.

Волны, рассеянные опорной и объектной поверхностями интерферируют в плоскости изображения линзы L. Результирующую

интенсивность - спеклограмму исходной поверхности объекта - можно представить в следующем виде:

$$I_{\text{ref}}(x, y) = A_s^2 + A_r^2 + 2A_s A_r \cos(\phi_s - \phi_r) . \quad (9)$$

где  $A_s$  и  $A_r$  - модули напряженности поля,  $\phi_s - \phi_r$  - разность фаз объектной и опорной волн.

При деформации объекта изменяются фазы световых волн, рассеянных элементами его поверхности. Обозначим через  $\Psi(x, y)$  фазовый сдвиг в точке, вызванный деформацией объекта, тогда интенсивность спекл-картины от деформированной поверхности

$$I_{\text{def}}(x, y) = A_s^2 + A_r^2 + 2A_s A_r \cos(\phi_s - \phi_r + \Psi(x, y)) . \quad (10)$$

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

$$I_s(x, y) = [I_{\text{ref}}(x, y) - I_{\text{def}}(x, y)]^2 . \quad (11)$$

Подставляя в (11) выражения для  $I_{\text{ref}}(x, y)$  и  $I_{\text{def}}(x, y)$ , после некоторых преобразований получим

$$I_s = N - N \cos(\Psi) , \quad (12)$$

$$\text{где} \quad N = 8 A_s^2 A_r^2 \sin^2(\phi_s - \phi_r + \Psi(x, y)/2) . \quad (13)$$

Картина полос модулируется спекл-структурой, возникающей в результате прохождения высокочастотных составляющих сигнала через оптическую систему с ограничивающей апертурой. Параметр  $N$  отвечает за распределение спеклов,  $A_s$  и фаза  $\phi_s$  (в случае диффузной поверхности), а также, возможно,  $A_r$  и  $\phi_r$  (для диффузного опорного пучка) определяют форму и размер спеклов в плоскости изображения.

В тех областях плоскости изображения объекта, где вызванный деформацией фазовый сдвиг

$$\Psi = \pm 2 n \pi, \quad n = 0, 1, 2 \dots, \quad (14)$$

выражение (12) равно нулю и поэтому при отображении они будут выглядеть темными, тогда как другие области, где это условие не выполняется, будут иметь зернистую структуру. На рис.2 приведена типичная картина спекл-корреляционных полос, возникающая при деформации плоской пластины с диффузной поверхностью.

При получении выражения (12) 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.

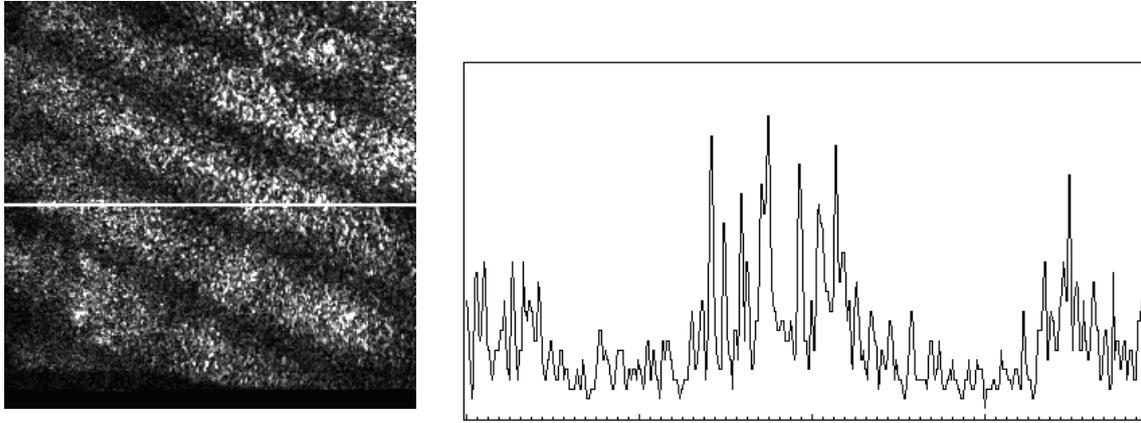


Рис.2.

Корреляционные спекл-интерферограммы имеют низкий контраст, корреляционные полосы носят более сложный характер, чем обычные интерферограммы, проследить можно только темные полосы. Поэтому расшифровка, основанная на выделении центров полос и интерполяции значений между ними, приводит к большим погрешностям. Более высокую точность достигается при использовании анализа в частотной области. Однако, погрешность этих методов расшифровки, все же значительно больше, чем у голографических интерференционных систем.

Предположим, что перед деформацией объекта регистрируют распределение интенсивности  $I_{ref}(\alpha)$  в спеклограмме исходной поверхности объекта, полученной при внесении контролируемого фазового сдвига  $\alpha$  между предметным и опорным пучками в спекл-интерферометре. После деформации объекта регистрируют спеклограмму  $I_{def}(\beta)$  деформированной поверхности объекта при фазовом сдвиге  $\beta$ . Тогда

$$I_{\text{ref}}(a) - I_{\text{def}}(b) = 4A_s A_r \sin(\phi_s - \phi_r + \Psi/2 + (\alpha + \beta)/2) \sin(\Psi/2 + (\beta - \alpha)/2), \quad (15)$$

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. Обозначив через

$$K_1(x, y) = I_{\text{ref}}(\pi/4) - I_{\text{def}}(3\pi/4), \quad (16.a)$$

$$K_2(x, y) = I_{\text{ref}}(\pi/2) - I_{\text{def}}(\pi/2), \quad (16.b)$$

$$K_3(x, y) = I_{\text{ref}}(0) - I_{\text{def}}(\pi), \quad (16.b)$$

с помощью ряда тригонометрических преобразований получим

$$\Psi(x, y) = \arctan \frac{2(K_1)^2 - (K_2)^2 - (K_3)^2}{(K_3)^2 - (K_2)^2}. \quad (17)$$

Выражение (15) требует регистрации 6 спеклограмм: 3-х до деформации и 3-х после деформации объекта. Более простое выражение:

$$\Psi(x, y) = \arctan \frac{2K_2K_3}{(K_3)^2 - (K_2)^2}, \quad (18)$$

имеет те же характеристики, но требует регистрации только 4 спеклограмм: 2-х до, и 2-х после деформации объекта. 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  $\pi$ , четвертая спеклограмма.

Анализ знаков числителя и знаменателя позволяет расширить область определения фазовых значений от 0 до  $2\pi$ .

Алгоритмы расшифровки (17) и (18) имеют существенный недостаток - фазовый сдвиг должен задаваться точно. При ошибке в задании сдвига возникают погрешности, отделить которые от истинных значений невозможно. Нами получен алгоритм, устойчивый к линейным ошибкам при установке сдвига. Задается следующая

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

Пусть

$$K_1(x,y) = I_{\text{ref}}(\alpha/2) - I_{\text{def}}(3\alpha/2) , \quad (19.a)$$

$$K_2(x,y) = I_{\text{ref}}(\alpha) - I_{\text{def}}(\alpha) , \quad (19.b)$$

$$K_3(x,y) = I_{\text{ref}}(0) - I_{\text{def}}(2\alpha) , \quad (19.c)$$

$$\sin(\alpha) = \left| \frac{2(K_2 + K_3)\sqrt{4K_1^2 - (K_2 + K_3)^2}}{4K_1^2} \right| , \quad (20)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{2(K_2 + K_3)^2 - 4K_1^2}{4K_1^2} , \quad (21)$$

$$M_1 = K_2 \sin(\alpha) , \quad M_2 = K_3 - K_2 \cos(\alpha) , \quad (22)$$

тогда

$$\tan(\Psi) = \frac{2M_1M_2}{M_1^2 - M_2^2} . \quad (23)$$

Максимальная величина ошибки определяется величиной выбранной апертуры, и видом распределения фазового поля. Чем больше пространственных частот отсекается, тем больше величина ошибки при определении вызванного деформацией фазового сдвига. Для уменьшения ошибки необходимо увеличивать размер апертуры и, тем самым, уменьшать размер спеклов. Однако, при использовании традиционных методов расшифровки размер спекла определяется разрешением устройств регистрации. На один спекл при регистрации должно приходится несколько элементов массива детекторов.

Применение предложенных нами алгоритмов позволяет использовать 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

большой размер апертуры. Компьютерное моделирование показало, что при усреднении 4 спеклов на элементе детектора погрешность измерений разности фаз может достигать  $\approx \lambda/60 - \lambda/70$ .

В традиционных методах расшифровки требуется, чтобы спеклы имели достаточно большие размеры. При этом следует применять объективы с малой апертурой. Однако при уменьшении апертуры, соответственно уменьшается и световой поток, проходящий через линзу. При некотором пороге устройствам регистрации не хватает чувствительности. В этом случае приходится использовать фотоэлектронные умножители для усиления светового потока.

При усреднении на элементе детектора размер числовой апертуры может быть менее 2. В этом случае увеличивается световой поток и возможно применение обычных фотоприемников.

В Главе 5 описана система для контроля внеплоскостных деформаций, в которой расшифровка спекл-интерферограмм производится с помощью предложенной методики. По сравнению с существующими алгоритмами достигается значительное улучшение качества расшифровки.

#### Глава 4. Расширение диапазона интерференционных методов измерений.

Одним из основных недостатков интерференционных измерительных систем является ограниченный диапазон измерений. Причиной этого является периодический характер зависимости интенсивности от фазовой разности интерферирующих волновых фронтов. Проблема увеличения диапазона измерений очень важна, поскольку при удачном решении значительно расширяется область применения интерференционных систем. Поэтому большой интерес привлекают новые подходы и методы, предлагаемые для решения этой задачи.

Нами предложен новый метод, основанный на использовании серии измерений при различных ценах интерференционных полос, который позволяет на порядок увеличить диапазон измерений без потери точности.

Цена полосы зависит от разности оптического хода волн, при которой интерференционные полосы меняются на период. Она может меняться при изменении угла между интерферирующими пучками, коэффициента пропускания или длины волны источника освещения. Ниже описание метода основано на использовании интерференционных измерений при разных длинах волн.

При интерференционных измерениях фазовые значения определяются в диапазоне от 0 до  $2\pi$ . На рис.3 показаны фазовые значения, полученные при разных ценах интерференционных полос в

зависимости от оптической разности хода интерферирующих волн (ОРХ).

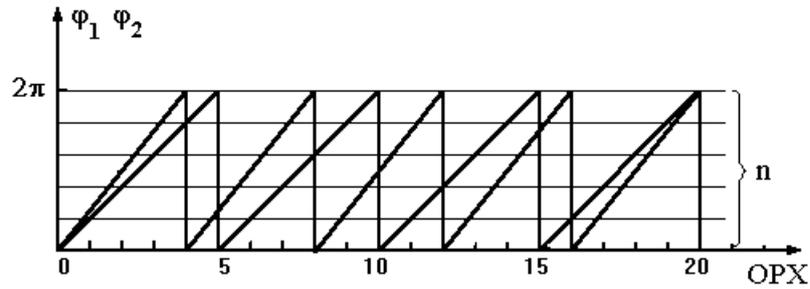


Рис.3.

Для восстановления полной фазы необходимо перейти к системе остаточных функций (Рис.4).

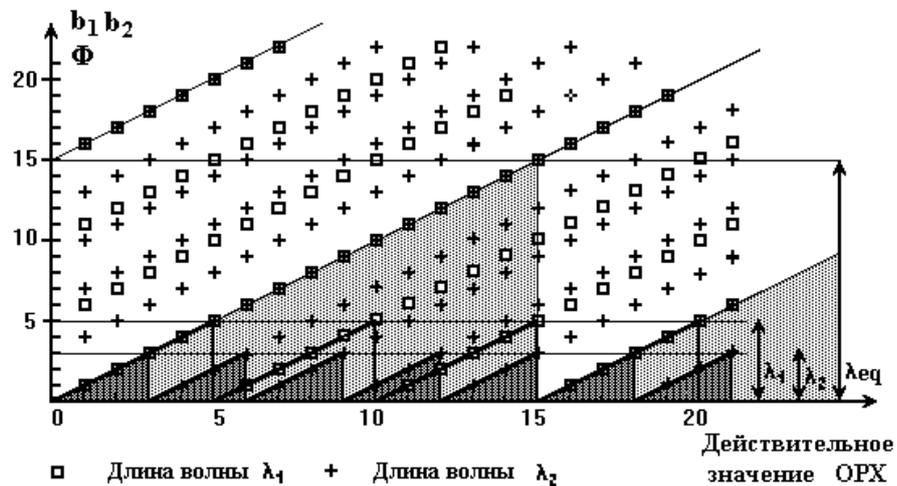


Рис.4.

Для этого выполняется масштабирование

$$b_i = \varphi_i m_i / (2\pi) , \quad (24)$$

где  $m_i$  - значение модулей, соответствующие выбранным ценам полос. Они определяются из соотношения

$$\lambda_{int} = m_2 \lambda_1 = m_1 \lambda_2 . \quad (25)$$

Чем с большей точностью нам известны значения длин волн, тем большее число знаков может быть использовано для представления модулей. Если  $m_1$  и  $m_2$  - целые взаимно простые числа, то диапазон в

пределах которого достигается единственность решения, определяется значением  $\lambda_{\text{int}}$ . Действительным результатом для каждой разности хода может быть любое из значений, отмеченное на графике «квадратом» и «плюсом». Поскольку результат при различных измерениях должен быть одинаковым (оптическая разность хода одинакова), отбрасываются все несовпадающие значения.

Можно составить таблицу решений, просчитав все возможные сочетания, но более удобно найти аналитическое решение. Это можно сделать, решив систему  $k$  - сравнений с целыми взаимно простыми модулями. Решение запишется в виде

$$X_0 = M_1 N_1 b_1 + M_2 N_2 b_2 + \dots + M_k N_k b_k, \quad (26)$$

где числа  $M_s$  и  $N_s$  определены из условий

$$m_1 m_2 \dots m_k = M_s m_s, \quad M_s N_s \equiv 1 \pmod{m_s}. \quad (27)$$

Диапазон, при котором это решение единственно, определяется произведением модулей.

Целочисленная арифметика требует безошибочных начальных данных. Однако при реальных измерениях погрешность измерений присутствует всегда. Был проведен анализ погрешностей и разработана методика коррекции возникающих ошибок.

Рассмотрим систему сравнений с  $m_1=53$  и  $m_2=63$ . Часть таблицы решений показана на рис.5.

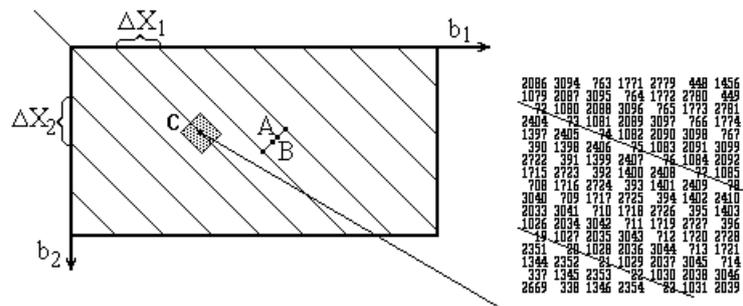


Рис.5.

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. Если существует некоторая погрешность задания исходных значений, то находится заведомо неправильное значение полной фазы. Если погрешность задания данных по всем

координатам одинакова и равна  $r$ , то вокруг истинного результата находится окрестность, в которой расположены числа с заведомо неправильными значениями. Назовем эту область - окрестностью грубых промахов. На рис.5. окрестность грубых промахов вблизи точки  $C$  ( $b_1=10$ ,  $b_2=23$ ) заштрихована темным цветом. Числовые значения таблицы решений, попадающие в эту окрестность, показаны на рисунке. Для нахождения верного результата необходимо найти ближайшие правильные значения.

Если ограничить диапазон изменения результата, то в некоторой окрестности таблицы обязательно попадет точка, значение которой не превышает установленный диапазон. Можно показать, что все допустимые значения будут лежать на диагоналях, которые начинаются с допустимых значений в нулевой строке или нулевом столбце.

Если минимальные расстояния между соседними диагоналями  $\Delta X_1$ ,  $\Delta X_2$  таковы, что границы окрестности грубых промахов не пересекаются, то появляется возможность компенсации ошибок. Естественно, что ошибка, связанная с неопределенностью положения числа на достоверной диагонали, остается, но она не превышает погрешности определения исходных значений.

Для коррекции ошибочных значений можно предложить следующий алгоритм. 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 повторяется до тех пор, пока не найдем точку, для которой решение попадает в диапазон. Очевидно, что максимальный размер куба не превысит размера окрестности грубых промахов. Из (26) видно, что для одного вычисления необходимо  $k$  - умножений и  $k$  - сложений и одна операция взятия по модулю. Максимальное число таких операций  $r^k$ , где  $r$  - размер окрестности. Число вычислительных операций очень велико. Поэтому использование прямого перебора точек не рационально.

Нами разработано несколько быстрых алгоритмов. Все они основаны на сведении  $k$  - мерной задачи к задаче меньшей размерности.

Первый наиболее простой способ основан на сведении  $k$ -мерной задачи к  $(k-1)$ -мерной. Анализ окрестности для двумерного случая заменяется анализом значений расположенных на некоторой прямой. Вместо поиска значений в трехмерном кубе используется анализ в одной из выбранных плоскостей (рис.6).

Сократить число вычислений можно также, если учесть, что соседние точки по  $s$ -координате отличаются на  $M_s N_s$  по модулю равному произведению  $m_1 m_2 \dots m_k$ , поэтому соседние точки могут быть найдены добавлением или вычитанием заранее найденной константы.

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

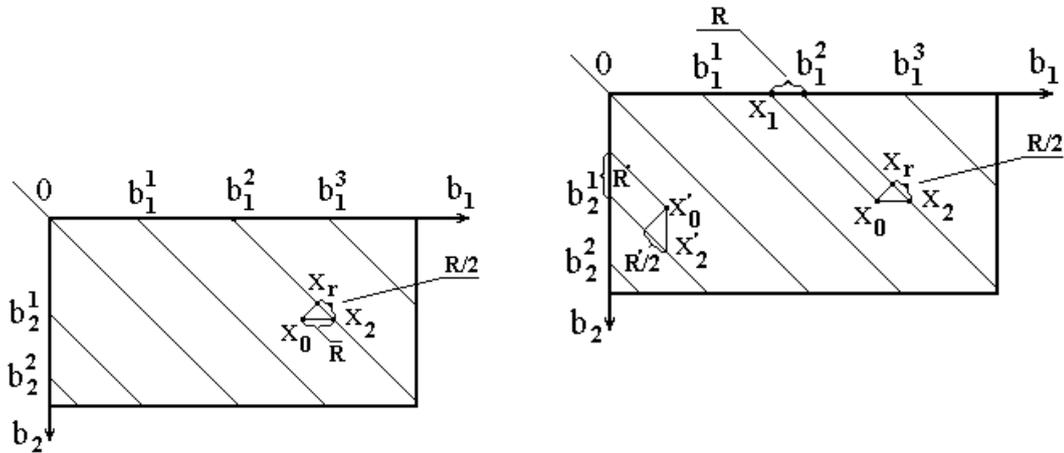


Рис.6.

Рассмотрим двухмерный случай. 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  $(b_1, b_2)$  найдем пересечение с нулевой строкой или столбцом. Затем определяем ближайшее допустимое значение в строке или столбце. Добавляя вычтенную величину, получим результирующее значение.

Схема второго быстрого алгоритма показана на рис.7.

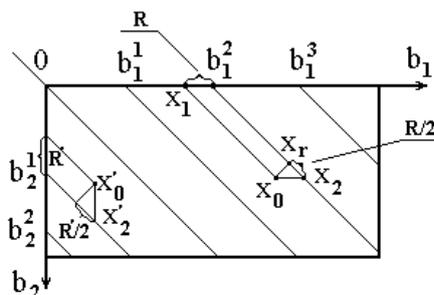


Рис.7.

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  $0 \leq b_1$  или с осью  $0 \leq b_2$ , в зависимости от соотношения между координатами. Если больше первая координата, то координаты точки  $X_0$   $(b_1 - b_2, 0)$ , в противном 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  $b_j^i$ .

Этот алгоритм позволяет достичь очень высокого быстродействия. Единственными операциями являются вычитание, сложение и выборка из одномерных массивов допустимых значений.

Рассмотрим многомерный случай. Можно заметить, что если непрерывно соединить продолжения диагоналей при последовательном возрастании чисел при склейке верхней и нижней горизонтальных строк и левого и правого столбца образуется тор (рис.8).

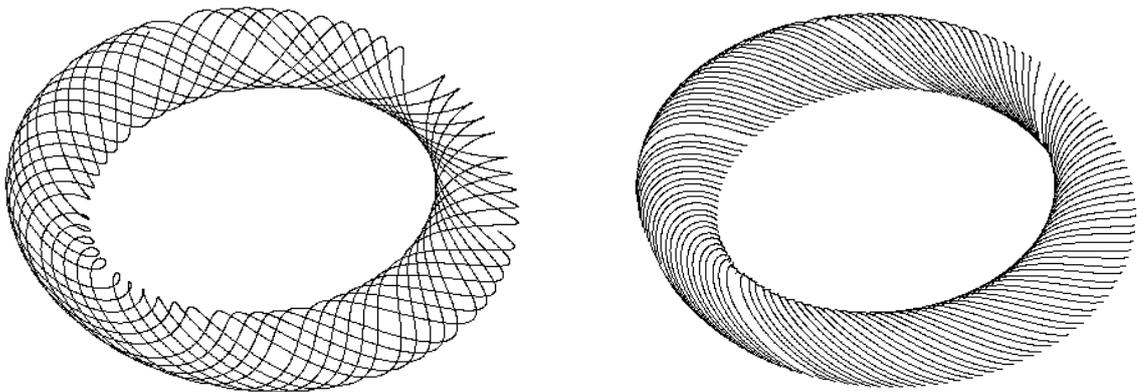


Рис.8.

Числа последовательно возрастают по спирали, нанесенной на поверхность тора. Спираль покрывает всю поверхность тора. Если ограничить число ее витков, то соседние витки будут находиться на некотором расстоянии друг от друга. На рис.8 показаны первые 10 диагоналей.

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.

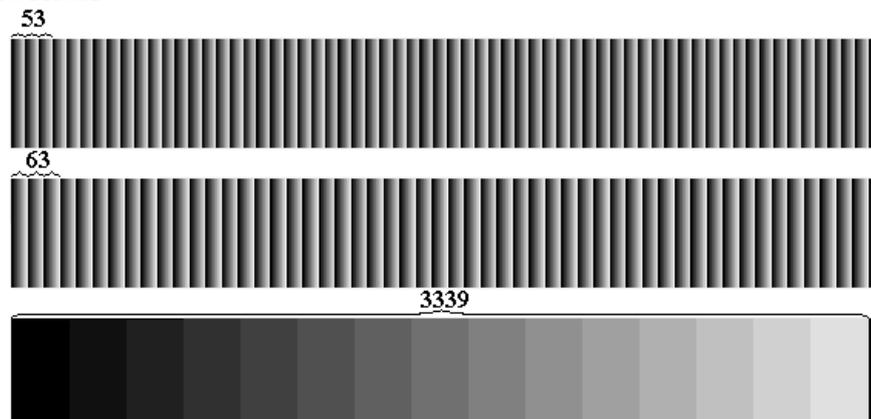
Для системы  $k$ -сравнений алгоритм имеет следующий вид.

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.  $v_{1,2}=v_{1,1}-v_{k-1,1} \bmod(m_1)$ ;  $v_{2,2}=v_{2,1}-v_{k-1,1} \bmod(m_2)$ ; ...;  $v_{k-2,2}=v_{k-2,1}-v_{k-1,1} \bmod(m_{k-2})$ ;  
 $s=s + (M_1N_1+M_2N_2+\dots+M_{k-1}N_{k-1}) v_{k-1,1} \bmod(m_1 m_2 \dots m_k)$ ;
3.  $v_{1,3}=v_{1,2}-v_{k-2,2} \bmod(m_1)$ ;  $v_{2,3}=v_{2,2}-v_{k-2,2} \bmod(m_2)$ ; ...;  $v_{k-3,2}=v_{k-3,2}-v_{k-2,2} \bmod(m_{k-3})$ ;  
 $s=s + (M_1N_1+M_2N_2+\dots+M_{k-2}N_{k-2}) v_{k-2,2} \bmod(m_1 m_2 \dots m_k)$ ;
- ...
- $k-1$ .  $v_{1, k-1}=v_{1, k-2}-v_{2, k-2} \bmod(m_1)$ ;  
 $s=s + (M_1N_1+M_2N_2) v_{2, k-2} \bmod(m_1 m_2 \dots m_k)$ ;
- $k$ .  $X=AX[v_{1, k-1}]+s+ b_k \bmod(m_1 m_2 \dots m_k)$ .

Массив  $AX$  - одномерный массив размером  $m_1$ , в котором содержатся решения системы при  $b_1=0, 1, \dots, m_1-1$ ;  $b_2=0, \dots, b_k=0$ .

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.9 показаны результаты восстановления полных значений по двум остаткам.



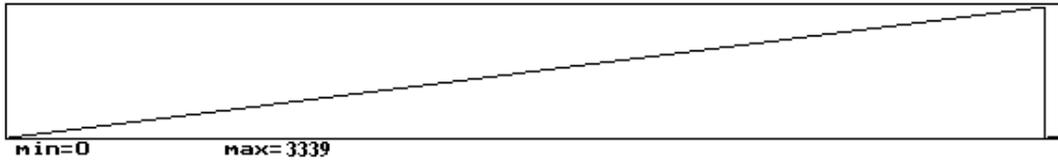


Рис.9.

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. На рис.10 показаны результаты восстановления полной фазы при ограничении диапазона величиной 315 по тем же остаткам, что и на предыдущем рисунке. 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.

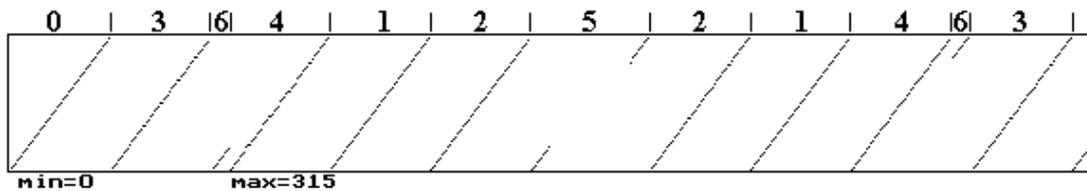


Рис.10.

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.

Таким образом, постоянный сдвиг одного набора остатков относительно другого может привести к ошибкам при коррекции восстановленных значений.

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. Для этой комбинации находятся восстановленные значения.

На рис.11 показан процесс устранения фазовой неоднозначности на примере модельного фазового фронта, который имеет перепады в соседних точках, сравнимые с длиной волны. Общий диапазон изменения полной фазы составляет 200 периодов.

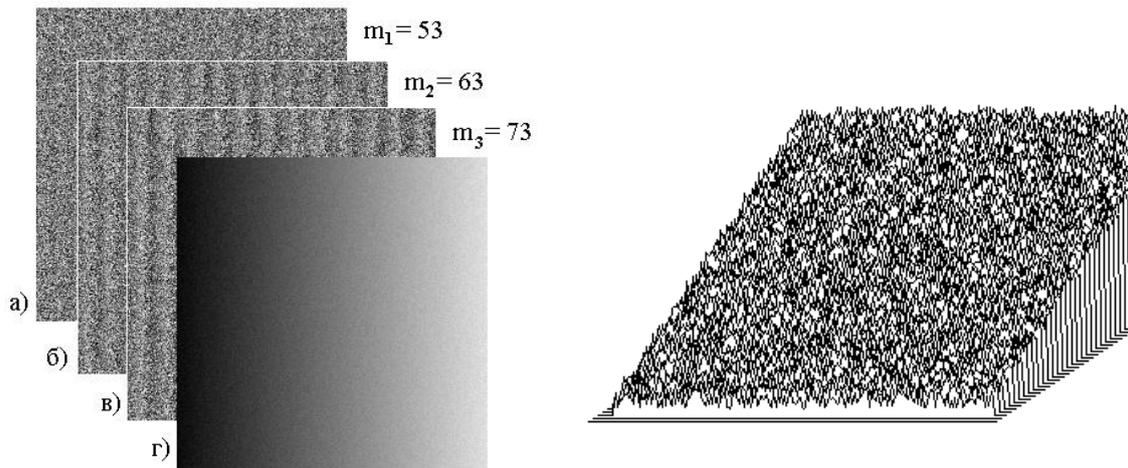


Рис.11.

На рис.12 показан график распределения поля полной фазы, полученного в экспериментальной установке при изменении угла между интерферирующими пучками.

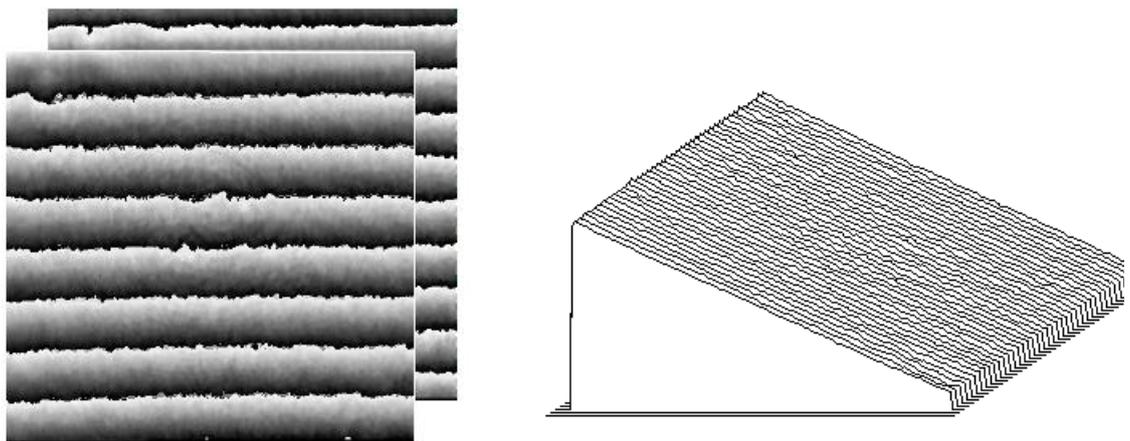


Рис.12.

В левой части рисунка представлены два поля разностей фаз, определенных по интерференционным картинам с разной ценой полосы. Для определения полей фаз использовался алгоритм с

коррекцией линейных ошибок задания фазового сдвига с усреднением углов, описанный в Главе 2. Простые значения модулей составили  $m_1=547$  и  $m_2=630$ .

Коррекция ошибочных результатов приводит к уменьшению динамического диапазона пропорционально величине окрестности грубых промахов. Размер окрестности должен соответствовать погрешности при измерении исходных данных. Например, для  $m_1=53$ ,  $m_2=63$  и размере окрестности  $r=10$  возможная ошибка при определении исходных значений  $\pm 5$  или допустимая относительная ошибка 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  $\lambda/25$ .

Применение модульной 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. Использование быстрых алгоритмов для восстановления значения числа позволяет предложить решение для основной проблемы модулярной арифметики - сравнения чисел, заданных набором остатков. В этом случае появляется возможность разработки точных быстродействующих вычислительных алгоритмов.

Метод не налагает дополнительных требований 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.

Результирующие алгоритмы просты, легко автоматизируются, позволяют обеспечить динамический диапазон измерений до сотен длин волн при сохранении интерференционной точности.

Глава 5. Разработка и экспериментальное исследование

автоматизированных интерференционных измерительных систем.

В главе рассмотрены структура, программное обеспечение и основные части автоматизированных интерференционных измерительных систем: фазовые модуляторы, устройства ввода изображений в компьютер; описаны конкретные системы, разработанные под руководством и при участии автора в 1980-1997 годах.

Для анализа напряженно-деформированного состояния объектов при использовании голографических накладных интерферометров была разработана система обработки на основе выделения центров полос. Система применялась для определения деформаций при растяжении изотропной пластинки, ослабленной центральным круговым отверстием. Голографические интерферограммы записывались во встречных пучках методом двух экспозиций. Регистрирующая среда крепится на поверхности исследуемого элемента с помощью прозрачного слоя.

При определении относительных деформаций использовалось два подхода. Первый: вначале определялись компоненты вектора перемещений, (аппроксимация полей перемещений в точках между центрами полос осуществлялась кубическими сплайнами), затем по соотношениям Коши вычислялись компоненты тензора деформаций. Второй: аппроксимация функции порядков полос осуществлялась с помощью модели упругой линии статически неопределимой балки переменной жесткости, а затем определялись деформации, и интегрированием находились перемещения. Из-за погрешностей в определении центров полос найденные деформации приходилось сглаживать методом наименьших квадратов.

Получено качественное совпадение экспериментального решения тестовой задачи и теоретического решения, что позволяет говорить о возможности исследования напряженно-деформированного состояния образцов с допустимой для инженерных расчетов точностью.

При измерении плоскостности оптических поверхностей используются промышленные интерферометры типа Физо ИТ-200, ИТ-100. Для получения количественных характеристик была проведена модификация интерферометров. Вместо фотокамеры было установлено устройство ввода оптической информации на основе телевизионной камеры КТ-М. Повышение качества интерферограмм достигается заменой ртутной лампы на гелий-неоновый лазер. Управление режимами работы осуществляется с помощью дистанционного пульта. Исполняющая программа записана в постоянном запоминающем устройстве компьютера.

Обработка проводилась на основе выделения спектральных

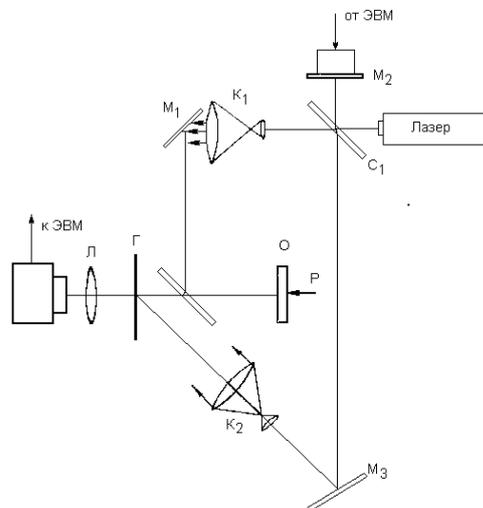
составляющих, соответствующих полезному сигналу. Алгоритм расшифровки основан на специализированной фильтрации в частотной области. Применяемая методика позволяет свести к минимуму аппаратную часть системы и полностью автоматизировать процесс контроля.

Проведены экспериментальные исследования методических погрешностей системы при различных формах поверхности. Система имеет следующие характеристики:

- диапазон изменения от  $\lambda/25$  до  $5\lambda$ ;
- 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.

Для определения поля прогиба мембраны, жестко закрепленной по краям и нагруженной в центре сосредоточенной силой, применялся метод голографической интерферометрии реального времени с использованием контролируемого фазового сдвига (рис.13).



- $C_1, C_2$  - светоделители;
- $M_1, M_3$  - зеркала;
- $M_2$  - зеркало, закрепленное на пьезокерамике;
- $K_1, K_2$  - коллиматоры;
- О - объект, нагруженный силой Р; Г - голограмма;
- Л - объектив, строящий изображение на мишени телевизионной трубки.

Рис.13.

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 мембраны отраженный от поверхности волновой фронт интерферировал с фронтом, восстановленным от

голограммы.

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. 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.

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 указало на возможность нетрадиционного (в серединах сторон вблизи края мембран) расположение 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. 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 нами разработана измерительная интерференционная система, оптическая схема которой представляет интерферометр Тваймана-Грина с эталонным зеркалом, закрепленным на пьезокерамике для внесения фазовых сдвигов.

Система имеет следующие характеристики:

- диапазон изменения от  $\lambda/50$  до  $10\lambda$ ;
- погрешность в точке -  $\lambda/50$ ;
- среднеквадратичное отклонение -  $\lambda/100$ ;
- используемая длина волны -  $\lambda=0.633\text{мкм}$ .

Для определения деформаций, нормальных к плоскости диффузной пластины, использовалась спекл-интерференционная система, реализующая алгоритмы расшифровки на основе использования 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 пропускаемым током. Величина тока задавалась от компьютера. Схема спекл-интерферометра и структура системы для измерения смещений от нормальных к плоскости объекта нагрузок показана на рис.14.

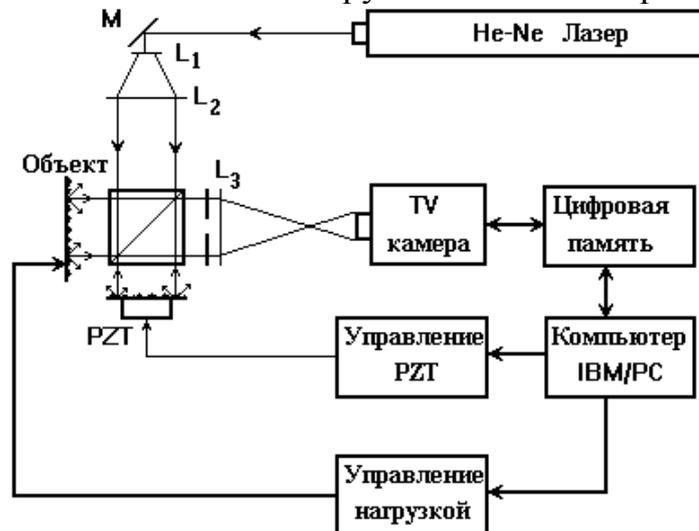


Рис.14.

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 помощью цифро-аналогового преобразователя, управляемого от компьютера. С помощью другого канала ЦАП производилось контролируемое управление нагрузкой. Исследуемая область имела размеры 50 на 50 мм.

На рис.15 представлены значения фаз, соответствующих смещению поверхности объекта от нагрузки по предложенному нами алгоритму.

Сравнение результатов с тестовыми измерениями показало, что точность определения поля смещений составила не менее  $\lambda/20$ - $\lambda/30$ . Время определения фазового фронта составило порядка трех минут.

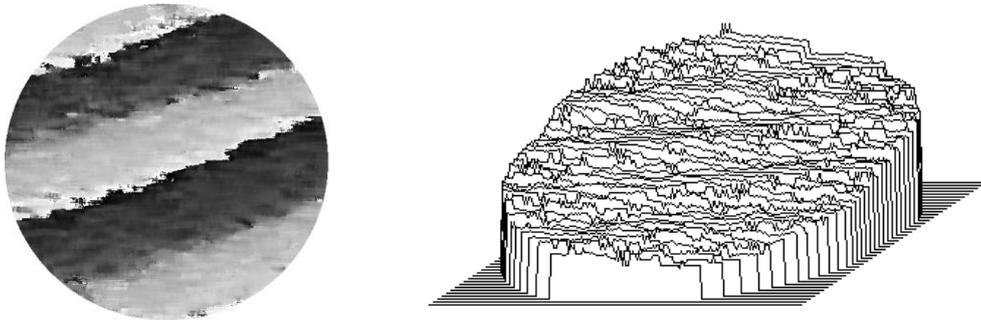


Рис.15.

Для определения абсолютных перемещений разработан датчик. Метод измерения основан на специальном кодировании сигналов в фотоэлектрических растровых преобразователях. Схема измерителя показана на рис.16.

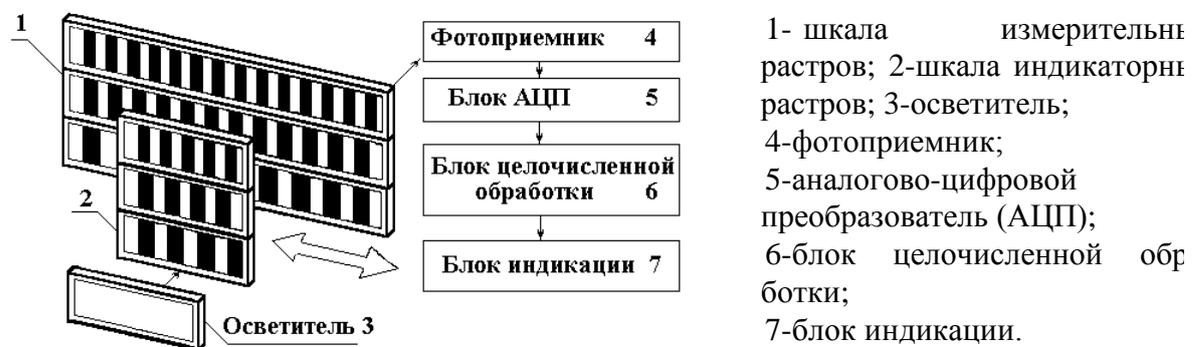


Рис.16.

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.

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.

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 равен 20 мкм. Регистрируемый сигнал при прохождении через растровое сопряжение, выполненное с зазором около двух растровых периодов, за счет дифракционных эффектов и пространственного усреднения по 100 периодам приобретает форму, близкую к гармонической. Выбором соответствующей геометрии и размера растров можно добиться синусоидальной формы сигналов, снимаемых с фотоприемника.

Для измерения точной формы сигнала и исследования метрологических характеристик измерителей линейных перемещений была разработана интерференционная система.

Экспериментальная установка обеспечивала контроль перемещений с погрешностью 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. Информацию о перемещении можно извлечь из текущей фазы информационного сигнала. Поскольку фаза может быть определена только в пределах периода, полная фаза, соответствующая абсолютному перемещению, определяется суммированием числа полных периодов. Поэтому, такие приборы называются преобразователями накопительного типа. Однако процесс накопления часто приводит к ошибкам, вызванным единичными сбоями.

Используя аппарат целочисленной арифметики, описанный в Главе 4, можно определять значение полной фазы по нескольким измерениям фаз при различных величинах периода. Диапазон определения абсолютных перемещений можно расширить, увеличивая число измерений при различных периодах, либо повышая точность.

Конкретные значения периодов определяются из условия взаимной простоты чисел, соответствующих периодам, и из технологических условий изготовления оптических линеек. Например, при использовании четырех растров, при размере раstra 30-40 мкм можно выбрать шкалу с размерами растров 29, 31, 38, 41. При этом погрешность измерения перемещений должна составить не менее 1 мкм. Диапазон измерения абсолютных перемещений, в этом случае, составит 1.363 м.

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 определенных на предыдущих шагах значений, используются лишь локальные измерения. Кроме того, определение абсолютного перемещения определяется по измерениям в одной точке шкалы. Скорость перемещения не влияет на процесс измерений, поэтому достоверность и скорость измерения существенно увеличиваются.

## 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.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Гужов В.И., Дружинин А.И., Козачок А.Г., Логинов А.В. Измерительно-вычислительная система для анализа напряженно-деформированного состояния объектов// Автометрия.-1982.- №4.-

- C.102-103.
2. Гужов В.И., Родионов В.А Система создания и редактирования трехмерных сцен// Системы автоматизации обработки оптической информации/ Новосибирск.-1984.-С.106-111.
  3. Гужов В.И., Родионов В.А. Цифровое моделирование оптических систем для фазометрии// Системы автоматизации обработки оптической информации/ Новосибирск.-1984.-С.112-121.
  5. 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.
  6. 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.
  7. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Способ определения разности фаз. - Заявка 4087285. А.с. № 1357712, 1986, БИ.- №45.- 1987.
  8. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Использование свойств целых чисел для расшифровки интерферограмм// Оптика и спектроскопия.- 1988.- т.65.- вып.5.- С.1123-1128.
  9. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Оценка точности целочисленного интерферометра// Оптика и спектроскопия.- 1988.- т.65.- вып.6.- С.1313-1316.
  10. 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.
  11. 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.
  12. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Способ определения разности фаз световых волн. - А.с. № 1619033, 1990- БИ.-№1.-1991.
  13. Гужов В.И., Кузнецова И.В., Солодкин Ю.Н. Интерференционное устройство для измерения перемещений объектов. -

- А.с. № 1663416, 1991.- БИ.-'26.- 1991.
14. 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. Abstracts.- Harbin. China.-1991.-P.31.
  15. 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.
  16. 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.
  17. 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.
  18. 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.
  19. 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.
  20. 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.
  21. 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.
22. Гужов В.И., Козачок А.Г., Нечаев В.Г. Измерение деформаций диффузных поверхностей методом цифровой спекл-интерферометрии// Оптический журнал.-1996.- №10.-с.73-76
23. Gushov V.I., Nechaev V.G. In-plane deformation measurement by digital phase-shifting speckle-interferometry// Proc.SPIE.-1996.- Vol.2791.-P.165-169.
24. Гужов В.И., Нечаев В.Г. Измеритель абсолютных перемещений. Патент №2097685. G01 B 11/00. Приоритет 13.05.1996.-№33.-1997.
25. 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.
26. 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.-No.3.-P.80-87.
27. Гужов В.И., Нечаев В.Г. Расшифровка спеклограмм методом управляемого фазового сдвига. // Автометрия.-1999.- №1. -С.21-26.

Подписано к печати \_\_\_\_\_ 1999 г. Формат 84x60x1/16  
Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Печ.л.1,5  
Заказ №

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630092, г.Новосибирск, пр.К.Маркса,20