

Новосибирский электротехнический институт

На правах рукописи

Экз. № _____



ГУЖОВ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ

УДК 535.41.001.5:511

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКИХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

Специальность 05.11.16 - информационно-измерительные
системы (в промышленности)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
профессор А. Г. Козачок

Новосибирск - 1987

С о д е р ж а н и е

	Стр.
В В Е Д Е Н И Е	4
1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ РАЗНОСТИ ФАЗ И СПОСОБОВ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИСТЕМ	8
1.1. Методы определения полей разности фаз	8
1.1.1. Расшифровка интерферограмм с выделением центров полос	9
1.1.2. Расшифровка интерферограмм с использованием Фурье-анализа	13
1.1.3. Определение разности фаз с помощью гетеродинного метода	15
1.1.4. Определение разности фаз с помощью управляемого фазового сдвига	18
1.2. Анализ способов построения измерительных интерференционных систем	28
1.3. Обоснование и конкретизация задач диссертационной работы	38
2. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО СПОСОБА УСТРАНЕНИЯ ФАЗОВОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ	41
2.1. Анализ существующих алгоритмов устранения фазовой неоднозначности	41
2.2. Использование свойств целых чисел для устранения фазовой неоднозначности	45
2.3. Локальный способ устранения фазовой неоднозначности при изменении ширины интерференционной полосы	47
2.4. Оценка точности определения полной фазы	52
2.5. Анализ динамического диапазона локального способа	60
2.6. В ы в о д ы	61

3. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ СИСТЕМА С УПРАВЛЯЕМЫМ ФАЗОВЫМ СДВИГОМ	63
3.1. Описание структуры системы	63
3.2. Устройства внесения фазового сдвига	65
3.3. Устройства ввода оптической информации	72
3.4. Программное обеспечение системы	79
3.5. В ы в о д ы	85
4. АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ С УПРАВЛЯЕМЫМ ФАЗОВЫМ СДВИГОМ	86
4.1. Анализ влияния первичных погрешностей при определении поля разности фаз	86
4.2. Влияние спекл-шума на погрешность определения поля разности фаз	94
4.3. Влияние паразитных волновых фронтов на погрешность определения поля разности фаз	97
4.4. Анализ погрешности от дискретности изменения интенсивности	99
4.5. Калибровка устройств управления фазовым сдвигом	107
4.6. В ы в о д ы	108
5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ СИСТЕМЫ	110
5.1. Анализ полей деформаций накладными голографическими интерферометрами	110
5.2. Определение прогиба мембран интерференционными методами	116
5.3. Определение <u>плоскостности</u> поверхности оптических элементов интерференционными методами	121
5.4. Определение рельефа поверхности пробных стекол	127
5.5. В ы в о д ы	131
З А К Л Ю Ч Е Н И Е	134
Список использованной литературы	137
П Р И Л О Ж Е Н И Я	151

В В Е Д Е Н И Е

Потребности ряда ведущих направлений науки и отраслей техники — теории прочности, аэродинамики, точного машиностроения, оптического приборостроения — приводят к необходимости создания информационно-измерительных систем (ИИС) с высокими метрологическими характеристиками.

Когерентно-оптические методы обладают такими преимуществами как бесконтактное и одновременное получение информации по всей поверхности исследуемого объекта; низкий порог чувствительности, определяемый долями длины световой волны; возможность решения как статических, так и динамических задач. Появление лазеров непрерывного действия значительно расширило область применения классических интерференционных методов и сделало возможным практическое использование методов голографической интерферометрии.

Интерферограмма содержит информацию о параметрах исследуемого объекта по всему полю. В некоторых случаях уже сам характер интерференционной картины позволяет делать важные выводы о дефектах структуры, сравнивать исследуемые объекты с эталонными и решать другие задачи качественного характера. Однако в большинстве экспериментальных исследований необходимо получение количественной информации об объекте или процессе. Обработка и расшифровка интерферограмм сопряжена в общем случае с большим объемом вычислительных операций. Определение количественной информации с помощью интерференционных методов привело к необходимости создания автоматизированных когерентно-оптических измерительных систем [52] , содержащих лазер, оптическую установку, устройство ввода интерферограмм в ЭВМ, собственно ЭВМ с набором периферийных устройств и устройств представления результатов измерений в удобном для экспериментатора виде. По своим характеристикам такую систему можно

считать приближающейся к ИИС третьего поколения [75, 76] . Интерферометр является системным преобразователем поля измеряемых величин в интерференционную картину и в значительной степени определяет характеристики системы в целом. В таких системах ЭВМ выполняет функцию сбора и обработки информации. Использование ЭВМ для управления некоторыми параметрами оптической установки позволило разработать новые алгоритмы расшифровки, дающие возможность осуществить полностью автоматический режим измерений. Создание интерференционных измерительных систем на основе таких алгоритмов позволит полностью автоматизировать научные исследования широкого круга явлений и процессов.

Наибольшее развитие за последние годы получили системы с управляемым фазовым сдвигом. Появились первые промышленные установки на основе этого принципа. Однако многие вопросы при разработке таких систем остаются неисследованными. К ним, в первую очередь, относятся вопросы оценки достоверности результатов измерений и способы практической реализации интерференционных систем с управляемым фазовым сдвигом. Очень важными представляются также вопросы дальнейшего совершенствования методик с целью достижения большей точности измерения, расширения динамического диапазона и полной автоматизации измерений.

В соответствии с этим, цель диссертационной работы заключалась в совершенствовании методов интерференционных измерений при внесении управляющих воздействий в схему оптической установки и разработки на этой основе измерительных систем, обладающих улучшенными метрологическими характеристиками.

Диссертация состоит из семи разделов (Введения, пяти глав, Заключения) и Приложения.

В первой главе приведена классификация методов определения фазовых характеристик волновых полей интерференционными методами,

рассматривается структура известных алгоритмов, анализируются способы построения автоматизированных интерференционных измерительных систем по материалам отечественной и зарубежной литературы. На основании этих данных сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены существующие методы удаления фазовой неоднозначности и исследуется предложенный локальный способ нахождения полной фазы по значениям фаз, определенных в пределах периода, полученных при различных ценах интерференционных полос.

Третья глава посвящена вопросам аппаратного и программного обеспечения предложенных интерференционных измерительных систем.

В четвертой главе проведен анализ метрологических характеристик систем с управляемым фазовым сдвигом.

В пятой главе проведено экспериментальное исследование разработанной интерференционной измерительной системы путем решения конкретных экспериментальных задач.

В Заключении резюмируются основные результаты работы.

В Приложении приведено описание программ и отражено внедрение результатов диссертации.

Основные положения, выносимые на защиту:

— принципы построения автоматизированных локальных систем для однозначного измерения полей разности фаз;

— локальный способ удаления фазовой неоднозначности, основанный на решении систем сравнений целых чисел;

— способ устранения грубых промахов при удалении фазовой неоднозначности;

— соотношения, позволяющие оценить погрешность определения разности фаз методами управляемого фазового сдвига;

— аппаратная реализация и программное обеспечение системы измерения полей разности фаз.

Автор считает своим долгом отметить большое влияние, которое

оказали на работу советы и поддержка научного руководителя, профессора А.Г. Козачка.

Ряд вопросов, касающихся темы диссертации, обсуждался с большой пользой для автора с к.т.н., доцентом Ю.Н. Солодкиным и к.т.н., доцентом Б.В. Карпюком.

Автор выражает благодарность сотрудникам Лаборатории автоматизации экспериментальных исследований за помощь при выполнении и обработке экспериментов.

I. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ РАЗНОСТИ ФАЗ И СПОСОБОВ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИСТЕМ

I.1. Методы определения полей разности фаз

Необходимость регистрации и выделения волнового фронта в оптике является гораздо более сложной проблемой по сравнению с аналогичными задачами в более длинноволновом диапазоне, т.к. основные оптические детекторы не позволяют непосредственно регистрировать комплексную амплитуду поля, а реагируют лишь на интенсивность принимаемого излучения. Поэтому все существующие методы измерения фазы оптической волны являются косвенными [7] .

Основу метода Гартмана [16] составляет разбиение световой волны на отдельные пучки. Достигается это помещением на пути световой волны экрана с отверстиями — диафрагмы Гартмана. Вне фокуса системы регистрируется система пятен — снимок Гартмана. Для идеального волнового фронта положение пятен на снимке можно вычислить. Измерив отклонения от вычисленных значений, можно получить систему поперечных аберраций. Метод Гартмана может использоваться для произвольных волновых фронтов, однако он требует точного изготовления диафрагмы Гартмана и имеет конечное пространственное разрешение, определяемое количеством и размером единичных диафрагм.

Теневой метод основан на преобразовании фазовых изменений волнового фронта в модуляцию интенсивности (Нож Фуко и т.п.). Применение телевизионной техники и разработка нового способа количественной калибровки теневой картины позволили повысить оперативность метода. Однако этот метод не может быть применен к произвольно модулированным волнам.

Наиболее универсальными являются методы, основанные на интерференционных принципах. Регистрируется поле интенсивностей, являющееся результатом интерференции волновых фронтов. Такое поле пред-

ставляет собой регулярную структуру полос, которые несут информацию о разности фаз интерферирующих световых волн.

Различные методы расшифровки можно разделить на две группы [92]: статические — расшифровка ведется по интерферограмме или серии интерферограмм, полученных при неизменной структуре оптической установки; и динамические — необходимая информация определяется по серии измерений при изменении некоторых параметров в схеме интерферометра по известному закону. Понятно, что такое разделение является достаточно условным. Некоторые динамические методики удастся реализовать, усложняя схему интерферометра, с помощью дополнительных параллельных оптических каналов [124], волновые поля в которых отличаются друг от друга на некоторую известную величину. Однако такое разделение является достаточно удобным при описании структуры алгоритмов расшифровки.

К статическим можно отнести расшифровку с помощью выделения центров полос и метод, основанный на Фурье-анализе.

К динамическим — расшифровку с использованием гетеродинных методов и расшифровку с использованием управляемого фазового сдвига.

1.1.1. Расшифровка интерферограмм с выделением центров полос

Картина интерференции неизвестного поля

$$F(\bar{x}) = A(\bar{x}) \exp(i\psi(\bar{x})) \quad (1.1)$$

и опорного поля

$$R(\bar{x}) = B(\bar{x}) \exp(i\varphi(\bar{x})) \quad (1.2)$$

определяется выражением

$$I(\bar{x}) = |R + F|^2 = |R|^2 |1 + a|^2, \quad (1.3)$$

где $a = F/R$, $\bar{x} = (x, y, z)$. Выражение (1.3) можно переписать в виде:

$$I(\bar{x}) = A^2(\bar{x}) + B^2(\bar{x}) + 2A(\bar{x})B(\bar{x})\cos(\Psi(\bar{x}) - \Phi(\bar{x})). \quad (1.4)$$

Интерференционная картина, представленная уравнениями (1.3), (1.4) является исходной для расшифровки.

Из рис. 1.1 видно, что существует бесконечно много комплексных величин a_0, a_1, \dots , удовлетворяющих уравнению (1.3) в любой точке \bar{x} [122].

Оси графика

$$a_i = (A/B) \sin(\Psi - \Phi), \quad (1.5)$$

$$a_r = (A/B) \cos(\Psi - \Phi) \quad (1.6)$$

соответствуют мнимой и реальной частям a .

Любой вектор \bar{a} , выходящий из начала координат, соответствует одному и тому же значению яркости. Поэтому для однозначного определения вектора \bar{a} необходима дополнительная информация о поведении интерферирующих полей. Если такой информации нет, то из (1.4) можно определить лишь координаты точек, в которых разность фаз кратна полупериоду. На интерферограмме такие точки составляют линии локальных максимумов или минимумов (линии середин полос).

По внешнему виду интерференционных полос можно восстановить некоторую качественную информацию о поле разностей фаз. Сравнивая интерференционную картину с набором эталонных изображений, определяли, например, отклонение формы изучаемого объекта от эталонного.

Однако в большинстве случаев необходимо по интерферограмме определять количественную информацию. Для получения количественных данных требовалось измерять координаты полос и определять их порядок. Разность фаз в промежутках между полосами определяли с помощью различных методов аппроксимации, которые выбирались так, чтобы результаты наиболее полно соответствовали априорному знанию о поведении искомой разности фаз. (В механике наиболее часто исполь-

Множественность векторов, удовлетворяющих одному
значению интенсивности

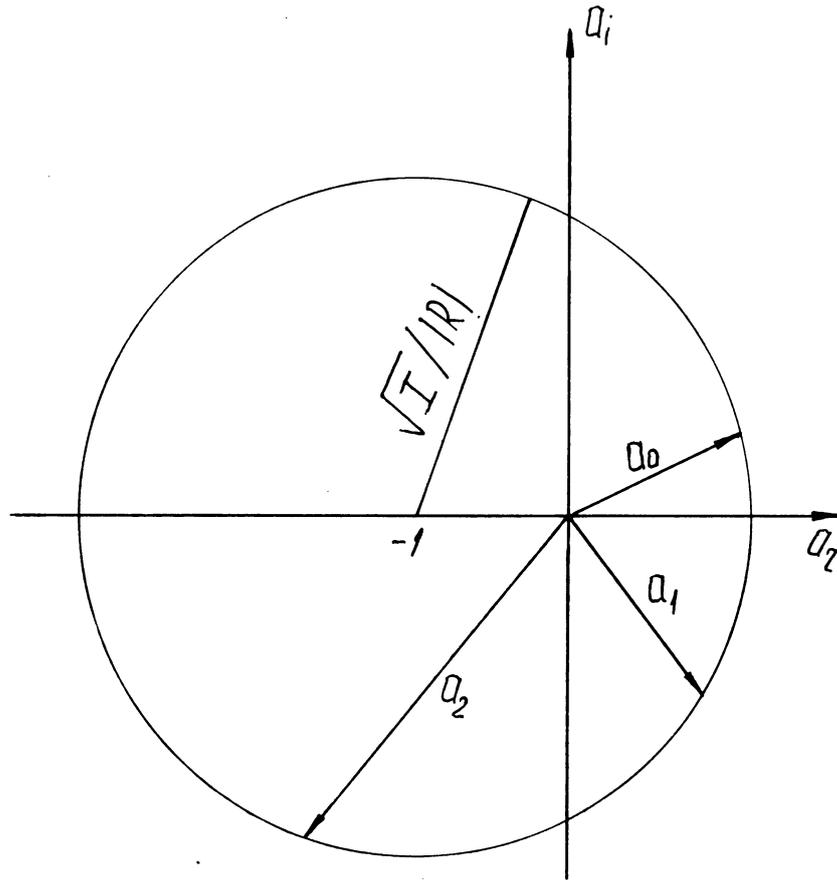


Рис. 1.1

зовалась аппроксимация сплайнами, в оптике — полиномами Цернике).

Первые попытки количественной расшифровки состояли из "ручного" определения координат полос и измерения расстояний между ними по направлению выбранного сечения с помощью масштабной линейки. Затем по таблицам определялись нужные характеристики. Огромное количество рутинной работы вызвало потребность разработки средств автоматизации. Первые установки для автоматизации процесса расшифровки [57] состояли из системы ручного позиционирования интерферограмм и ввода данных в мини- или микрокомпьютер. Шаговые двигатели с помощью электронной системы позволяют перемещать интерферограмму относительно координатной сетки до тех пор, пока визирный крест не совпадет с измеряемой полосой. Затем оператор убирает координатную сетку и определяет порядок полосы. Данные считываются в компьютер, который по полученным данным автоматически определяет необходимые характеристики.

Дальнейшее развитие систем автоматизации связано с появлением устройств ввода оптической информации в ЭВМ и с разработкой алгоритмов выделения середин полос по интерферограммам [92, 95, 102, 108, 109, 117]. В настоящее время разработаны алгоритмы, которые достаточно уверенно выделяют координаты полос для различных классов изображений. Однако полностью универсального алгоритма пока не существует. Поэтому наиболее приемлемым представляется сочетание автоматических алгоритмов с визуальной интерпретацией и интерактивной коррекцией результатов оператором.

К недостаткам систем автоматизации расшифровки методом выделения середин полос можно отнести следующее:

- без участия оператора невозможно определить знак приращения фазы;
- точность выделения середин полос снижается из-за вариаций амплитуд интерферирующих волновых полей, из-за искажений, вызван-

ных спекл-шумами, вибрациями, воздушными турбулентностями;

— выбранные методы аппроксимации вносят произвол в определение фазы в промежутках между серединами полос;

— трудно определить и скомпенсировать дефекты интерферометра.

Это приводит к тому, что в большинстве систем точность выделения середин не превышает десятой части полосы, алгоритмы определения достаточно сложны, недостаточно эффективны, полное время обработки велико, требуется участие оператора в процессе обработки и расшифровки.

Однако подобные системы не накладывают дополнительных требований ни на оптическую схему, ни на вид интерференционных полос, что позволяет использовать их для расшифровки интерферограмм, которые были получены на всех типах оптических и голографических интерферометров.

1.1.2. Расшифровка интерферограмм с использованием Фурье-анализа

Другим способом выделения фазовой информации по интерферограмме является метод, основанный на Фурье-преобразовании [92, 99, 106, 127].

Интенсивность двух интерферирующих волновых фронтов в плоскости интерферограммы можно записать в виде (1.4), где комплексные амплитуды неизвестного и опорного полей определяются соответственно (1.1) и (1.2). Если опорной волной является плоская волна, распространяющаяся под углом θ к нормали интерферограммы,

$$R(\bar{x}) = B(\bar{x}) \exp(-ikx \sin \theta), \quad (1.7)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, то интенсивность определяется как

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \psi(x, y)), \quad (1.8)$$

где $a(x, y)$ и $b(x, y)$ - неизвестные изменения интенсивностей, $\Psi(x, y)$ - фаза неизвестного волнового фронта, $f_0 = \frac{\sin \theta}{\lambda}$ - пространственная несущая частота. Интенсивность может быть записана:

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(2\pi i f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-2\pi i f_0 x), \quad (1.9)$$

где

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp(i \Psi(x, y)) \quad (1.10)$$

и * - знак комплексного сопряжения.

Фурье-преобразование $I(x, y)$ по x :

$$G(f, y) = A(f, y) + c(f - f_0, y) + c^*(f + f_0, y). \quad (1.11)$$

Если пространственная частота функций $a(x, y)$, $b(x, y)$ и $\Psi(x, y)$ существенно отличается от несущей частоты f_0 , то $G(f, y)$ - тримодальная функция с пиками $-f_0$, f_0 и в центре. $c(f - f_0, y)$ может быть выделена фильтрацией относительно f_0 . После сдвига на f_0 и обратного преобразования Фурье получим (1.10). Фаза неизвестного волнового поля определяется как

$$\Psi(x, y) = \operatorname{tg}^{-1} \left\{ \operatorname{Re}(c(x, y)) / \operatorname{Im}(c(x, y)) \right\}, \quad (1.12)$$

где $\operatorname{Re}(\cdot)$ - реальная часть; $\operatorname{Im}(\cdot)$ - мнимая часть, или, применяя комплексный натуральный логарифм:

$$\ln c(x, y) = \ln \frac{b(x, y)}{2} + i \Psi(x, y), \quad (1.13)$$

содержащий $\Psi(x, y)$ только в мнимой части.

Метод, основанный на Фурье-преобразовании, по сравнению с методом расшифровки по центрам полос, более точен и легко реализуем. По сравнению с динамическими методами не требуется дополни -

тельной аппаратуры. Однако область его применения ограничена пространственным разрешением спектров анализируемых волновых фронтов. При использовании метода необходимо вносить значительные наклоны между интерферирующими фронтами для получения высоких пространственных несущих.

1.1.3. Определение разности фаз с помощью гетеродинного метода

С помощью гетеродинной техники разность фаз или разность оптических путей волновых фронтов можно определить непосредственно [104]. Рассмотрим рис. 1.2. Оптический луч от лазера разделяется на две компоненты, и в каждую из них с помощью акустооптических модуляторов вносится частотный сдвиг. В одном из плеч интерферометра Майкельсона полуволновая пластинка поворачивает плоскость поляризации на 90° , и далее оба пучка идут по одному направлению, но не интерферируют между собой, поскольку плоскости поляризации пучков ортогональны друг другу. В селективном интерферометре Твайма — Грина один из пучков отражается от тестируемой поверхности, другой — от эталонного зеркала. В выходной плоскости интерферометра после прохождения линейного поляризатора, ориентированного под углом 45° к обеим плоскостям поляризации, волны интерферируют. Детектор, помещенный в точку (x, y) , будет выдавать фототок, определяемый

$$I_S = \langle \left\{ \bar{f}_0 \cos[(\omega_0 + \omega_1)t + \varphi_1(x, y)] + \bar{f}_1 \cos[(\omega_0 + \omega_2)t + \varphi_2(x, y)] \right\}^2 \rangle, \quad (1.14)$$

где \bar{f}_0, \bar{f}_1 — электрические поля; ω_1, ω_2 — частотный сдвиг; φ_1, φ_2 — фазовые задержки двух фронтов; $\langle \rangle$ — обозначение усреднения за один оптический период.

Основная часть выражения (1.14)

$$i_s = \int_0 \int_1 \text{Cos}[\Delta \omega t + \Delta \varphi(x, y)] , \quad (I.15)$$

где $\Delta \omega = (\omega_2 - \omega_1)$ и $\Delta \varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$.

Детектор, помещенный в другую точку (x_0, y_0) выходного пучка, производит сигнал:

$$i_z = \int_0 \int_1 \text{Cos}[\Delta \omega t + \Delta \varphi(x_0, y_0)] . \quad (I.16)$$

Сигналы (I.15) и (I.16) поступают на фазовый компаратор, с выхода которого оптическая разность фаз снимается, как уровень аналогового напряжения. Измеряя фазу в различных точках (x, y) относительно стационарной точки (x_0, y_0) , можно определить разность фаз оптических волн по полю.

Существуют следующие пути реализации гетеродинирования по полю:

- для высокоскоростных измерений необходимо создавать установки, состоящие из набора параллельно работающих детекторов;

- для измерений медленно меняющихся процессов подходят электронно сканирующие детекторы. (В качестве такого детектора может быть использована электронно-лучевая трубка типа диссектора (рис. I.2));

- системы детектирования с механическим сканированием подходят только для стационарных объектов.

Количественный анализ, проводимый с помощью гетеродинной техники, обеспечивает наибольшую из всех известных методов точность. Но применение такой технологии требует сложной и специализированной аппаратуры [95]. Приращение фазы между соседними отсчетами не может превышать четверти периода.

Гетеродинная оптическая установка

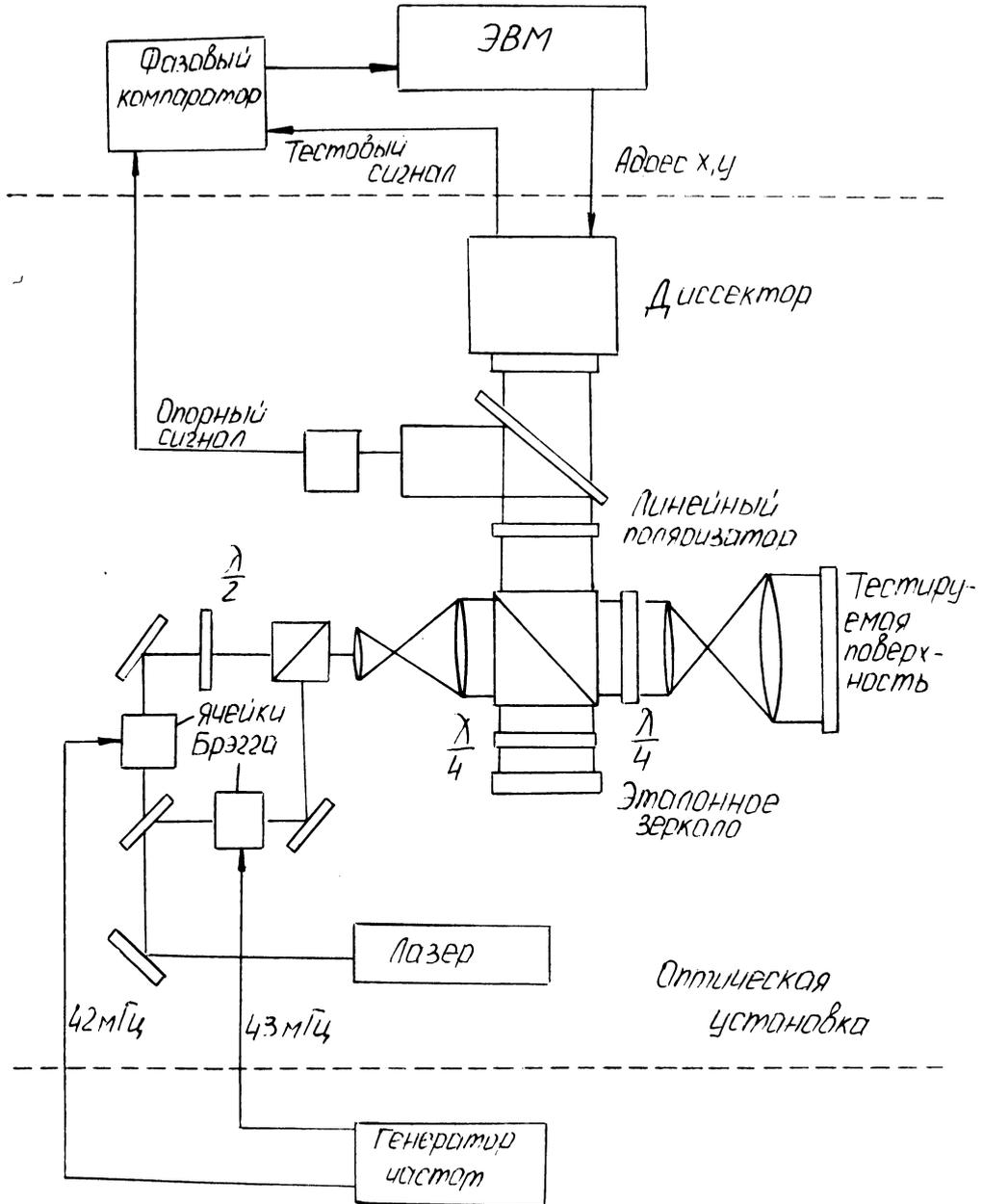


Рис. 1.2

I.I.4. Определение разности фаз с помощью управляемого фазового сдвига

Комплексную амплитуду неизвестного поля в плоскости регистрации можно определить, изменяя опорную волну R при неизменном поле F . С этой целью регистрируются три интерференционные картины [7, 122]:

$$I_l = |R_l + F|^2, \quad (I.17)$$

где $l = 1, 2, 3$. Для трех различных опорных полей выделим мультипликативный элемент $\Delta^l R$:

$$R_l = (\Delta^l R) R = [(\Delta^l B) \exp(i\Delta_l \Phi)] R, \quad (I.18)$$

где $\Delta^l B$ и $\Delta^l \Phi$ описывают изменение соответственно амплитуды и фазы. Перепишем (I.17) в виде

$$I_l = |(\Delta^l R) R + F|^2 = |R|^2 |\Delta^l R + a|^2, \quad (I.19a)$$

$$I_l = |R|^2 [(\Delta^l R_z + a_z)^2 + (\Delta^l R_i + a_i)^2], \quad (I.19b)$$

$$I_l = (R_{ez} + F_z)^2 + (R_{ei} + F_i)^2, \quad (I.19b)$$

где подстрочные индексы z и i - обозначения реальной и мнимой частей комплексного числа. Из рис. I.3 видно, что комплексная амплитуда a (или F - соответственно) может быть однозначно определена по точке пересечения трех окружностей в комплексной плоскости. Радиус каждой окружности определяется значением $\sqrt{I_l}/|R|$, а начало координат помещено в точку $-\Delta^l R$.

Три уравнения (I.17) однозначно определяют неизвестные a_z и a_i , если удовлетворяются определенные условия. Единственность решения графически можно представить в виде единственной точки пересечения трех окружностей.

Представив (I.19b) в виде

Однозначность определения комплексной амплитуды

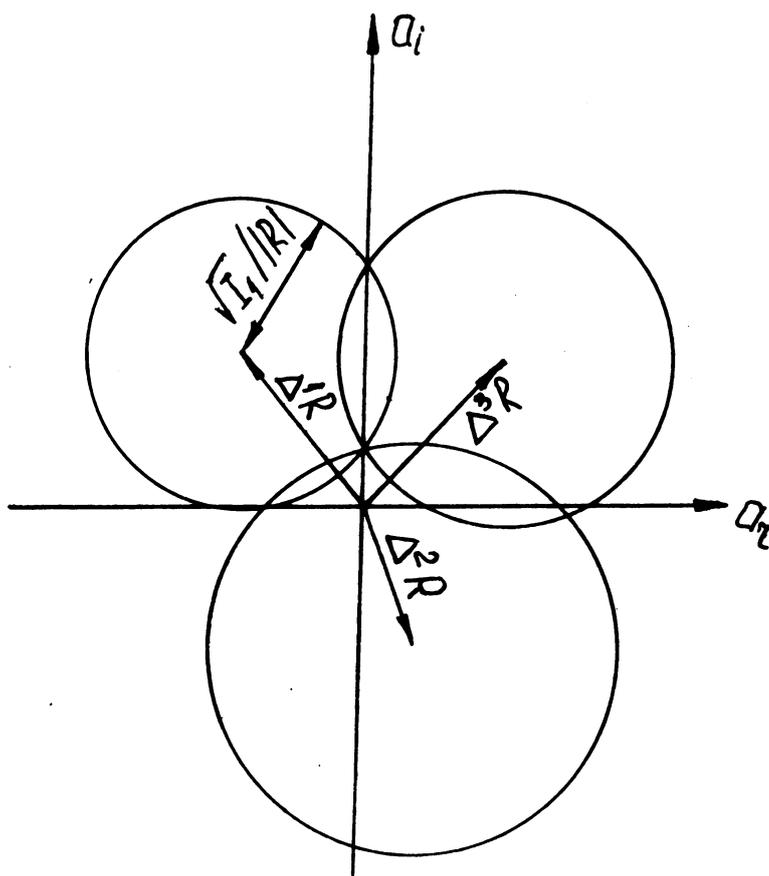


Рис. 1.3

$$K_\ell = I_\ell |R|^2 - (\Delta^\ell R_z)^2 - (\Delta^\ell R_i)^2 =$$

$$= (a_z)^2 + (a_i)^2 + 2(\Delta^\ell R_z)a_z + 2(\Delta^\ell R_i)a_i \quad (\text{I.20})$$

получим систему уравнений (I.21):

$$\frac{1}{2}(K^1 - K^2) = (\Delta^1 R_z - \Delta^2 R_z)a_z + (\Delta^1 R_i - \Delta^2 R_i)a_i$$

$$\frac{1}{2}(K^2 - K^3) = (\Delta^2 R_z - \Delta^3 R_z)a_z + (\Delta^2 R_i - \Delta^3 R_i)a_i. \quad (\text{I.21})$$

Система может быть разрешена относительно a_z или a_i , если детерминант не равен нулю.

$$(\Delta^1 R_z - \Delta^2 R_z)(\Delta^2 R_i - \Delta^3 R_i) - (\Delta^2 R_z - \Delta^3 R_z)(\Delta^1 R_i - \Delta^2 R_i) \neq 0. \quad (\text{I.22})$$

Используя запись двумерного вектора

$$\Delta^\ell \bar{R} = (\Delta^\ell R_z, \Delta^\ell R_i) \quad (\text{I.23})$$

и обозначение векторного перекрестного умножения (символ \times)

$$\Delta^2 \bar{R} \times \Delta^3 \bar{R} = (\Delta^2 R_z)(\Delta^3 R_i) - (\Delta^2 R_i)(\Delta^3 R_z), \quad (\text{I.24})$$

можно переписать выражение (I.22) в виде

$$\Delta^1 \bar{R} \times (\Delta^2 \bar{R} - \Delta^3 \bar{R}) + \Delta^2 \bar{R} \times \Delta^3 \bar{R} \neq 0. \quad (\text{I.25})$$

Из выражения видно, что существуют три различных случая, удовлетворяющих неравенству (I.25):

$$\Delta^1 \bar{R} \times (\Delta^2 \bar{R} - \Delta^3 \bar{R}) \neq 0 \quad \text{и} \quad \Delta^2 \bar{R} \times \Delta^3 \bar{R} = 0 \quad (\text{I.26a})$$

$$\Delta^1 \bar{R} \times (\Delta^2 \bar{R} - \Delta^3 \bar{R}) \neq 0 \quad \text{и} \quad \Delta^2 \bar{R} \times \Delta^3 \bar{R} \neq 0 \quad (\text{I.26б})$$

но $\Delta^1 \bar{R} \times (\Delta^2 \bar{R} - \Delta^3 \bar{R}) \neq -\Delta^2 \bar{R} \times \Delta^3 \bar{R}$

$$\Delta^1 \bar{R} \times (\Delta^2 \bar{R} - \Delta^3 \bar{R}) = 0 \quad \text{и} \quad \Delta^2 \bar{R} \times \Delta^3 \bar{R} \neq 0. \quad (\text{I.26в})$$

На рис. 1.4 показаны три случая, соответствующие (1.26а), (1.26б), (1.26в). Переменные $\Delta^1 R$, $\Delta^2 R$, $\Delta^3 R$ не должны быть все линейно зависимы, но две из них могут быть линейно зависимы друг от друга, если третья ~~нелинейно~~^{линейно} зависима с разностью первых двух (1.26а), рис. 1.4а. Это может быть достигнуто, например, использованием аттенюатора (линейно зависимый элемент) и фазосдвигающего элемента (линейно независимый).

Рассмотрим случай, когда независимость всех трех переменных достигается с помощью фазового сдвига. При управляемом сдвиге фаз используются две методики: пошаговый сдвиг и непрерывный сдвиг. Пошаговый сдвиг состоит из сдвига фазы на некоторую дискретную величину, а затем ввода установившегося значения интенсивности в компьютер перед следующей подвижкой. При непрерывном методе фаза изменяется линейно во времени. Информация считывается с помощью интегрирующего детектора, который усредняет значения интенсивности по мере изменения фазы. В каждой точке детектора усреднение интенсивности происходит за временной интервал, зависящий от числа шагов, используемых в формуле расшифровки. Рассмотрим расшифровку при пошаговом сдвиге при различном числе фиксированных сдвигов.

Картину, образуемую от интерференции исходной и опорной волны, можно записать в виде

$$I_{\ell}(x, y) = A^2(x, y) + B^2(x, y) + 2A(x, y)B(x, y)\cos(\Psi(x) - \Phi(x) - \Phi_{\ell}), \quad (1.27)$$

где комплексная амплитуда опорной волны определяется выражением (1.2); комплексная амплитуда объектной волны - выражением (1.1); Φ_{ℓ} - аддитивный контролируемый фазовый сдвиг опорной волны; $\ell = 1, 2, 3$.

Обозначив разность фаз $\Psi(x, y) - \Phi(x, y)$ через Ψ ,

Однозначность определения комплексных амплитуд

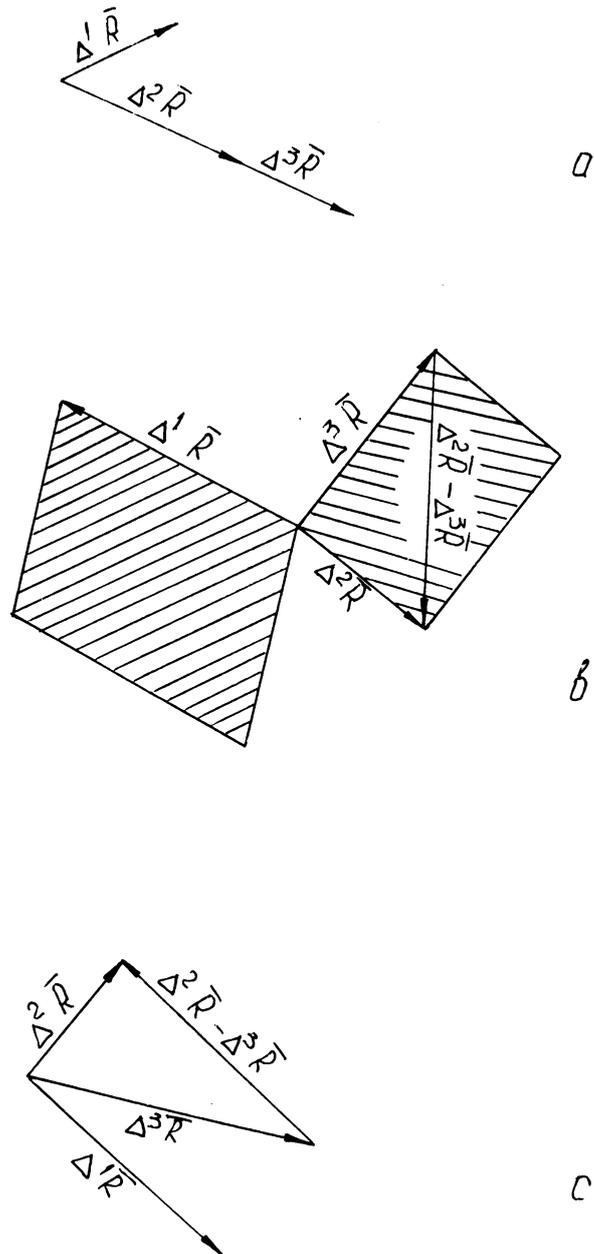


Рис. 1.4

$$a \cos(\varphi_\rho) = C_\rho, \quad \sin(\varphi_\rho) = S_\rho, \quad \text{для } \rho = 1, 2, 3$$

получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} I_3 - I_2 &= 2AB [\cos \varphi (C_3 - C_2) + \sin \varphi (S_3 - S_2)] ; \\ I_1 - I_3 &= 2AB [\cos \varphi (C_1 - C_3) + \sin \varphi (S_1 - S_3)] . \end{aligned} \quad (I.28)$$

Решая систему относительно неизвестных

$$\begin{aligned} X &= 2AB \cos \varphi, \\ Y &= 2AB \sin \varphi, \end{aligned} \quad (I.29)$$

получим:

$$X = \frac{(I_3 - I_2)(S_1 - S_3) - (I_1 - I_3)(S_3 - S_2)}{(C_3 - C_2)(S_1 - S_3) - (C_1 - C_3)(S_3 - S_2)}, \quad (I.30)$$

$$Y = \frac{(I_1 - I_3)(C_3 - C_2) - (I_3 - I_2)(C_1 - C_3)}{(C_3 - C_2)(S_1 - S_3) - (C_1 - C_3)(S_3 - S_2)} \quad (I.31)$$

откуда

$$\begin{aligned} 2AB \sin \varphi &= \\ &= \frac{(I_3 - I_2) \cos \varphi_1 + (I_1 - I_3) \cos \varphi_2 + (I_2 - I_1) \cos \varphi_3}{(\cos \varphi_3 - \cos \varphi_2)(\sin \varphi_1 - \sin \varphi_3) - (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_3)(\sin \varphi_3 - \sin \varphi_2)} ; \end{aligned} \quad (I.32)$$

$$\begin{aligned} 2AB \cos \varphi &= \\ &= \frac{(I_3 - I_2) \sin \varphi_1 + (I_1 - I_3) \sin \varphi_2 + (I_2 - I_1) \sin \varphi_3}{(\cos \varphi_3 - \cos \varphi_2)(\sin \varphi_1 - \sin \varphi_3) - (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_3)(\sin \varphi_3 - \sin \varphi_2)} ; \end{aligned} \quad (I.33)$$

$$\varphi = \arctg \frac{(I_3 - I_2) \cos \varphi_1 + (I_1 - I_3) \cos \varphi_2 + (I_2 - I_1) \cos \varphi_3}{(I_3 - I_2) \sin \varphi_1 + (I_1 - I_3) \sin \varphi_2 + (I_2 - I_1) \cos \varphi_3} . \quad (I.34)$$

При $\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = 120^\circ$, $\varphi_3 = 240^\circ$ выражение (I.34) имеет вид:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \sqrt{3} \frac{I_3 - I_2}{2I_1 - I_2 - I_3} . \quad (I.35)$$

Функция $\operatorname{tg}(\cdot)$ определена в пределах $(-\pi/2, \pi/2)$, однако, анализируя знаки числителя и знаменателя в (I.34), можно расширить область определения до $(-\pi, \pi)$. Таким образом, комплексная амплитуда поля может быть однозначно определена по трем интерферограммам в пределах одного периода изменения фазы.

При определении поля разности фаз по трем интерферограммам возникает проблема калибровки фазового сдвига. Ошибки при определении контролируемого сдвига ведут к ошибкам в определении поля разности фаз. Максимальная ошибка при определении разности фаз имеет тот же порядок, что и ошибка при задании сдвига [91]. Задача точной калибровки особенно трудна при изменении фазы в поперечном сечении опорной волны.

Если анализировать не три, а четыре интерферограммы с одинаковой разностью фазового сдвига между ними, то можно определить значение разности фаз для каждой точки поля без абсолютной калибровки сдвига. К устройству внесения сдвига вместо требования высокой точности предъявляется требование высокой линейности при задании сдвига. Для ряда устройств такое условие технически обеспечить гораздо легче. Отсутствие же предварительной калибровки значительно упрощает эксперимент.

Перепишем (I.27) в виде

$$I_\rho(x, y) = A^2(x, y) + B^2(x, y) + 2A(x, y)B(x, y) \times \\ \times [\cos \varphi(x, y) \cdot \cos \varphi_\rho + \sin \varphi(x, y) \sin \varphi_\rho] , \quad (I.36)$$

где $\varphi(x, y) = \Psi(x, y) - \Phi(x, y)$.

Пусть $\varphi_1 = -3a$, $\varphi_2 = -a$, $\varphi_3 = a$, $\varphi_4 = 3a$, тогда

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)}{(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)}} ; \quad (1.37)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \left\{ \frac{(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \right\} \operatorname{tg} \alpha ; \quad (1.38)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{[(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)][3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)]}}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} . \quad (1.39)$$

Особенно простое выражение получается при $\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = 90^\circ$, $\varphi_3 = 180^\circ$, $\varphi_4 = 270^\circ$.

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4} . \quad (1.40)$$

Трехточечный и четырехточечный алгоритмы обладают высоким быстродействием, но имеют повышенную чувствительность к шумам. Рассмотрим алгоритм для произвольного числа фазовых сдвигов, который был впервые изложен в [84].

Рассмотрим интерферометр Тваймана-Грина, в опорном плече которого расположено зеркало, закрепленное на пьезокерамике.

Пусть опорная волна и исследуемый волновой фронт имеют вид:

$$W_1 = A \exp(2ik\ell), \quad k = 2\pi/\lambda ; \quad (1.41a)$$

$$W_2 = B \exp(2ikW(x, y)), \quad (1.41b)$$

где ℓ - путь в длинах волн, пройденный опорной волной до расщепителя пучка, а $W(x, y)$ - двумерный профиль тестируемой поверхности, который необходимо определить. Интерференционная картина имеет вид:

$$I(x, y, \ell) = A^2 + B^2 + 2AB \cos 2k[W(x, y) - \ell] . \quad (1.42)$$

Как видно из этого выражения, при изменении интенсивности от мини-

муна до максимума оптическая разность хода волн меняется на $\lambda/2$. Также можно заметить, что $I(x, y)$ - синусоидальная функция по ℓ для всех (x, y) на интерферограмме. Запишем (I.42) в другом виде:

$$I(x, y, \ell) = a_0 + a_1 \cos 2k\ell + b_1 \sin 2k\ell. \quad (\text{I.43})$$

Это разложение функции в ряд Фурье с постоянным членом и первыми гармониками. Коэффициенты являются функциями, зависящими от x и y . Используем ортогональные свойства тригонометрических функций:

$$a_0 = \frac{1}{np} \sum_{i=1}^{np} I(x, y, \ell_i) = a^2 + b^2; \quad (\text{I.44})$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{2}{np} \sum_{i=1}^{np} I(x, y, \ell_i) \cos 2k\ell_i = \\ &= 2ab \cos 2k W(x, y). \end{aligned} \quad (\text{I.45})$$

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{2}{np} \sum_{i=1}^{np} I(x, y, \ell_i) \sin 2k\ell_i = \\ &= 2ab \sin 2k W(x, y). \end{aligned} \quad (\text{I.46})$$

Итак,

$$\begin{aligned} 2k W(x, y) &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{b_1}{a_1} \right) \text{mod } 2\pi, \\ \ell = \ell_i &= \frac{i\lambda}{n-2}, \quad i = 1, 2, \dots, np. \end{aligned} \quad (\text{I.47})$$

Целое ρ обозначает число периодов, на которое сдвинулась интерференционная картина, а \mathcal{N} - количество сдвигов в каждом периоде. Таким образом, для каждой точки фазы или волновой фронт могут быть определены с точностью до 2π по значениям интенсивностей интерферограмм, полученных при пошаговом изменении опорного волнового фронта.

Рассмотрим расшифровку при непрерывном сдвиге при 4-х шагах.

Пусть

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= \int_{-2\beta_0}^{+\beta} [A^2 + B^2 + 2AB \cos(\Psi(x, y) - \Phi(t))] d\Phi(t), \\
 I_2(x, y) &= \int [A^2 + B^2 + 2AB \cos(\Psi(x, y) - \Phi(t))] d\Phi(t), \\
 I_3(x, y) &= \int_{-\beta}^{+\beta} [A^2 + B^2 + 2AB \cos(\Psi(x, y) - \Phi(t))] d\Phi(t), \\
 I_4(x, y) &= \int_{+\beta}^{+\beta} [A^2 + B^2 + 2AB \cos(\Psi(x, y) - \Phi(t))] d\Phi(t).
 \end{aligned}
 \tag{I.48}$$

Тогда, введя дополнительные переменные,

$$\begin{aligned}
 U &= I_2 - I_3, & M &= T - W, \\
 V &= I_1 - I_4, & N &= 3U - V, \\
 W &= I_1 + I_4, & P &= U + V, \\
 T &= I_2 + I_3, & Q &= V - U,
 \end{aligned}
 \tag{I.49}$$

проведя интегрирование и ряд простых преобразований, получим:

$$\beta = \arccos \left(\frac{Q}{2U} \right)
 \tag{I.50}$$

или

$$\beta = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{N P}}{Q} \right), \quad (I.51)$$

$$\Psi(x, y) = \operatorname{arctg} \left[\left(\frac{Q}{M} \right) \operatorname{tg} \beta \right], \quad (I.52)$$

$$\Psi(x, y) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{N P}}{M} \right). \quad (I.53)$$

Выполнив обратные подстановки в (I.53), заметим, что окончательное выражение для нахождения разности фаз (I.53) совпадает с выражением (I.39). Подобные выкладки можно произвести для различного числа шагов.

При расшифровке с помощью непрерывного сдвига ввод на основе интегрирующих детекторов должен быть согласован с устройством фазового сдвига, что приводит к усложнению аппаратуры по сравнению с пошаговой методикой. Однако такой метод более устойчив к нежелательным внешним помехам.

I.2. Анализ способов построения измерительных интерференционных систем

Началом интенсивных работ по созданию автоматизированных систем расшифровки интерферограмм следует считать начало 70-х годов. Именно с этого времени в литературе начали систематически появляться описания различных методов и созданных на их основе систем автоматизации расшифровки. В 70-е годы применение ЭВМ позволило создать первые экспериментальные установки для автоматизированной обработки интерферограмм.

Ряд достоинств интерференционных методов, соединенных с автоматизацией обработки данных, вызвали появление большого числа разнообразных систем. В зависимости от целей применялись различные методики получения и расшифровки интерферограмм.

В основу ряда систем положен метод расшифровки, основанный на выделении центров полос.

На протяжении ряда лет в отделе голографических методов и автоматизации научных исследований (ОГМАНИ) НЭТИ проводились работы по созданию голографических измерительных систем (ГИС) [21, 22, 23, 41, 50, 51, 52, 618]. Основными элементами ГИС являются голографический интерферометр с оптическим квантовым генератором, устройство ввода оптической информации в ЭВМ, управляющий вычислительный комплекс с соответствующим программным обеспечением. При создании ГИС были решены следующие задачи:

— разработан ионный квантовый генератор для записи и восстановления голографических интерферограмм [37, 38, 56], имеющий высокую мощность (15 ватт в сумме линий), широкий набор генерируемых длин волн (при использовании в качестве рабочего газа аргона — 10 линий, при использовании криптона — 6) и длину когерентности не менее 1 м;

— разработан комплект оборудования универсальной голографической установки, который обеспечивает: возможность простой перестройки и компоновки друг с другом отдельных механических элементов; максимальную унификацию деталей и стандартизацию посадочных мест, отверстий, резьбовых соединений; наличие достаточного числа вистровок; механическую жесткость и виброзащиту; технологичность изготовления деталей и узлов [52];

— разработано электромеханическое устройство ввода оптических изображений [39] и устройство ввода, в котором для опто-электронного преобразования и сканирования применяется диссектор [36];

— усовершенствованы методы получения и расшифровки голографических интерферограмм, обеспечивающих возможность автоматизации голографического эксперимента; проведен анализ метрологических характеристик голографических измерительных систем и их элементов

[41, 40, 48, 66, 67] ;

— разработано программное обеспечение и специальное периферийное оборудование [26, 27, 28, 31, 35] .

Основным направлением при создании ГИС являлось решение задач экспериментальной механики.

С начала 80-х годов автоматизированные интерференционные системы стали доступными по своим экономическим показателям. Появились первые промышленные установки.

Наиболее известной является система для оптического контроля MARK-II, выпускаемая фирмой *Zygo* (ФРГ). Система предназначена для лабораторного и промышленного контроля параметров оптических изделий. Основой системы является интерферометр Физо. Полученные интерференционные картины обрабатываются системой *ZAPP (Zygo Automatic Pattern Processor)*, и информация о выделенных центрах полос поступает в микропроцессорную систему на основе PDP-11/103, которая вычисляет характеристики оптических поверхностей или систем. Система позволяет обрабатывать полностью автоматически интерферограммы, полосы которых мало отличаются от прямых линий. Для интерференционных картин сложной формы предусмотрена регистрация на фотоносителях и ручной ввод центров полос.

Система для интерактивного анализа интерферограмм на основе мини-ЭВМ PDP-11 описана в [133] . Для ввода изображений использовалась высокоразрешающая телевизионная камера. Интерферограммы оцифровывались на 512x512 точек с 64 уровнями яркости. Центры полос выделялись с помощью двумерного алгоритма с анализом уровня яркости. Для определения границ рабочего поля, нумерации полос, для исправления ошибочно введенных линий использовался интерактивный режим. Для определения дробных частей полос применялась аппроксимация полиномом, определяемым методом наименьших квадра-

тов.

Для измерений деформаций методом цифровой спекл-интерферометрии предназначена система [109] на основе миникомпьютера PDP-11/34 с цифровой памятью 512×512 элементов. Спекл-интерферограмма образовывалась цифровым способом из спекл-картин до деформации и после. Расшифровка спекл-интерферограммы проводилась в интерактивном режиме методом выделения центров полос. Редактирование выделенных центров полос осуществлялось оператором с использованием светового пера. С помощью оптической установки измерялись нормальные перемещения объекта. Пучок света от *He-Ne* лазера после расширения разделялся для освещения опорной и объектной поверхностей. Диффузно рассеянный свет от опорной и объектной поверхностей собирался изображающей линзой (с фокальным расстоянием 105 мм) и фокусировался на телевизионной камере. Наблюдалась центральная область объекта 20×20 мм.

Для автоматического анализа плоскости больших кремниевых подложек использовалась система [134], которая состоит из интерферометра и устройства для анализа полос. Изображение оцифровывалось и запоминалось в виде матрицы размером 512×512 элементов по 8 бит на точку за $1/30$ с. Для анализа полос использовался специализированный параллельный процессор для обработки изображений. Среднее время выполнения базисных функций составляло 0,26 с. Все процедуры обработки выполнялись с помощью аппаратных модулей. Пределы измерения системы от 0,03 до 15 мкм, максимальный диаметр измеряемой подложки 150 мм, среднее время измерения 6 с, максимальное число измеряемых точек 5120 (80×64). Пропускная способность системы 600 изделий в час.

Ряд систем используют метод расшифровки, основанный на Фурье-анализе.

В [127] описана система для расшифровки интерферограмм на

основе микрокомпьютера *LSI-11/23* и устройства ввода с фотодиодной линейкой с 1024 элементами. Расстояние между соседними элементами 15 мкм. Система позволяет полностью автоматически определять разность фаз волновых фронтов с ошибкой меньшей, чем $\lambda/30$.

Для контроля асферических поверхностей использовалась система [92]. Для введения несущей частоты применялся наклон опорного зеркала. Интерферограммы получались с помощью интерферометра Тваймана-Грина с искусственно синтезированной голограммой. Нахождение установочных ошибок и вычисление параметров асферики основано на анализе полиномов Цернике. Для измерения использовались две системы: мини-ЭВМ *PDP-11/34* с камерой *Hamamatsu C 1000*, которая обеспечивает 1024x1024 элементов разложения с 256 уровнями яркости, и микро-ЭВМ *IBM-PC* с камерой *Fairchild 1500R-CCD* с 2048 точками в строке, соединенная с ЭВМ с помощью устройства сопряжения.

Метод на основе Фурье-преобразования положен также в основу систем [99, 106], которые состоят из интерферометра Маха-Цендера, фотоэлектронной сканирующей системы и аналоговой вычислительной сети для непосредственного выделения поля фаз. Абсолютные изменения фазы определяются в реальном времени. Электронная сканирующая система на основе телевизионной камеры имеет следующие параметры: сканирующий растр — 200 линий, скорость сканирования — 5 кадров/с, максимальная частота видеосигналов — 40 кГц, что соответствует пространственной несущей частоте — 2 линии на мм интерферограммы.

Динамические методы расшифровки, кроме полной автоматизации, обеспечивают более высокую точность. Поэтому понятен интерес, проявляемый к разработкам систем, в основу которых положены подобные методики. Системы этого класса могут использоваться не только для экспериментальных исследований, но и для контроля изделий в про-

цессе изготовления.

Рассмотрим некоторые системы для получения и расшифровки интерферограмм методом управляемого фазового сдвига.

Система MARK-III фирмы Zygo предназначена для промышленного и лабораторного контроля параметров оптических изделий [121]. Система может измерять волновые фронты как с помощью алгоритмов выделения середин полос, так и с помощью методик управляемого фазового сдвига. Фазовый сдвиг вносится с помощью специального устройства, объединенного с опорной поверхностью интерферометра Физо. Для расшифровки интерферограмм используется алгоритм непрерывного сдвига фаз (1.48) — (1.53). Устройство ввода, выполненное на основе фотодиодной матрицы 100x100 элементов, синхронизировано с устройством внесения сдвига. Разрешение обрабатываемого поля устанавливается оператором и может быть 25x25, 32x32, 50x50 и 100x100 элементов. Точность меньше, чем $\lambda/50$, $\lambda = 0,6328$ мкм. Вычисление поля разности фаз занимает несколько минут. Полный оптический анализ производится в микропроцессорных системах на основе PDP-11/03, HP 9816, HP 9836 (в зависимости от комплектации).

В [135] описана система для исследования асферических поверхностей с использованием метода внесения управляемого фазового сдвига. Система состоит из интерферометра бокового сдвига и микропроцессорной обрабатывающей системы на базе микрокомпьютера. Фазовый сдвиг вносился с помощью зеркала, закрепленного на пьезокерамике, управляющее напряжение на которую подавалось с помощью 12-битного цифро-аналогового преобразователя. Интерференционная картина регистрировалась с помощью диодной матрицы размером 32x32 элемента. Вычисление поля разностей фаз производилось с помощью алгоритма (1.47). По полю разностей фаз восстанавливалось поле производных волнового фронта. Интегрирование по X и Y-направлениям определялась форма волнового фронта. С помощью системы про-

водились измерения профиля параболического зеркала с фокальным расстоянием 400 мм и диаметром 100 мм.

Ошибка при повторении эксперимента на том же объекте в различное время не превышала $1/32$ длины волны.

Для измерений нормальных смещений объекта использовалась система [96], в которой интерферограммы, полученные методом голографической интерферометрии реального времени, расшифровывались по алгоритму (1.35). Для управляемого сдвига фаз использовался электро-оптический модулятор с поляризационной оптикой. Голограмма объекта записывалась с помощью регистрирующей системы (*Reticon* HC 300) с использованием термoplastика. Для сбора и обработки данных применялась система с дополнительной памятью и устройства ввода на основе ИЭС камеры. За время одного сканирования, которое занимало около 20 мс, массив значений интенсивностей 100×100 точек запоминался в ОЗУ. Возможно фиксирование 10 измерений поля разности фаз одновременно. Анализ результатов показал, что ошибка не превышает 5 %.

Для измерения трех компонент вектора смещений использовалась система [97], которая является развитием [96]. Оптическая система позволяет получить 4 голограммы от объекта, последовательно освещаемого с 4-х различных направлений. Определение поля разностей фаз в 100×100 точках занимает 10 сек. Эти данные затем могут быть переданы в более мощную ЭВМ для вычисления напряжений и изгибающих моментов. В отличие от [96], для внесения фазового сдвига использовалось зеркало, закрепленное на пьезокерамике. Пьезодвигатель был точно откалиброван при помощи серии измерений и гетеродинной интерферометрии. Измерения проводились над тестовым объектом, который представлял вертикальный кронштейн длиной 100 мм и шириной 50 мм с закрепленным верхним концом и свободным нижним.

Для измерений деформаций объектов использовалась также система [88]. При известном векторе чувствительности величина деформации может быть рассчитана по измеряемому полю разностей фаз. Для расшифровки интерферограмм, полученных методом голографической интерферометрии реального времени (для получения интерферограмм использовалась камера (Newport HC-310), использовался алгоритм непрерывного сдвига фаз (1.48) — (1.53). Система сбора и обработки данных состоит из микро-ЭВМ HP 9836 C, устройства ввода на основе фотодиодной матрицы 100x100 элементов (Reticon MC 521C) для двумерной обработки и линейки фотодиодов для обработки по строкам (Reticon RC 1728H). Устройство сдвига было синхронизировано с оптическим вводом. Исследовались изгиб балки (73x10 мм) при различных силовых нагрузках и температурное расширение участка сотовой конструкции, припаянной к алюминиевой пластине.

Для автоматизации расшифровки голографических интерферограмм, полученных методом двух экспозиций, применяется система [125], в которой используются две волны, поляризованные в различных плоскостях. Чтобы добиться максимальной фазовой стабильности, траектория опорных волн должна быть одинаковой. Возникает проблема независимости доступа к каждой голограмме при измерении фазы восстановленного изображения. Это достигается использованием генератора опорных волн и устройства фазового сдвига. Генератор состоит из трех элементов: призмы Волластона, микрообъектива и матового стеклянного экрана. Управляя состоянием поляризации падающей волны, могут быть получены одна или обе опорные волны. Оптомеханический фазовый модулятор состоит из полуволновой пластины, монтируемой на пустотелом валу шагового двигателя, следующей за стационарно укрепленной четвертьволновой пластиной. Для шагового двигателя с 2000 ш/об относительная фаза может быть установлена с погрешностью $2\pi/500$. Расшифровка проводилась по алгоритму (1.47). Интер-

ферограмма фиксируется матричной камерой 32×32 элемента. Для вычисления фазы требуется менее 10 с. Система использовалась для тестирования оптики и неразрушающего контроля. Оцениваемая точность системы $-0,01$ длины волны.

Метод расшифровки с управляемым фазовым сдвигом может быть успешно применен для двухэкспозиционной голографической интерферометрии при использовании двухопорной голографической записи [90]. В системе [91] использовался алгоритм (1.34). Фазовый сдвиг вносился с помощью зеркала, закрепленного на пьезокерамике. Проводились измерения пластины (200×40 мм) под изгибающей нагрузкой. Из измерений фазы ненагруженного объекта была определена случайная ошибка. Экспериментальные результаты показали, что точность лучше $0,01$ полосы.

Для измерения нормальных, тангенциальных и трехмерных деформаций методом цифровой спекл-интерферометрии использовалась система [110]. С помощью микрокомпьютерной системы, аналогичной [109], регистрировалась спекл-картина до деформации и четыре после, со сдвигом фазы опорного пучка $0, \lambda/8, \lambda/4, 3\lambda/8$. Сдвиг вносился с помощью пьезокерамики. Для цифровой обработки использовался мощный компьютер FACOM M380. Четыре спекл-интерферограммы вычислялись цифровым способом, вычитанием спекл-картин до и после деформации. Оптическая разность фаз объекта до и после деформации вычислялась с помощью четырехточечного алгоритма (1.40). Полная фаза определялась методом развертки фаз, определенных с точностью до периода. В зависимости от оптической схемы по измеренным разностям фаз определялись внеплоскостные, плоскостные и трехмерные деформации.

Система для измерения деформаций методом цифровой спекл-интерферометрии с использованием управляемого фазового сдвига описана также в [87]. Обработка часть системы состоит из ЭВМ

НР-9836С с устройством ввода на основе диодной матрицы 100×100 элементов. В отличие от предыдущей, используется схема интерферометра, в котором опорный пучок формируется с помощью волоконной оптики.

Алгоритмы расшифровки аналогичны [110].

Наиболее высокими точностными характеристиками обладают системы, основанные на гетеродинной технологии.

Одна из первых систем, в которой для определения фазы волнового фронта в одно из плеч интерферометра было предложено вносить устройство сдвига фаз, описана в [86]. В качестве фазового модулятора использовались две четвертьволновые пластинки, одна из которых жестко закреплена, а другая вращается с постоянной скоростью. На выходе модулятора фаза меняется с частотой, зависящей от скорости вращения одной из четвертьволновых пластинок. Вращающаяся пластинка и электропривод размещены в экранированном ящике для уменьшения воздушной турбулентности, обусловленной движущимися частями. Для сканирования интерференционной картины использовался диссектор. Разность фаз информационного сигнала и сигнала от контрольной точки определялась в электронном фазовом детекторе. Для контроля точности установки большого многосекционного зеркала использовался интерферометр Тваймана-Грина, в опорном плече которого помещался фазовый модулятор. Точность системы определялась аберрациями в оптических узлах, термической деформацией компонент интерферометра, турбулентностью воздуха, фотонным шумом диссектора и составляла примерно $0,01$ длины волны. Время определения поля разности фаз в 1000 точках около 20 мин.

В [124] описана система для определения фазовых характеристик волновых фронтов с повышенным быстродействием. С помощью поляризационной оптики формируются четыре канала, на выходе которых фиксируются четыре отдельных модулированных волны, с относительным сдвигом фаз $\pi/4$. На выходе каналов расположены видеокамеры. Все

видеокамеры во время сканирования синхронизированы. Сигналы от соединенных пар видеокамер вычитаются друг из друга для получения синусоидальных сигналов без постоянной составляющей. Эти сигналы затем обрабатываются в двух отдельных видеоцифровых устройствах емкостью 64×64 элемента. Оцифрованная информация считывается в микропроцессор 68000, который по двум сигналам, сдвинутым на $\pi/2$, вычисляет фазу. Микропроцессор работает с тактовой частотой 16 МГц, что позволяет анализировать волновой фронт с частотой 10 МГц. Выделенные поля фаз представлялись в виде трехмерных графиков и линий равных уровней. Отношение сигнал-шум увеличивалось путем многократного сканирования изображения. Разрешающая способность системы $\lambda/200$. Максимальный наклон измеряемого поля фаз - 16λ . В связи с малым временем обработки система позволяет проводить измерения деформируемой оптики в реальном времени.

1.3. Обоснование и конкретизация задач диссертационной работы

Подведем итоги краткого обзора существующих методов определения полей разности фаз и автоматизированных измерительных систем, построенных на их основе.

1. Существует большой набор методов для определения полей разности фаз оптических волновых фронтов. Наиболее универсальны методы, основанные на интерференционных принципах.

2. Развитие автоматизированных измерительных систем для расшифровки интерференционных картин привело к появлению новых методов.

3. Оптические установки по своей структуре не претерпели существенных изменений. Основной частью современных интерференционных измерительных систем становится электроника, алгоритмическое и программное обеспечение.

4. Наиболее перспективными представляются методы, основанные на внесении управляющих воздействий в схему интерферометра.

5. Удаление фазовой неоднозначности основано на алгоритмах развертки фаз, в которых используется информация о пространственной структуре.

6. В литературе отсутствуют исследования метрологических характеристик для большинства описанных систем.

7. В отечественной литературе имеется чрезвычайно мало сведений о системах автоматизации интерференционного эксперимента с использованием методов, основанных на внесении управляющих воздействий в оптическую схему интерферометра.

Дальнейшая работа в направлении совершенствования измерительных систем для определения полей разности фаз интерферирующих волновых фронтов с целью расширения динамического диапазона, сокращения времени измерений, снижения сложности и уменьшения габаритов является весьма перспективной.

Решение этих задач позволит создавать относительно простые, точные, надежные и удобные в эксплуатации системы для изучения широкого класса физических явлений, связанных с фазой оптических волновых фронтов.

Достижение этой цели связано с решением ряда вопросов, в число которых входят следующие:

1. Для расширения динамического диапазона, улучшения метрологических характеристик и реализации полностью автоматического режима работы необходимо разработать способ удаления фазовой неоднозначности, независимый от пространственной структуры поля фаз, определенных с точностью до периода.

2. В целях исследования метрологических характеристик измерительных систем, основанных на методах управляемого фазового сдвига и путей их улучшения, необходимо выявить основные источни —

ки погрешности при определении поля разности фаз и разработать методы уменьшения их влияния.

3. Для практической реализации измерительной системы для определения полей фазовых разностей необходимо разработать общую структуру системы и набор аппаратных средств, реализующих отдельные функции.

4. Для реализации используемых алгоритмов необходимо разработать программное обеспечение системы.

5. Для исследования области применимости системы необходимо исследовать ее эффективность путем решения конкретных экспериментальных задач.

2. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО СПОСОБА УДАЛЕНИЯ ФАЗОВОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ

В интерференционной картине содержится информация о разности фаз интерферирующих световых волн с точностью до периода ее изменения. В этом смысле можно говорить о фазовой неоднозначности интерферограммы и об алгоритмах удаления такой неоднозначности.

2.1. Анализ существующих алгоритмов удаления фазовой неоднозначности

Стандартным методом удаления фазовой неоднозначности является нумерация полос, производимая оператором, который должен обладать необходимой для этого априорной информацией. Такой способ является единственно возможным, если отсутствует информация о поведении поля разности фаз между серединами полос. Возможности автоматизации этого метода весьма ограничены. При монотонном характере изменения поля разности фаз задается номер отсчетной полосы и направление изменения. В этом случае номера других полос определяются автоматически. Однако при произвольном характере изменения необходим интерактивный режим работы. Достигается это разработкой различных графических редакторов [20] .

Если разность фаз определена в каждой точке поля, то возможно восстановление полной фазы автоматически при выполнении следующих условий [34, 88, 106, 131] :

- поле разностей фаз изменяется плавно;
- поле между соседними отсчетами не может изменяться более, чем на 2π .

Для определения полной фазы к значению фазы, определенной с точностью до периода, добавляется величина, пропорциональная числу переходов через 2π относительно какой-либо выбранной точки.

Такая процедура часто называется разворачиванием фазы.

Наиболее часто используется следующий алгоритм. Пусть $\Phi(x, y)$ - фаза, определенная с точностью до 2π . Полная фаза

$$\Phi'(x, y) = \Phi(x, y) + 2\pi n, \quad (2.1)$$

где n - число переходов через 2π ; оно может быть положительным или отрицательным. Произведем разворачивание фазы по строкам, пользуясь следующей рекуррентной формулой:

$$\Phi'(x_j, y) = \Phi(x_{j-1}, y) + 2\pi n_j, \quad (2.2)$$

где n_j определяется для каждой точки следующим образом:

$$n_j = n_{j-1} + 2\pi k, \quad (2.3)$$

$$k = \begin{cases} 0, & \text{если } |\Phi(x_{j-1}, y) - \Phi(x_j, y)| < 2\pi - \varepsilon; \\ 1, & \text{если } |\Phi(x_{j-1}, y) - \Phi(x_j, y)| > 2\pi - \varepsilon \\ & \text{и } (\Phi(x_{j-1}, y) - \Phi(x_j, y)) > 0; \\ -1, & \text{если } |\Phi(x_{j-1}, y) - \Phi(x_j, y)| > 2\pi - \varepsilon \\ & \text{и } (\Phi(x_{j-1}, y) - \Phi(x_j, y)) < 0. \end{cases} \quad (2.4)$$

ε выбирается, исходя из величины погрешности в определении $\Phi(x, y)$.

Затем производим разворачивание по столбцам.

$$\Phi'(x, y_i) = \Phi(x, y_{i-1}) + 2\pi n_i, \quad (2.5)$$

$$\text{где } n_i = n_{i-1} + 2\pi k, \quad (2.6)$$

$$k = \begin{cases} 0, & \text{если } |\Phi(x_c, y_{i-1}) - \Phi(x_c, y_i)| < 2\pi - \varepsilon; \\ 1, & \text{если } |\Phi(x_c, y_{i-1}) - \Phi(x_c, y_i)| > 2\pi - \varepsilon \\ & \text{и } (\Phi(x_c, y_{i-1}) - \Phi(x_c, y_i)) > 0; \\ -1, & \text{если } |\Phi(x_c, y_{i-1}) - \Phi(x_c, y_i)| > 2\pi - \varepsilon \\ & \text{и } (\Phi(x_c, y_{i-1}) - \Phi(x_c, y_i)) < 0, \end{cases} \quad (2.7)$$

где X_c — значение X — координаты центра интерферограммы.

Алгоритм прост, но обладает рядом существенных недостатков, основными из которых являются следующие:

— неустойчивость к случайным ошибкам. Если при развертывании по строке X_c допущена ошибка, то она приведет к искажениям целого ряда столбцов при развертывании по столбцам;

— если градиент перехода через 2π невелик, то велика вероятность неправильного определения координаты перехода.

Причиной таких ошибок является одномерный характер алгоритма, который не учитывает двумерную структуру поля.

Предложена модификация алгоритма [30, 34], ориентированная на двумерный характер обработки. Алгоритм разбивается на ряд этапов:

— поиск непрерывных зон, в которых фаза плавно меняется в пределах 2π ;

— определение знака перехода по поведению фазы внутри зоны;

— вычисление полной фазы.

Первый этап сводится к выделению линий, вдоль которых происходит перепад от 0 до 2π , и в определении зон, ограниченных этими линиями, в которых число переходов через 2π одинаково. Затем определяют знак перехода K и вычисляют количество переходов через 2π для каждой точки зоны:

$$n_i = n_{i-1} + 2\pi K. \quad (2.8)$$

Алгоритм более устойчив к ошибкам, но он сложнее предыдущего, работает значительно дольше и требует выполнения тех же ограничений: соседние зоны не должны отличаться более, чем на 2π ; в пределах зоны разность фаз должна изменяться плавно.

Алгоритмы развертывания фазы основаны на анализе пространственной структуры интерферограмм. Решение о существовании фазово —

го перехода в точке принимается в зависимости от анализа ее окрестности. Величина приращения фазы зависит от уже определенного значения полной фазы в предыдущих точках. Таким образом, возможно накопление ошибок. От этого явления свободны локальные алгоритмы удаления фазовой неоднозначности.

При определении полной разности хода световых волн в интерферометрах применяется способ совпадения дробных частей интерференционных полос при разных длинах волн [44, 54]. Для каждой длины волны λ_i по заданной с точностью до нескольких длин волн δl разности хода световых волн $l_{\text{эм}}$ определяются целое число N_i и дробное число ε_i длин волн, укладывающихся в отрезке $l_{\text{эм}}$. При измерении истинной разности хода световых волн $l_{\text{ист}}$ определяют дробные части интерференционных полос θ_i , соответствующих дробному числу длин волн, укладывающихся в отрезке $l_{\text{ист}}$. Значения $l_{\text{ист}}$ и $l_{\text{эм}}$ отличаются на

$$\left(\frac{\varepsilon_i - \theta_i}{2} \right) \lambda_i + n_j \frac{\lambda_i}{2}, \quad (2.9)$$

где n_j выбирается так, чтобы $l_{\text{ист}}$ отличалось от $l_{\text{эм}}$ не больше, чем на δl . Перебирая все n_j , находим N_j , при которых дробные части длин волн, укладывающихся в $l_{\text{ист}}$, совпадают с измеряемыми для нескольких длин волн, а затем по формуле

$$l_{\text{ист}} = (N_j + N_i + \theta_i) \frac{\lambda_i}{2} \quad (2.10)$$

находим полную разность хода световых волн в интерферометре. Однако способ требует априорного знания $l_{\text{эм}}$, имеет небольшой динамический диапазон ($\delta l \approx 1$ мкм), требует громоздких предварительных вычислений. Значения полной разности фаз определяются в одной точке. Кроме того, длины волн выбираются близкими (для

увеличения δl), что приводит к тому, что дробные части θ_i и ε_i мало отличаются друг от друга. Поэтому приходится для увеличения достоверности полученных результатов производить измерения при нескольких длинах волн. Существует модификация способа [6], при котором длина волны непрерывно перестраивается в диапазоне реперных длин волн. Одновременно определяют изменение порядка интерференции в диапазоне перестройки длин волн и находят целые части порядков интерференции. Добавляя дробные части, полученные для реперных длин волн, определяют полную разность хода волн. По сравнению с предыдущей методикой не требуется априорного знания $l_{\text{эт}}$, уменьшена трудоемкость вычислений. Однако указанный способ имеет также небольшой динамический диапазон, значение полной разности фаз определяется в единственной точке, требуется источник с непрерывной перестройкой длины волны. Метод сложно автоматизировать.

Приведенные методы развертывания фазы имеют небольшой динамический диапазон, накладывают ряд существенных требований на класс измеряемого поля фаз, трудны для полной автоматизации.

При внесении обратной связи в интерферометр появилась возможность разработать и реализовать алгоритмы, ориентированные на полностью автоматическое получение полной фазы по полю разностей фаз, определенных в каждой точке поля с точностью до периода [45]. При разработке алгоритмов использовался математический аппарат теории чисел.

2.2. Использование свойств целых чисел для устранения фазовой неоднозначности

Перейдем от анализа вещественных к анализу целых чисел. Для этого каждому вещественному поставим в соответствие целое число с количеством значащих цифр, определяемым точностью, с которой задано вещественное число.

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

$$a \equiv b \pmod{m}. \quad (2.11)$$

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 с одним неизвестным, но с разными и притом попарно простыми модулями:

$$\begin{aligned} x &\equiv b_1 \pmod{m_1}, \\ x &\equiv b_2 \pmod{m_2}, \\ &\vdots \\ x &\equiv b_k \pmod{m_k}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Решить систему (2.12), т.е. найти все значения, ей удовлетворяющие, можно, применяя следующую теорему (Гл. 4 [15]).

Теорема I.

Пусть числа M_s и M'_s определены из условий

$m_1 m_2 \dots m_k = M_s m_s$, $M_s M'_s \equiv 1 \pmod{m_s}$, и пусть $x_0 = M_1 M'_1 b_1 + M_2 M'_2 b_2 + \dots + M_k M'_k b_k$. Тогда совокупность значений x , удовлетворяющая системе сравнений (2.12), определяется сравнением $x \equiv x_0 \pmod{m_1 m_2 \dots m_k}$.

Диапазон, при котором решение единственно, определяется произведением $m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_k$. Это следует из следующей теоремы (Гл. 4 [15]).

Теорема 2.

Если b_1, b_2, \dots, b_k независимо друг от друга пробегает полные системы вычетов по модулям m_1, m_2, \dots, m_k , то x_0 пробегает полную систему вычетов по модулю $m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_k$.

Рассмотрим систему

$$\begin{aligned} x &\equiv b_1 \pmod{4}, \\ x &\equiv b_2 \pmod{5}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Решение этой системы, как следует из Т.1, запишется в виде:

$$x \equiv 5b_1 + 16b_2 \pmod{20}. \quad (2.14)$$

Сочетание (b_1, b_2) не повторяется, пока x пробегает полную систему вычетов по модулю 20 (рис. 2.1).

2.3. Локальный способ устранения фазовой неоднозначности при изменении цены интерференционной полосы

Как видно из предыдущего раздела, для однозначного определения полной фазы необходимо провести серию измерений, таких, чтобы при переходе к целым числам, поставленным в соответствие вещественным, можно было перейти к решению системы сравнений типа (2.12).

Пусть нам известна разность фаз, определенная с точностью до периода, тогда фаза Φ определяется, как

$$\Phi = \varphi + n \cdot 2\pi, \quad (2.15)$$

где φ - разность фаз, определенная с точностью до периода; n - неизвестное целое число периодов, укладывающихся в полной разности фаз Φ .

Решение системы сравнений

$$x \equiv b_1 \pmod{4}$$

$$x \equiv b_2 \pmod{5}$$

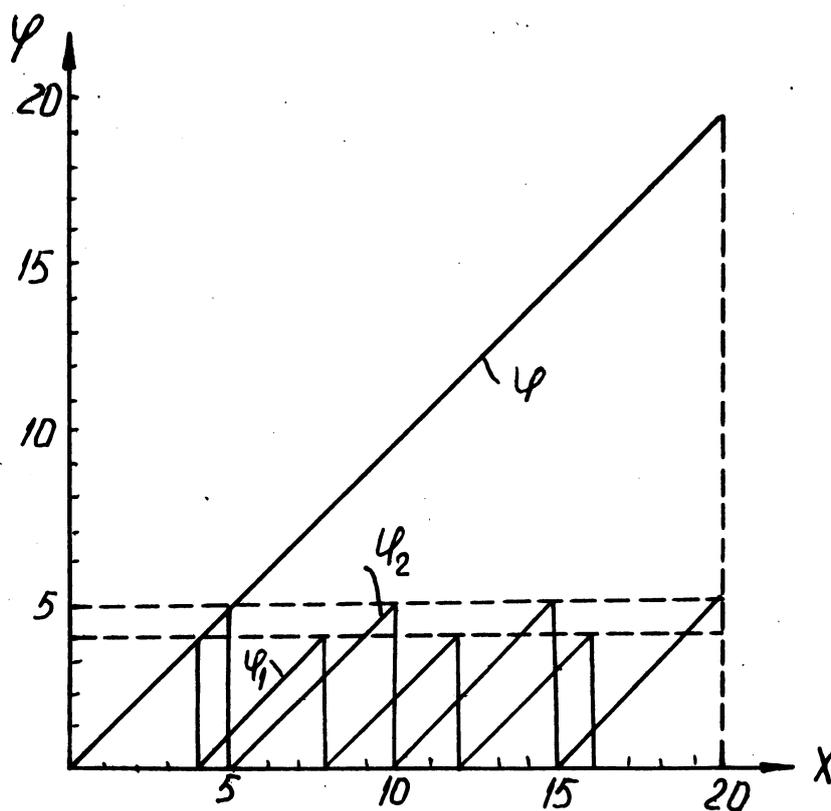


Рис. 2.1

Разность фаз описывается выражением

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta R, \quad (2.16)$$

где ΔR - разность хода между интерферирующими волнами; λ - длина волны. Соответственно, разность фаз, определенная с точностью до периода изменения,

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r, \quad (2.17)$$

где Δr - остаток от деления ΔR на λ . С учетом (2.16), (2.17) выражение (2.15) можно записать в виде:

$$\Delta R = \Delta r + n\lambda \quad (2.18)$$

С помощью интерференционных методов находится разность фаз, определенных с точностью до периода ее изменения. Затем с помощью соотношения (2.17) находится Δr - остаток от деления разности хода интерферирующих волн на длину волны. В соответствие остатку Δr ставится целое число

$$\Delta r_{int} = INT(\Delta r \cdot 10^n), \quad (2.19)$$

где n - количество значащих цифр, определяемое точностью, с которой определено вещественное число Δr . Если в соответствие вещественной длине волны λ поставлено целое число с тем же количеством значащих знаков

$$\lambda_{int} = INT(\lambda \cdot 10^n), \quad (2.20)$$

то выражение (2.18) можно переписать в виде:

$$\Delta R_{int} \equiv \Delta r_{int} \pmod{\lambda_{int}}. \quad (2.21)$$

Если провести несколько серий измерений разности фаз при разных длинах волн, выбранных так, чтобы поставленные им в соответствие целые числа были взаимно простыми, то для нахождения полной

разности хода волн необходимо найти решение системы сравнений типа (2.12). Полная разность хода волн равна:

$$\Delta R = \Delta R_{int} / 10^n. \quad (2.22)$$

Профиль изучаемой поверхности пропорционален разности хода интерферирующих волн и может быть определен, как [132] :

$$H = \frac{\Phi \cdot \lambda}{2\pi (\cos \theta + \cos \theta')} , \quad (2.23)$$

где θ и θ' - соответственно углы освещения и наблюдения с нормалью поверхности. Для интерферометров Тваймана-Грина это соотношение принимает вид:

$$H = \frac{\Phi \cdot \lambda}{4\pi} . \quad (2.24)$$

Учитывая (2.23), выражение (2.15) записывается в виде:

$$H = h + \frac{n\lambda}{(\cos \theta + \cos \theta')} , \quad (2.25)$$

где h - остаток от деления H на λ .

Таким образом, можно сформулировать второй способ удаления фазовой неоднозначности.

С помощью интерференционных методов определяют разность фаз, определенных с точностью до периода ее изменения, затем с помощью выражения

$$h = \frac{\varphi \cdot \lambda}{(\cos \theta + \cos \theta')} . \quad (2.26)$$

находят остаток от деления величины рельефа поверхности на длину волны. В соответствие остатку h ставится целое число

$$h_{int} = INT (h \cdot 10^n) , \quad (2.27)$$

где Π - количество значащих цифр, определяемое точностью, с которой найдено вещественное число h . Если в соответствие вещественному числу $\frac{\lambda}{(\cos \theta + \cos \theta')}$ поставлено целое число с тем же количеством знаков

$$\lambda_{int} = \text{INT} \left(\frac{\lambda \cdot 10^n}{\cos \theta + \cos \theta'} \right), \quad (2.28)$$

то выражение (2.26) можно переписать в виде:

$$H_{int} \equiv h_{int} \pmod{\lambda'_{int}}. \quad (2.29)$$

Если провести несколько серий измерений разности фаз при изменении углов освещения или наблюдения (метод смещенного источника), причем углы должны изменяться так, чтобы поставленные в соответствие целые числа были взаимно простыми, то для нахождения полного рельефа необходимо найти решение системы сравнений типа (2.12).

Если исследуемый объект помещают в кювету с плоским окном, заполненную прозрачной жидкостью или газом с показателем преломления N , то профиль поверхности изучаемого объекта может быть определен:

$$H = \frac{\varphi \lambda}{2\pi (N \cos \varphi' - \cos \varphi)}, \quad (2.30)$$

где φ - угол падения; φ' - угол преломления; N - показатель преломления жидкости или газа, заполняющего кювету. С учетом (2.30) выражение (2.15) запишется в виде:

$$H = h + \frac{n\lambda}{N \cdot \cos \theta' - \cos \theta}. \quad (2.31)$$

Таким образом, при изменении показателя преломления фазовая неоднозначность удаляется подбором таких коэффициентов преломле-

ния, чтобы целые числа, поставленные в соответствие величине $\frac{\lambda}{N \cdot \cos \theta' - \cos \theta}$, были взаимно простыми.

Если ввести обобщенное понятие цены полосы интерферометра для метода при изменении длины волны, равную просто λ , для метода смещенных источников $\lambda' = \frac{\lambda}{\cos \theta + \cos \theta'}$, и для иммерсионного метода $\lambda' = \frac{\lambda}{N \cdot \cos \varphi' - \cos \varphi}$, то можно заметить, что основой трех вышеописанных алгоритмов удаления фазовой неоднозначности является проведение серии измерений при таком изменении цены полосы интерферометра, чтобы целые числа, поставленные им в соответствие, были взаимно простыми.

Таким образом, можно сформулировать обобщенный алгоритм удаления фазовой неоднозначности.

При изменении длины волны в методе нескольких длин волн, при изменении геометрии интерферометра в методе смещенного источника или изменении коэффициента показателя преломления в иммерсионном методе меняется цена полосы интерферограммы. Если цены полос изменяются так, чтобы при переходе к целым числам, поставленным им в соответствие, числа были взаимно просты, то фазовая неоднозначность может быть удалена решением системы сравнений типа (2.12).

2.4. Оценка точности определения полной фазы

Рассмотрим табл. 2.1 решений системы (2.13), которые определяются сравнением (2.14) (см. на след. стр.).

Из таблицы видно, что при ошибке на единицу младшего разряда при определении b_1, b_2 ошибка в определении результата может быть весьма значительной. Оценим величину этой ошибки.

Таблица 2.1

Решение системы двух уравнений с $m_1 = 4, m_2 = 5$

$b_1 \backslash b_2$	0	1	2	3	4
0	0	16	12	8	4
1	5	1	17	13	9
2	10	6	2	18	14
3	15	11	7	3	19

Теорема 3.

При равенстве остатков решением системы сравнений (2.12) является класс чисел по модулю $m_1 \dots m_k$ с вычетом, равным остатку.

Возьмем систему сравнений:

$$\begin{aligned}
 x &\equiv b \pmod{m_1} \\
 x &\equiv b \pmod{m_2} \\
 &\vdots \\
 x &\equiv b \pmod{m_k}.
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

Ее решение:

$$\begin{aligned}
 x &\equiv M_1 M_1' b + \dots + M_k M_k' b \pmod{m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_k} = \\
 &= (M_1 M_1' + \dots + M_k M_k') b \pmod{m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_k}.
 \end{aligned}
 \tag{2.33}$$

Заметим, что

$$M_1 M_1' + \dots + M_k M_k' \equiv 1 \pmod{m_1 \cdot \dots \cdot m_k}.
 \tag{2.34}$$

Таким образом,

$$x \equiv b \pmod{m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_k}.
 \tag{2.35}$$

Из теоремы следует: по главной диагонали массива решений расположены числа от 0 до $\min(m_1, m_2, \dots, m_k)$. Соседние числа, расположенные по диагонали, отличаются на единицу. При оди-
 ночной ошибке (ошибке при определении единственной координаты b_s)
 числа по S -ой координате отличаются на $M_s M'_s \pmod{m_1 \dots m_k}$.
 Соответственно при ошибках в определении нескольких $b_s \dots b_r$ чи-
 сла отличаются на $M_s M'_s k_s + \dots + M_r M'_r k_r \pmod{m_1 \dots m_k}$,
 где k_s, k_r — величина ошибки по S -ой, r -ой координатам соответ-
 ственно. Если ошибка по всем координатам одинакова и равна k ,
 значения чисел отличаются на k . Таким образом, в массиве резуль-
 татов числа изменяются от 0 до $\min(m_1, \dots, m_k)$ по главной
 диагонали, затем последовательно возрастают по направлениям, па-
 раллельным главной диагонали.

Для примера рассмотрим двумерный случай $m_1 = 53, m_2 = 63$.
 Решения системы приведены в табл. 2.2. В таблице выделены направ-
 ления последовательного возрастания; видно, что если ограничить
 диапазон изменения результата, то вокруг значений, попадающих в
 заданный интервал изменения, образуется окрестность, в которой рас-
 положены числа, не попадающие в заданный диапазон. Назовем эту ок-
 рестность окрестностью грубых промахов. Рассмотрим рис. 2.2. Вид-
 но, что при заданном диапазоне изменения окрестность определяется
 величинами $\Delta x_i, \Delta y_i$, для нахождения которых достаточно вычис-
 лить их значения в первой строке и в первом столбце. Таким обра-
 зом, вычислив $\Delta x_i, \Delta y_i$ и учитывая дополнительно граничный эф-
 фект, можно полностью определить окрестность грубых сбоев. Найдем
 эти значения. Пользуясь Теоремой I, решение системы запишем в ви-
 де:

$$x = M_1 M'_1 b_1 + M_2 M'_2 b_2 \pmod{m_1 \cdot m_2}. \quad (2.36)$$

Решим теперь обратную задачу: по заданному x найдем коор-
 динаты в массиве решений, удовлетворяющих этому значению. Нас ин-

ОКРЕСТНОСТЬ ГРУБЫХ ПРОМАХОВ В ТАБЛИЦЕ
РЕШЕНИЙ

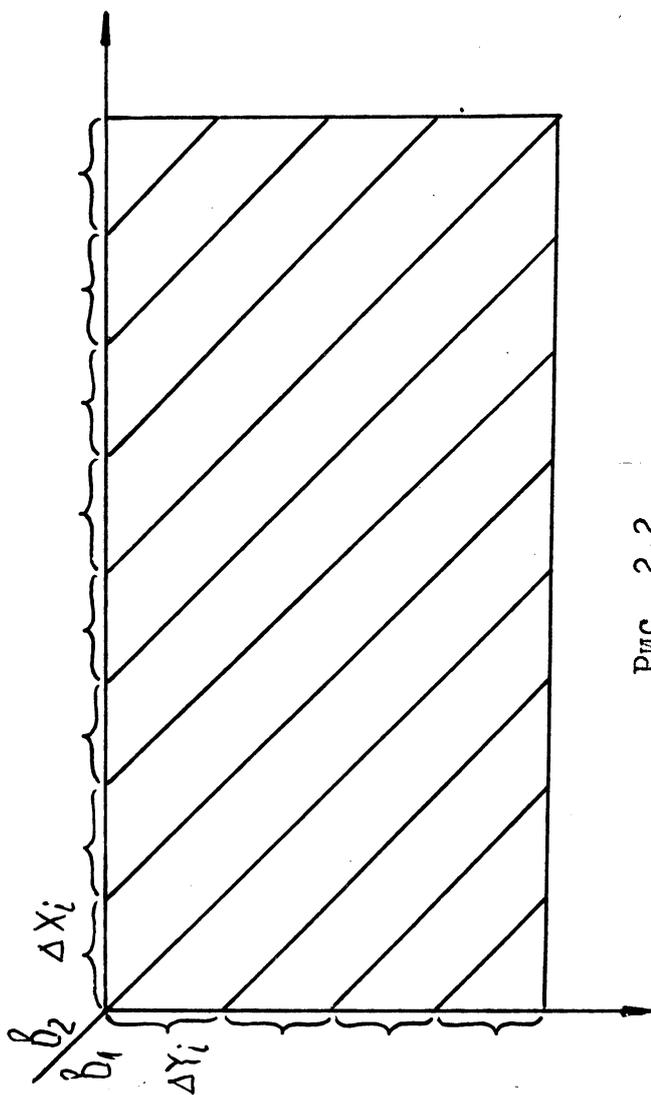
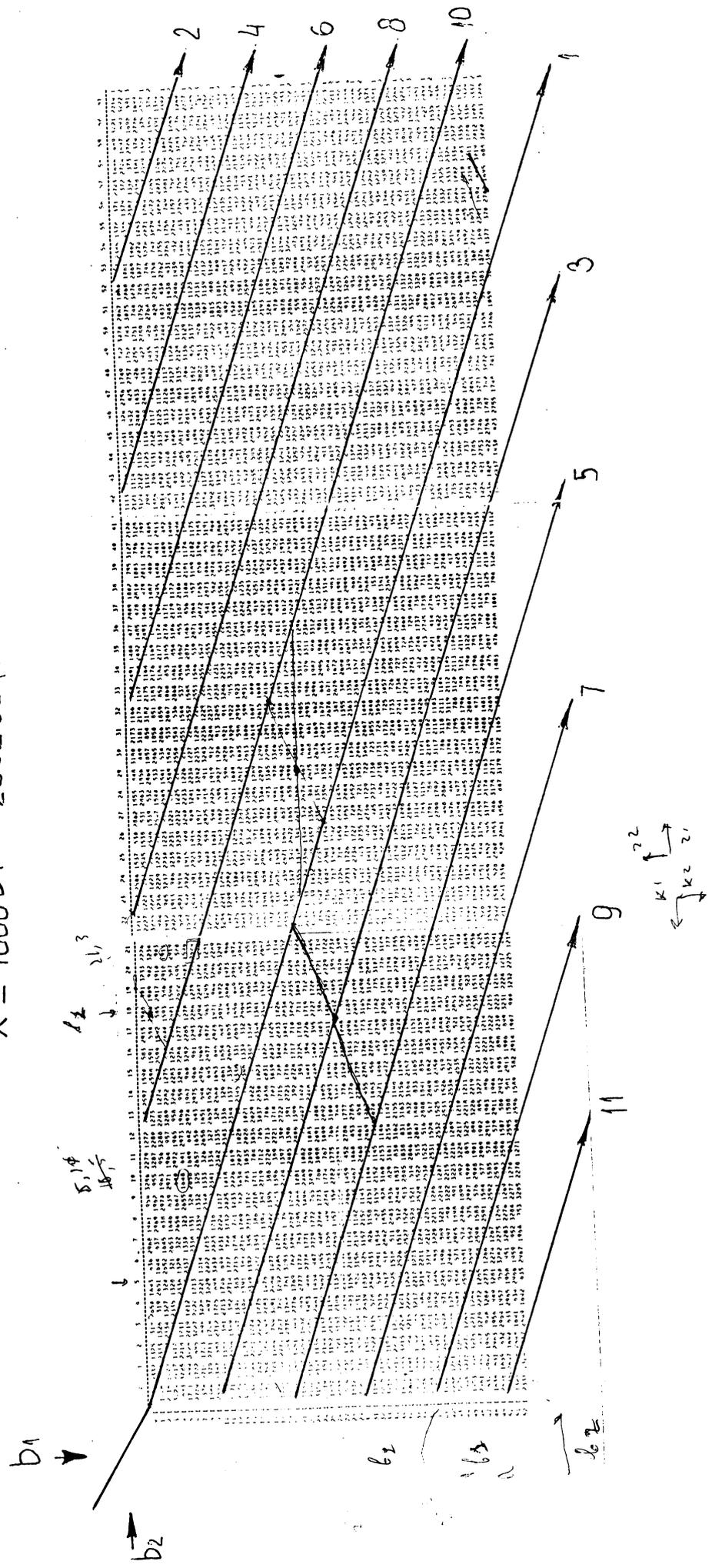


Рис. 2.2

Таблица 2.2

Таблица решений системы уравнений с $M_1 = 53, M_2 = 63$.
 $X \equiv 1008b_1 + 2332b_2 \pmod{3339}$.



тересуют координаты в первой строке и в первом столбце. Найдем их, решая следующие сравнения первой степени:

$$M_1 M_1' b_1^i \equiv x_i \pmod{m_1 m_2}, \quad (2.37)$$

$$M_2 M_2' b_2^j \equiv x_j \pmod{m_1 m_2}, \quad (2.38)$$

Общий вид сравнений первой степени:

$$ax \equiv b \pmod{m}. \quad (2.39)$$

Вопрос о существовании и количестве решений определяется следующей теоремой (Гл. 4 [15]):

Теорема 4.

Пусть $(a, m) = d$. Сравнение $ax \equiv b \pmod{m}$ невозможно, если b не делится на d . При b , кратном d , сравнение имеет d решений.

Запись $(** , **)$ здесь означает общий наибольший делитель.

Рассмотрим сравнение (2.37). По Т.1

$$M_s M_s' = \frac{m_1 \dots m_k}{m_s} M_s' \quad (2.40)$$

Следовательно,

$$(M_s M_s', m_1 \dots m_k) = (M_s', m_s) \cdot \frac{m_1 \dots m_k}{m_s} \quad (2.41)$$

причем достаточно ограничиться лишь случаем $(M_s', m_s) = 1$. Из Т.4 следует, что сравнение (2.37) имеет $d = \frac{m_1 \dots m_k}{m_s}$ решений, при условии, что x_s кратно d . Используя это утверждение и (2.40), перепишем (2.37) в виде:

$$\frac{m_1 \dots m_k}{m_s} M_s' \cdot b \equiv k \frac{m_1 \dots m_k}{m_s} \pmod{m_1 \dots m_k}, \quad (2.42)$$

Пользуясь свойством сравнений (Гл.3 [15]), разделим обе

части сравнений и модуль на общий делитель

$$M_s^i b_s^k \equiv k \pmod{m_s}. \quad (2.43)$$

Выбирая диапазон A_D так, чтобы

$$x = k \frac{m_1 \dots m_k}{m_s} < A_D \quad (2.44)$$

находим все k , при которых неравенство (2.44) выполняется, и для каждого из них определяем b_s^k , решая сравнение (2.43). Таким образом, по каждой переменной определяем координаты решений, удовлетворяющих заданному диапазону, добавляя в этот список координаты верхней и нижней границ и вычисляя расстояние между ближайшими точками в этом списке, находим окрестность грубых сбоев.

Приведем способ решения сравнения (2.39), основанный на теории непрерывных дробей (Гл. 4 [15]), причем ограничимся случаем $(a, m) = 1$.

Разлагая в непрерывную дробь отношение $m : a$

$$\frac{m}{a} = q_1 + \frac{1}{q_2 + \frac{1}{q_3 + \dots + \frac{1}{q_n}}} \quad (2.45)$$

находим P_{n-1} , последовательно вычисляя

$$P_s = q_s P_{s-1} + P_{s-2}. \quad (2.46)$$

Сравнение имеет решение:

$$x \equiv (-1)^{n-1} \cdot P_{n-1} \cdot b \pmod{m}. \quad (2.47)$$

Решим сравнение

$$1008 b_1 \equiv x \pmod{53 \cdot 63}, \quad (2.48)$$

которое является решением системы сравнений (2.12) при $m = 53$,

становится ясным при рассмотрении табл. 2.2. Выделенные диагонали I–IO удовлетворяют диапазону от 0 до 514. Если диапазон увеличить, то значения, расположенные на II–й диагонали, становятся допустимыми, и окрестность грубых сбоев уменьшается.

Таким образом, при выборе $A_D = 300$, абсолютная ошибка при определении $b_1 \pm 5$, приводящая к грубым сбоям, может быть скорректирована. Если полученное решение системы сравнений превышает допустимое значение, то наиболее вероятно, что действительным решением является ближайшее допустимое решение в окрестности грубых сбоев. Для определения окрестности разработана программа DIAP1 (Приложение I). Программа по значениям модулей системы сравнений находит решение сравнения первой степени (2.43) для каждого модуля и определяет минимальную и максимальную окрестности для всех модулей. При проверке целых чисел на взаимную простоту используется алгоритм Евклида для нахождения наибольшего общего делителя двух целых чисел [49] .

2.5. Анализ динамического диапазона локального способа

Рассмотрим систему:

$$\begin{aligned} x &\equiv b_1 \pmod{529}, \\ x &\equiv b_2 \pmod{633}. \end{aligned} \tag{2.53}$$

Ее решение:

$$x = 74061b_1 + 260797b_2 \pmod{334857}. \tag{2.54}$$

Из сравнения с (2.13), (2.14) видно, что динамический диапазон зависит от количества значащих цифр, с которым задан модуль, и соответственно определены остатки b_1 и b_2 . С другой стороны, из Т.2 видно: динамический диапазон определен величиной $m_1 m_2 \dots m_k$. При добавлении каждого нового сравнения в систему (2.12), диапа -

зон увеличивается пропорционально добавляемому модулю и количеству значащих цифр, с которыми производятся вычисления. Итак, для увеличения динамического диапазона необходимо или увеличить точность, с которой определены остатки и модуль (при увеличении точности на одну значащую цифру диапазон увеличивается примерно в 10 раз), или увеличить число сравнений (при этом диапазон растет в 10^k раз, где k - количество значащих цифр).

Однако при максимальном диапазоне метод очень чувствителен к ошибкам в определении остатков. Малые ошибки в начальных данных приводят к большим ошибкам в определении результата. К счастью, оказывается, что искусственное ограничение диапазона приводит к значительному увеличению окрестности грубых сбоев.

Таким образом, процесс оптимального выбора параметров для достижения желаемого диапазона представляет собой максимальную задачу. Зная погрешность, с которой определяются b_i (обычно это задается условиями эксперимента), и при заданном числе сравнений, подбирают значения модулей такие, при которых окрестность грубых сбоев по крайней мере больше, чем разброс ошибочных значений при определении b_i . Если физически невозможно подобрать модули с такими соотношениями, необходимо увеличить число сравнений.

2.6. В ы в о д ы

1. Наиболее часто используемые алгоритмы удаления фазовой неоднозначности основаны на анализе пространственной структуры поля разностей фаз, определенных с точностью до периода, что накладывает дополнительные требования на исследуемые волновые поля.

2. Существующие локальные методы удаления фазовой неоднозначности обладают небольшим динамическим диапазоном, определяют фазу только в одной точке, сложны для автоматизации, поэтому область их использования довольно ограничена.

3. Предложен локальный метод, основанный на решении системы сравнений, способный по нескольким сериям измерений, отличающихся ценой интерференционных полос, определять полную фазу в каждой точке поля. Результирующий алгоритм прост, легко автоматизируется, обладает приемлемым динамическим диапазоном.

4. Рассмотрено влияние погрешностей, вызванных неточным измерением разностей фаз, определенных с точностью до периода, на вычисление полной фазы. Показано, что ограничение динамического диапазона приводит к возникновению окрестности грубых сбоев, в пределах которых ошибки могут быть скорректированы.

5. Исследован динамический диапазон метода. Для увеличения динамического диапазона необходимо увеличить точность, с которой измеряются разности фаз, определенные с точностью до периода, или увеличить число измерений при разных ценах интерференционных полос.

3. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ СИСТЕМА С УПРАВЛЯЕМЫМ ФАЗОВЫМ СДВИГОМ

3.1. Описание структуры системы

Для реализации алгоритмов определения фазовых характеристик волновых полей разработана интерференционная измерительная система. Система состоит из оптической установки, устройства внесения управляемого фазового сдвига, устройства ввода интерференционных картин и микроЭВМ с набором периферийных устройств. Структура системы показана на рис. 3.1.

Специализированные устройства были выполнены в стандарте <КАМАК >. Использование в измерительно-вычислительных комплексах стандарта <КАМАК > позволяет легко модифицировать систему заменой отдельных модулей.

Управление экспериментом и обработка полученных данных осуществлялись микроЭВМ типа МС 1201.02.

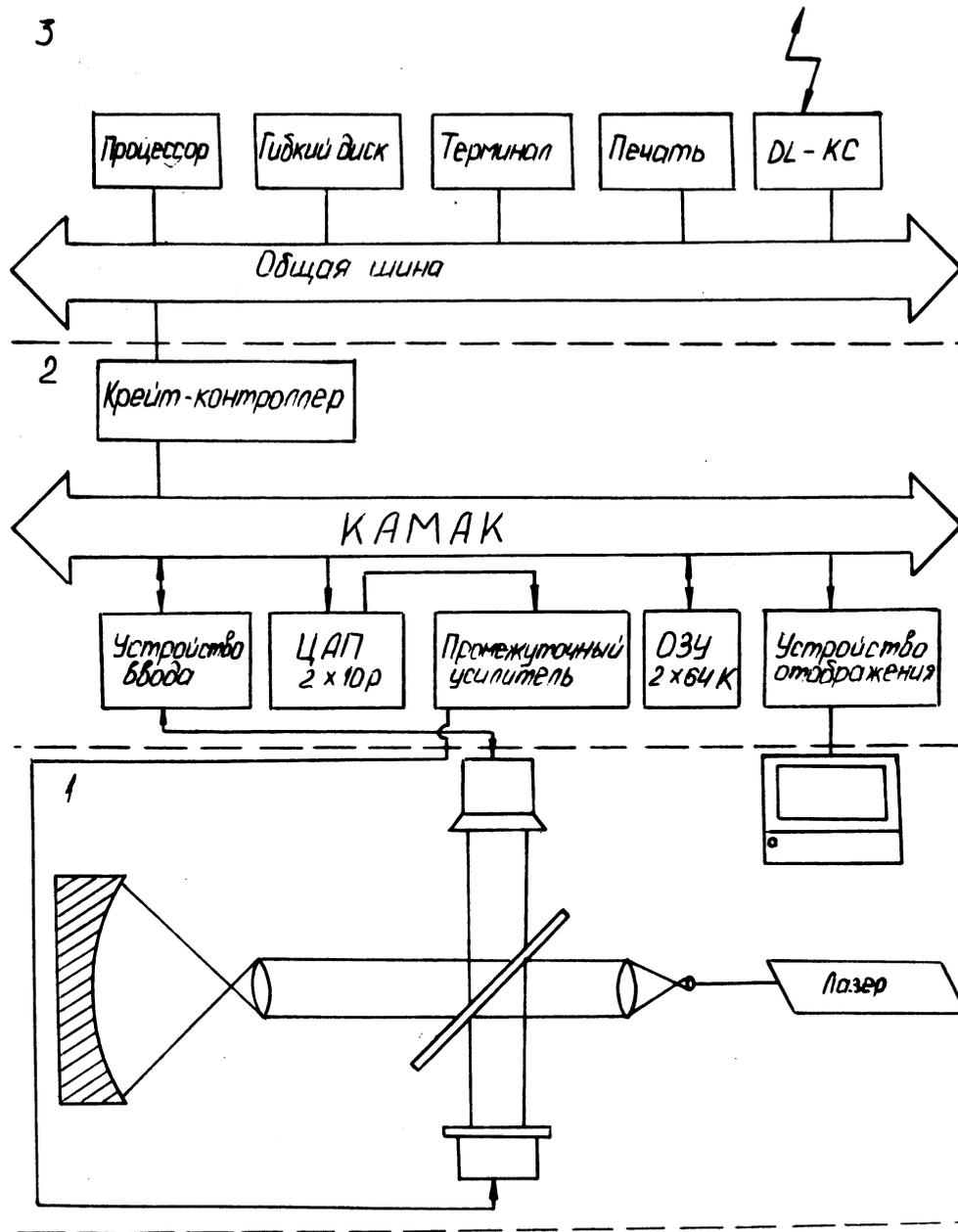
Для хранения и отображения полутоновой информации использовались модули из состава разработанной в СКБ НП системы "Линза".

В качестве устройства документирования использовалось мозаично-печатающее устройство Д-100, позволяющее получать псевдополутоновые копии, графическую и алфавитно-цифровую информации. Для ввода на фотопленку применялось устройство микрофильмирования <КАРАТ > [4, 69], подключенное с помощью блока сопряжения [26].

По линии связи результаты обработки передавались в более мощную ЭВМ для дальнейшей обработки и создания архива.

Для внесения управляемого фазового сдвига использовался фазовый модулятор на основе пьезокерамики. Для ввода интерференционных картин применялось устройство ввода оптических изображений на основе передающих телевизионных трубок. Описание этих устройств приведено ниже.

Структура системы с управляемым фазовым сдвигом.



1. Оптическая установка.
2. Специализированные устройства.
3. Микропроцессорная система с набором периферийных устройств.

Рис. 3.1

Для поддержки системы было разработано программное обеспечение, состоящее из комплекса программ для обработки и расшифровки интерферограмм, управления исполняющими устройствами системы, вывода полутоновой и графической информации и обеспечения работы системы в автономном режиме и на линии связи с более мощной ЭВМ.

3.2. Устройства внесения фазового сдвига

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. Согласно этому, вся совокупность известных модуляторов разбивается на два широких класса - "отражающие" и "преломляющие".

Следующая ступень классификации отражает многообразие физико-механических принципов, лежащих в основе способа управления активным элементом фазового модулятора.

Последняя ступень делит фазовые модуляторы на группы в зависимости от типа активного элемента.

Из класса отражающих модуляторов наиболее простым с точки зрения принципа, лежащего в основе работы прибора, является электромеханический модулятор, представляющий собой микрометрический винт с зеркалом, управляемый электродвигателем. Однако из-за высокой сложности изготовления прецизионного механического двигателя и низкой точности внесения фазового сдвига подобные приборы не нашли широкого применения.

Более совершенными являются магнестрикционные модуляторы. Принцип действия их основан на деформации стержня из магнитного материала, помещенного в магнитное поле. Модулятор представляет себе

стержень с приклеенным стержнем и катушку, в которую подается управляющий ток. Хотя точность такого модулятора выше, необходимость создания сильных полей и токов затрудняет его применение.

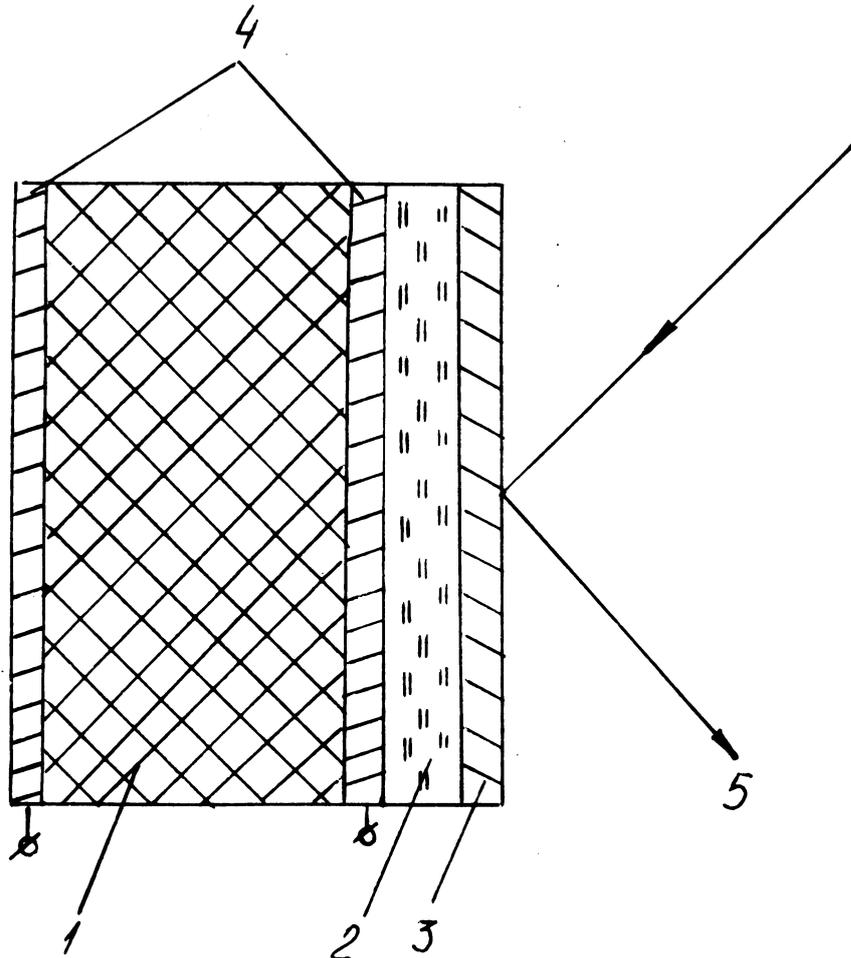
Для модуляции фазы пригодны также брэгговские ячейки. В них создается поперечная акустическая волна, в результате чего ячейка начинает функционировать, как толстая дифракционная решетка. При этом волны сжатия и растяжения, перемещаясь в среде со скоростью звука, вызывают в оптическом сигнале доплеровский сдвиг частоты и дифракционное отклонение пучка. Принципиальная возможность осуществления фазовой модуляции неоднократно подтверждалась экспериментально, в частности, в работе [104]. Наиболее очевидными достоинствами брэгговских ячеек являются их малая постоянная времени и отсутствие движущихся частей. Однако для возбуждения акустической волны и ее управления требуется достаточно сложная аппаратура, т.е. типичное значение частоты возбуждающего сигнала равно 80 МГц, с мощностью около одного ватта.

В настоящее время наиболее широкое применение при создании фазовых модуляторов нашел пьезоэлектрический эффект. Это объясняется прежде всего малостью габаритов таких устройств, их низкой стоимостью, высокой точностью внесения фазового сдвига, относительно низкими управляющими напряжениями (порядка сотен вольт), низкой потребляемой мощностью, большой механической прочностью, надежностью, высоким быстродействием. Важное место среди пьезоматериалов занимает пьезокерамика.

Широкое распространение получила пьезокерамика ЦТС, создаваемая из материалов на основе твердых растворов цирконата — титана свинца. Она характеризуется высокими значениями пьезомодулей и диэлектрической проницаемости, большой механической прочностью и стойкостью к воздействию влаги и атмосферных факторов.

На рис. 3.2 показана конструкция фазового модулятора на осно

Конструкция фазового модулятора на основе пьезокерамики.



1. Пьезокерамика.
2. Стеклянная подложка.
3. Отражающее покрытие.
4. Электроды.
5. Модулируемое излучение.

Рис. 3.2.

ве пьезокерамики. При подаче на электроды управляющего напряжения возникает обратный пьезоэффект, вызывая перемещения отражающего покрытия, что, в свою очередь, приводит к внесению фазового сдвига в оптическое излучение. Фазовые модуляторы, подобные описанному, использовались для внесения фазового сдвига, например, в [83, 84, 87, 91, 97, 100, 110, 118, 131] .

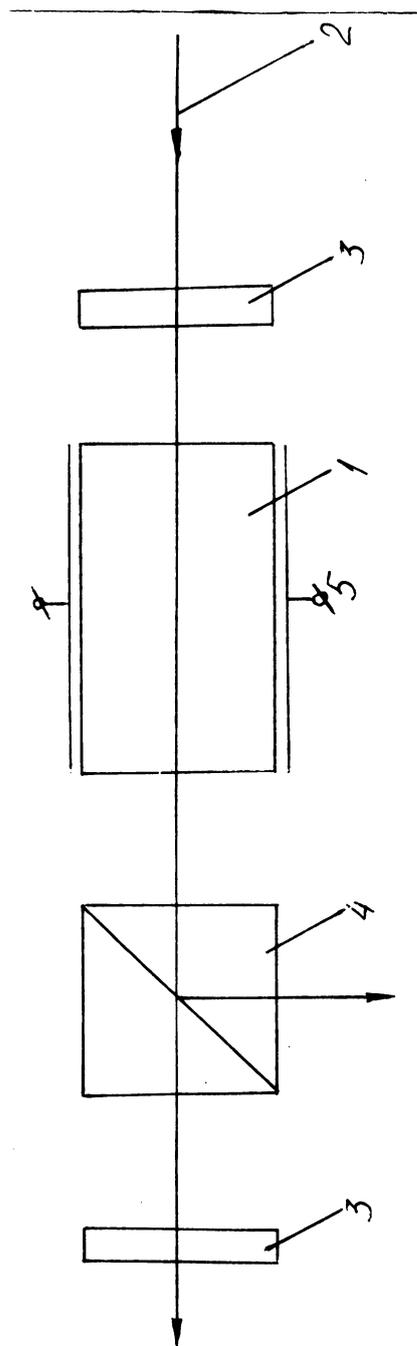
Из класса преломляющих наиболее широкое применение получили электрооптические фазовые модуляторы. Их действие основано на электрооптическом эффекте, характеризующимся возникновением сдвига фаз между компонентами обыкновенного и необыкновенного лучей световой волны, зависящего от величины приложенного электрического поля.

В качестве модулируемой среды в основном используются электрооптические кристаллы типа метаниобата лития. Жидкие кристаллы, в которых тоже имеет место электрооптический эффект, мало используются из-за невысокой оптической однородности, приводящей к амплитудно-фазовым искажениям. Однако важным их достоинством является низкое (порядка десятков вольт) управляющее напряжение.

В настоящее время промышленностью выпускается серийно ряд электрооптических модуляторов типа "МЛ", имеющих широкий спектр основных параметров - таких, как значение полуволнового напряжения, максимальная мощность модулируемого излучения, быстродействие и т.д.

Схема устройства сдвига фаз на основе электрооптического модулятора представлена на рис. 3.3. Прибор работает следующим образом: поляризованный полуволновой пластиной пучок проходит через электрооптический модулятор. На выходе модулятора он содержит две компоненты, одна из которых поляризована в вертикальной плоскости, другая - в горизонтальной. Относительные амплитуды этих компонент определяются ориентацией полуволновой пластины, установленной на выходе модулятора. Компоненты разделяются поляризационным делителем, и вторая полуволновая пластина делает плоскость поляризации горизонталь-

Схема устройства сдвига фаз на основе электрооптического модулятора



1. Электрооптический модулятор.
2. Модулируемое излучение.
3. Полуволновые пластины.
4. Поляризационный делитель.

Рис. 3.3

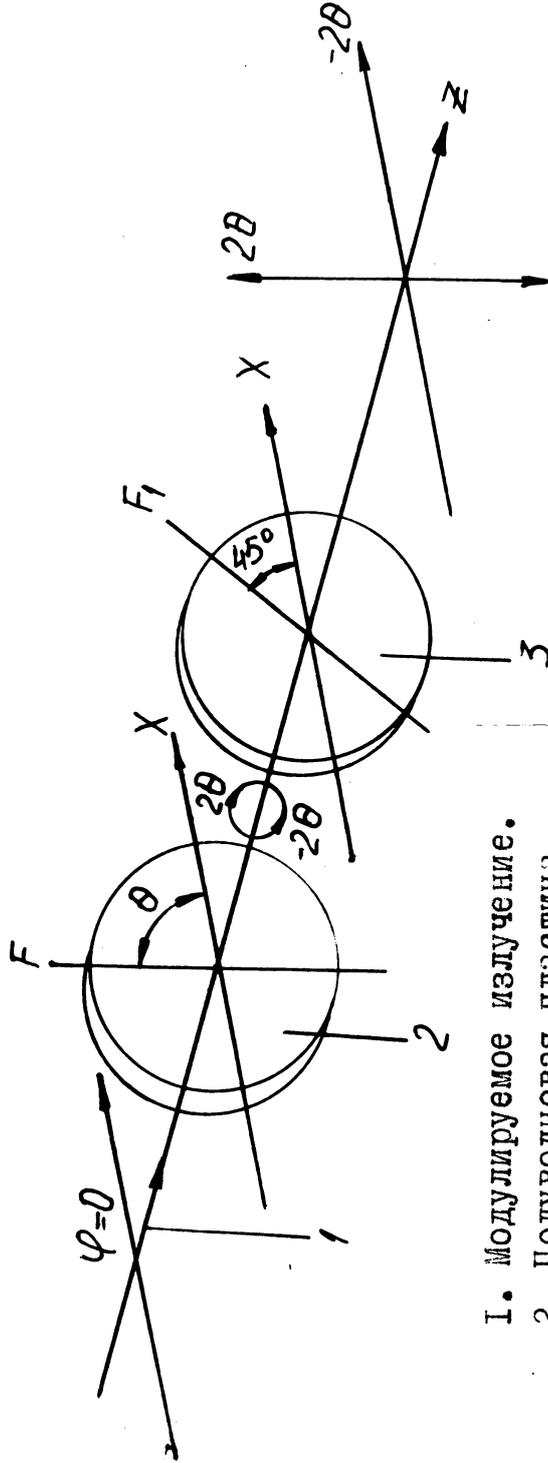
но поляризованного пучка вертикальной. Один из этих пучков используется как опорный, другой - как объектный. Фазовый сдвиг между этими пучками задается приложенным к электрооптическому модулятору напряжением. Подобные устройства описаны в работах [96, 99] .

Фазовые модуляторы, построенные на основе электрооптических кристаллов, характеризуются высоким быстродействием, линейностью фазового сдвига, точностью, малой потребляемой мощностью. Однако, они требуют применения дополнительных оптических элементов, таких как полуволновые пластины, поляризационные делители, имеющие высокую стоимость и трудоемкость изготовления. Важным недостатком электрооптических модуляторов является низкая, предельно допустимая, мощность модулируемого излучения.

Схема электромеханического устройства сдвига фаз, использующая анизотропию элементов, приведена на рис. 3.4. Устройство состоит из полуволновой пластины, смонтированной на пустотелом валу шагового двигателя и четвертьволновой пластины, закрепленной стационарно так, что ось F образует с осью X угол в 45° . Когда горизонтально поляризованная волна проходит через полуволновую пластину, ориентированную так, что ее ось образует с осью X угол θ , линейная поляризация поворачивается на 2θ . Эта волна может быть представлена как линейная комбинация двух волн с круговой поляризацией и разностью фаз 4θ . После того, как они проходят через полуволновую пластину, они преобразуются в горизонтальную и вертикальную поляризации, сохраняя фазовые различия между собой. Итак, изменяя θ , относительная фаза между двумя ортогонально поляризованными волнами будет равна 4θ . Далее две волны разделяются поляризационным делителем, как и в предыдущем случае.

Несмотря на хорошую точность сдвига фаз [86, 96] , устройство характеризуется низким быстродействием, наличием механических узлов и дорогостоящей поляризационной оптики.

Схема электромеханического устройства сдвига фаз.



1. Модулируемое излучение.
2. Полуволновая пластинка.
3. Четвертьволновая пластинка.

Рис. 3.4

В результате анализа существующих фазовых модуляторов, проведенного по таким критериям как простота, стоимость, точность, стабильность, надежность, возможность модуляции больших мощностей оптического излучения был выбран модулятор на основе пьезокерамики.

Ниже приведены основные характеристики используемого модулятора:

- тип пьезокерамики - ЦТС-19,
- полуволновое напряжение - 170 В,
- высота - 20 мм,
- диаметр - 30 мм,
- рабочая апертура - 30 мм,
- рабочая длина волны - 630 нм.

Зависимость фазового сдвига от величины приложенного напряжения выражается аналитической зависимостью:

$$\Delta \varphi = \pi V_k / V_0,$$

где $\Delta \varphi$ - фазовый сдвиг в рад; V_0 - полуволновое напряжение; V_k - приложенное напряжение.

Для управления фазовым сдвигом служит цифро-аналоговый преобразователь, совмещенный с промежуточным усилителем, который необходим для согласования напряжения на выходе АЦП с рабочим уровнем напряжения для пьезокерамики. Общий вид устройства показан на рис.

3.5.

3.3. Устройство ввода оптической информации

Первичной информацией в когерентно-оптической системе являются оптические изображения. Устройства ввода преобразуют значения распределения яркости по полю картины в цифровые массивы, которые автоматически вводятся в ЭВМ. Любое устройство ввода изображений в ЭВМ может быть представлено в виде следующих друг за другом преобразователей [52] - оптического, осуществляющего перенос, уве -

Устройство внесения фазового сдвига на основе
пьезокерамики

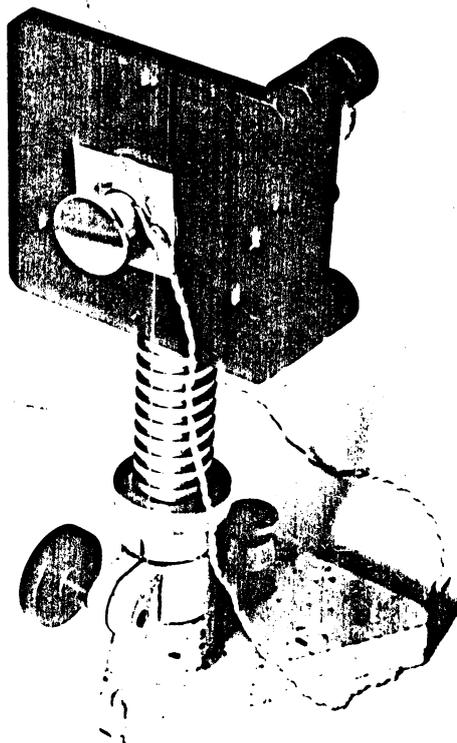


Рис. 3.5

личение или формирование изображений; сканатора, обеспечивающего пространственную развертку; фотоэлектрического преобразователя, с выхода которого электрический сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь и далее, через блок связи, в ЭВМ. В настоящее время разработан широкий спектр устройств ввода, что позволяет, исходя из целей эксперимента и характеристик вводимого изображения, выбрать конкретный тип устройства. Выделим характерные признаки, по которым различаются устройства ввода.

Отличительной особенностью устройств ввода является тип сканирования - электромеханический или электронный.

Важным достоинством электромеханической системы развертки являются:

- большое число элементов разложения;
- возможность применения считывающей апертуры произвольной формы;
- почти полное отсутствие геометрического искажения раstra и неравномерности чувствительности по полю.

Рассмотрим некоторые характерные черты устройств ввода, созданных на основе электромеханической развертки.

В ИАЭ СО АН СССР разработана система "Ромб" прецизионного ввода-вывода изображений для ЭВМ [13]. Система содержит два барабана. На одном укрепляется фотопленка с изображением, подлежащим вводу, другой предназначен для вывода. Вращение барабанов осуществляется синхронным двигателем со скоростью 1-4 с. Максимальный размер изображений 130 x 130 мм. Шаг квантования - 25, 50, 100 мкм, в зависимости от скорости вращения барабана. Перемещение считывающей головки осуществляет шаговый двигатель с микровинтом. Погрешность позиционирования по X и Y составляет ± 2 мкм. Оптические системы каналов считывания и записи обеспечивают получение апертуры квадратной формы 25x25, 50x50, 100x100 мкм.

В ОГМАНИ НЭТИ разработано устройство ввода на основе плоскостной электромеханической развертки и ФЭУ в качестве преобразователя [39]. Оптико-механическая часть системы смонтирована на станине большого инструментального микроскопа. Шаговые электродвигатели, управляемые от ЭВМ, перемещают координатный стол по двум ортогональным направлениям. Устройство имеет следующие технические характеристики: размер сканируемого поля - 62,5 x 62,5 мм, максимальное число отсчетов по каждой координате - 10^4 , шаг сканирования - 6,25 мкм - 12,5 мм - изменяется дискретно через 6,25 мкм, размер сканирующей апертуры - 10-500 мкм, быстродействие - 300 точек/с.

Фирма "Оптроникс" (Optronics, США) выпускает систему С-3400 "Фотомейшн Марк-IV". Это сканирующе-воспроизводящая система с плоским столом, перемещающимся на воздушной подушке. Размер вводимого изображения 25x25 см. Шаг сканирования 1-100 мкм с точностью позиционирования 1 мкм на 5 см. Скорость сканирования до 5000 отсчетов/с.

Основными недостатками электромеханической системы развертки являются: невысокое быстродействие и сложность механической части, которая обычно содержит прецизионные узлы, что приводит к высокой стоимости и сложности широкого тиражирования.

Одним из путей повышения быстродействия является организация сканирования и ввода по нескольким параллельным каналам. Фирма "Оптроникс" выпустила систему П-1800 "Фотомейшн Марк-III". В этой системе с вращающимся барабаном сканирование и ввод ведется восемью считывающими головками параллельно. Скорость сканирования достигает 240000 точек/с. Для сканирования поля размером 430x560 мм с разрешением 50 мкм требуется 7 мин.

Другим способом повышения быстродействия является объединение быстрого электронного сканирования малой площади с механическим перемещением фотоносителя. Подобная система разработана в ИАЭ СО АН

СССР [9] . Сканирующая система устройства "Зенит-2" содержит электронно-лучевую трубку высокого разрешения, установленную неподвижно над кареткой. Световое пятно может быть выведено в любую из 4096×4096 точек на экране ЭЛТ. Каретка перемещается электроприводом в горизонтальной плоскости по ортогональным направляющим. Максимальный размер изображения 42×42 см, точность позиционирования сканирующего пятна - 2 мкм, его диаметр - 6 мкм, время измерения в одной точке - 1 мкс.

Для осуществления фотоэлектрического преобразования в устройствах ввода применяют: фотодиоды, фотоэлектронные умножители (ФЭУ), передающие телевизионные трубки, твердотельные фотоприемные матрицы (ПЭС, фотодиодные), линейки фотодиодов и т.п. Телевизионные передающие трубки одновременно с фотоэлектрическим преобразованием осуществляют сканирование изображения. Эта возможность позволяет строить на их основе, а также на основе их твердотельных аналогов (ПЭС-матриц и фотодиодных матриц), системы ввода с электронным сканированием, в которых отсутствуют движущиеся механические узлы.

Достоинствами электронной развертки являются:

- высокое быстродействие;
- возможность произвольного сканирования под управлением ЭВМ;
- возможность электронного управления размером считывающей апертуры.

Несмотря на то, что по сравнению с электромеханической разверткой значительно меньше элементов разложения, отсутствует возможность применения апертуры произвольной формы и размеров, возникает проблема коррекции геометрических искажений и неравномерности чувствительности по полю, устройства ввода с электронной разверткой получили широкое распространение. Это вызвано существенным упрощением подобных устройств и снижением требований к их эксплуатационным характеристикам. Наиболее часто в устройствах ввода с электрон-

ным сканированием используются трубки с накоплением заряда - суперортиконы, видиконы, а также трубки мгновенного действия - диссекторы.

В ОГМАНИ НЭТИ разработано устройство ввода [36] , в котором для опто-электронного преобразования и сканирования изображения применяется диссектор ЛИ-605. Применение диссектора обеспечивает высокую линейность световой характеристики в широком диапазоне освещенностей и почти полную безынерционность преобразования свет-ток. Устройство имеет следующие технические данные: размер рабочей поверхности фотокатода 18x18 мм, размер вырезающей апертуры 50 мкм, время вывода апертуры в координату не больше 70 мкс, приведенная погрешность координаты считывания 3%, рабочий диапазон освещенностей фотокатода 0,1-100 лк, число уровней квантования видеосигнала - 256.

Хорошие фотометрические характеристики диссектора позволяют выполнять довольно точные яркостные измерения. Однако, для скоростных систем диссектор непригоден: при расширении полосы частот видеоусилителя повышается уровень шума, а при резких изменениях токов развертки начинают сказываться переходные процессы в катушках отклонения.

Из устройств ввода, работающих в темпе телевизионной развертки, можно отметить устройства, выполненные на основе телевизионных камер.

Сравнение телевизионных камер показывает, что камеры на базе твердотельных матричных фотоприемников весьма перспективны, но из-за несовершенства технологии в настоящее время уступают камерам, выполненным на основе телевизионных передающих трубок, по чувствительности и по пространственному разрешению.

Фирма "Джойс Лоэбл" (Joyce Loebel, Великобритания) выпустила систему "Меджискан" (Magiscan), в которой устройство

ввода выполнено на основе передающей телевизионной камеры. В камере использована трубка халникон, обладающая линейностью преобразования, высоким разрешением и малым уровнем шумов. Разложение изображения - 512×512 элементов с квантованием выходного сигнала на 64 уровня. Линейность разверток по строкам и кадру не менее 1%.

В СКБ ВТ СО АН СССР разработана система для ввода и интерактивной обработки изображений. Она позволяет в темпе телевизионной развертки вводить и запоминать до 8 изображений в формате 512×512 точек. Число уровней квантования видеосигнала - 64. Система выполнена в конструктиве < КАМАК > и занимает один крейт [8, 55] .

Для создания локальных измерительных систем необходимо было разработать простые, легко тиражируемые устройства ввода с небольшим числом выполняемых функций. В ОГМАНИ НЭТИ разработан ряд устройств на базе телевизионных камер. Наиболее простое из них за время одного полукадра оцифровывает первые 16 строк, за время другого полукадра следующие 16 и т.д. В промежутках между оцифровкой видеосигнала информация перекачивается под управлением ЭВМ во внешнюю память. Время ввода одного кадра формата 256×256 точек 1,5 с. Число уровней квантования 64 или 256. Устройство выполнено в стандарте < КАМАК > и в стандарте "Электроника-60".

Другое устройство имеет внутреннюю память, которая заполняется за время одного телевизионного кадра с одновременной визуализацией на полутонном мониторе. Формат кадра 512×512 точек. Число уровней квантования 256. Устройство выполнено в стандарте "Электроника-60".

Все существующие устройства ввода оптических полей существенно различаются как параметрами, так и областями применения. Перечислим требования к подобным устройствам, которые возникают при измерении поля разностей фаз методом управляемого фазового сдвига.

- Для компенсации вибраций, искажений, вызванных турбулентно -

стью атмосферы, необходимо уменьшить время ввода серии кадров, по которым вычисляется поле разностей фаз.

- Не требуется высокого пространственного разрешения. Число обрабатываемых элементов определяется скоростью вычислительных процессов и размером поля, в котором необходимо измерить поле разностей фаз.

- Нелинейность чувствительности по полю не является определяющей величиной. Единственным требованием является неизменность этой характеристики во время съема серии кадров.

- Для компенсации геометрических искажений раstra необходима стабильность этой характеристики на время всего эксперимента.

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют устройства ввода на основе матричных твердотельных датчиков изображений. Однако из-за несовершенства технологии в настоящее время наиболее доступны устройства на основе передающих телевизионных трубок.

3.4. Программное обеспечение системы

Аппаратные средства когерентно-оптической системы поддерживаются программным обеспечением.

Основными языками при реализации прикладных программ были Фортран и MACRO-ассемблер. Взаимодействие с исполняющими устройствами осуществлялось с помощью подпрограмм обслуживания, объединенных в библиотеку LSIKAM. Максимальный формат обрабатываемых изображений 256x256 точек. Для увеличения скорости обработки в систему введено внешнее ОЗУ, способное хранить до 4-х изображений максимального формата. Наличие линии связи позволяет осуществить доступ к архивам центральной ЭВМ. Стандартные средства поддержки межмашинной связи довольно громоздки и избыточны для данной системы. Поэтому была создана программа обмена между локальной системой, работающей под управлением операционной системы RT-II, и

центральной ЭВМ с системой RSX-II, которая осуществляет только три функции:

- "прозрачный" режим (терминал локальной системы становится одним из терминалов центральной ЭВМ);

- пересылку файлов из RT в RSX ;

- пересылку файлов из RSX в RT .

Ввод, обработка и расшифровка интерференционных картин осуществляется тремя основными программными модулями - FRIC, FRID, FRI .

Программа FRIC предназначена для ввода интерферограмм, выделения центров полос, нумерации полос при участии оператора и записи полученной информации в файл в формате, совместимом с программой FRI .

Выделение центров полос происходит следующим образом. Интерферограмма очищается от шумов с помощью рекуррентного цифрового фильтра [66, 67] . Согласование полосы пропускания фильтра с полосой полезного сигнала осуществлялось путем визуальной оценки фильтруемого сигнала. В зависимости от ориентации полос выделялись точки перепада. Вид ориентации задавался оператором и мог быть горизонтальным, вертикальным или круговым. В последнем случае полосы имели вид концентрических окружностей. Определялся общий центр, и сканирование для выделения точек перепада происходило по радиальным линиям, исходящим из центра. Если полосы имеют сложный вид, возможно разбиение на подобласти, в которых линии, соединяющие центры полос, имеют приблизительно одинаковую ориентацию.

Оператор имеет возможность исправить сбойные точки. Существуют три вида коррекции: удаление, вставка и перемещение точки.

Задача определения линии, проходящей через точки перепада одной полосы, решалась в зависимости от вида полос. Если полосы ориентированы горизонтально или вертикально, то линии представлялись полиномом, который определялся аппроксимацией методом наименьших

квадратов. Для полос, имеющих сложный вид, линия проводилась за два этапа: сначала проводилось "утопление" точек перепада, соответствующих определенным полосам, затем точки соединялись между собой. При соединении использовался алгоритм, разработанный Робертсом [63, 64]. Прослеженные линии из-за шумов в интерферограммах имеют разрывы, ложные ответвления и соединения. Использовать полученную информацию для расшифровки можно, лишь предварительно откорректировав ее. Упорядочение, а затем и дальнейшая нумерация полос требует интерактивного режима обработки при участии экспериментатора. Для этой цели был разработан графический редактор. Он позволяет выполнять следующие операции: отслеживать линии с помощью двух типов маркеров — крестообразного и прямоугольника переменных размеров; получать графики в выбранных сечениях по строкам и столбцам; заполнять часть кадра внутри маркерного прямоугольника необходимым фоном; делать геометрические преобразования (сдвиг, поворот, масштабирование) над всем кадром или указанной маркером частью кадра; проводить линии с помощью маркера типа "резиновая нить"; присваивать всем точкам указанной линии какое-либо значение; производить псевдоокраску изображения.

Нумерация полос осуществлялась в интерактивном режиме оператором путем указания маркером на экране графического дисплея полосы и задания ее номера. Если полосы монотонно изменялись в некотором диапазоне, то задавались пределы монотонности и знак приращения. Полосы в пределах зоны монотонности нумеровались автоматически. Таким образом, процесс обработки интерферограмм в этом режиме можно представить в виде диаграммы, показанной на рис. 3.6.

Выходной файл имеет следующий формат. Для каждой полосы вводится порядковый номер полосы $[W]$, за которым следует список $[UV]$ координатных пар, завершающийся словом END . Например, если вдоль полосы порядка W были измерены координаты трех то-

Обработка интерферограмм в режиме выделения
середин полос.

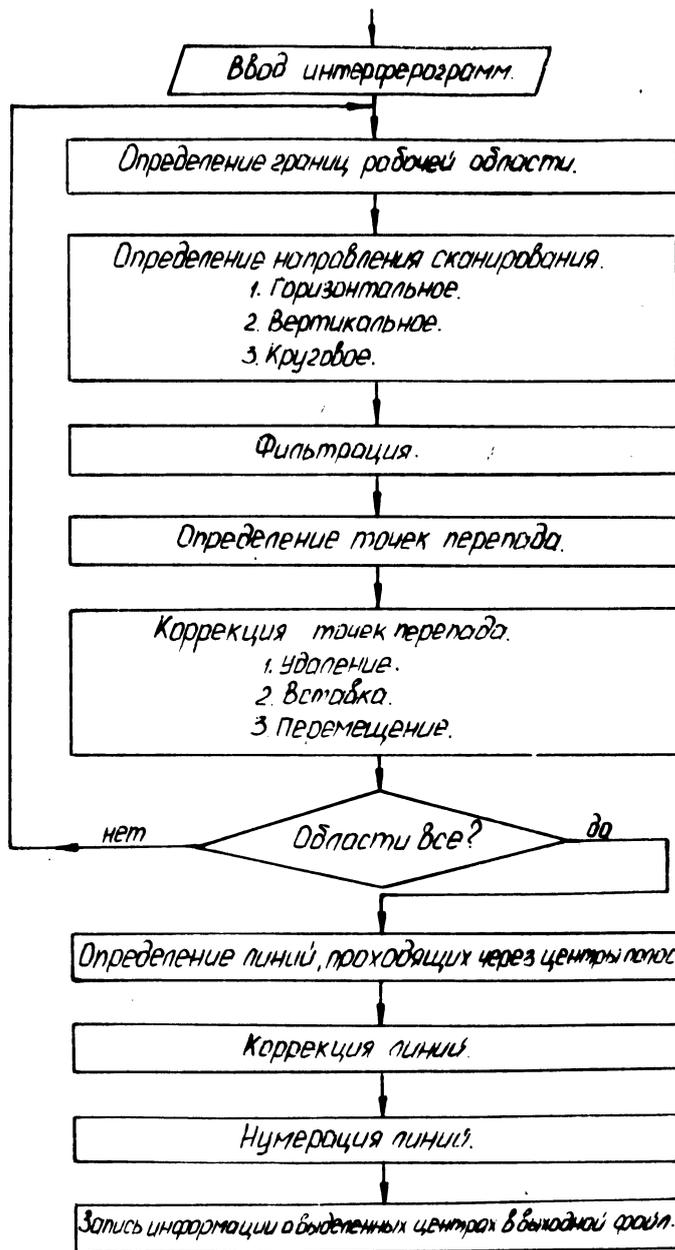


Рис. 3.6

чек, то данные выводятся в виде:

W U1V1U2V2U3V3 END

Следующий номер полосы может вводиться после этого оператора END, и за ним может следовать ряд координат новой полосы. В конце файла должен быть записан еще один END, отмечающий конец данных.

Программа FRID предназначена для автоматического выделения поля разностей фаз методом управляемого фазового сдвига и записи полученной информации в файл в формате, совместимом с программой FRI.

Вводилась серия из четырех интерферограмм, перед вводом каждой в цифро-аналоговый преобразователь засылался код, соответствующий фазовому сдвигу на 0° , 90° , 180° , 270° . Значение цифрового кода определялось предварительной калибровкой. По формуле (1.42) определялось поле разностей фаз с точностью до периода. Для ускорения вычислений перед началом работы в одной из зон внешнего ОЗУ запоминалась таблица арктангенсов. По значениям числителя и знаменателя находился адрес результата в таблице. Полная фаза восстанавливалась по полю разностей фаз, определенных с точностью до периода двумя способами: методом развертывания фаз и методом, основанном на решении системы сравнений. В первом случае достаточно одной серии измерений, во втором необходимо минимум две, причем перед получением второй серии интерферограмм необходимо изменить цену полосы в оптической установке. Выбор метода восстановления полной фазы задается оператором и зависит от параметров измеряемого объекта. Полный цикл определения фазы при восстановлении полной фазы методом развертки составил 30 с, а при использовании восстановления, основанного на теории целых чисел - 1 мин.

Возможен режим усреднения по нескольким полным циклам.

Для визуальной оценки результатов выводились графики по произвольным сечениям и трехмерный график поля полных фаз.

Выходной файл имел следующий формат. Данные вводились вдоль линии сканирования. Каждая из линий начиналась со своей V -координаты, после чего следовал список центров полос, состоящий из пар: порядковый номер, координата U , и заканчивающийся символом E . Если вводились данные о трех полосах, то информация о них выводилась в виде:

$V W1 U1 W2 U2 W3 U3 E.$

Слово END использовалось после последней линии сканирования для обозначения окончания набора данных.

Программа FRI производит анализ данных, полученных в результате программ $FRIC$ и $FRID$. Она состоит из четырех основных блоков: основной анализ интерферограмм, геометрический анализ пятен, 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 определяются апертурная функция, функция распределения амплитуды, оптическая передаточная функция. Для этих вычислений используется алгоритм быстрого преобразования Фурье. Могут быть получены графики сечений в различных 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 и сов-

мешать с другими волновыми фронтами.

3.5. В ы в о д ы

1. Исследованы методы внесения фазового сдвига между опорным и объектным пучками интерферометра.

2. В качестве устройства внесения управляемого фазового сдвига был выбран фазовый модулятор на основе пьезокерамики с устройством управления, состоящим из цифро-аналогового преобразователя и промежуточного усилителя.

3. Проведен анализ наиболее характерных устройств ввода оптических изображений. Показано, что для систем с управляемым фазовым сдвигом целесообразно использовать устройства ввода с электронной разверткой на основе передающих телевизионных трубок.

4. Создана когерентно-оптическая измерительная система для автоматизации исследований методами оптической и голографической интерферометрии и разработано программное обеспечение к ней.

В зависимости от целевого назначения эксперимента система может работать в трех режимах: без внесения управляющих воздействий в оптическую схему; с внесением управляемого фазового сдвига; с внесением управляемого фазового сдвига и с изменением цены полосы интерферометра.

Система является эффективным инструментом при интерференционных исследованиях и позволяет значительно облегчить и ускорить анализ экспериментальных данных.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ С УПРАВЛЯЕМЫМ ФАЗОВЫМ СДВИГОМ

Измерительные системы на основе интерференционных методов определения полей разностей фаз получили широкое распространение в экспериментальных исследованиях и для промышленного контроля. Голографический или оптический интерферометр в такой системе является системным преобразователем поля измеряемых величин в интерференционную картину. Погрешности измеряемых величин являются функциями первичных погрешностей при определении поля разностей фаз interfering волновых фронтов. Применение методик, основанных на управляемом фазовом сдвиге, позволяет значительно увеличить точность измерений. В этой главе мы рассмотрим основные причины возникновения погрешностей определения поля фаз и возможности снижения уровня погрешностей при использовании методик с управляемым фазовым сдвигом.

4.1. Анализ влияния первичных погрешностей при определении поля разности фаз

Основное выражение для измерения волнового фронта (I.47) можно переписать в виде:

$$\varphi(x, y) = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cdot \sin \varphi_n}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cdot \cos \varphi_n}, \quad (4.1)$$

где $\varphi_n = \frac{2\pi}{N} m(n-1)$; $n = 1, 2, \dots, N$; $m = 1, 2, \dots$

Видно, что погрешность измерения фазы зависит от погрешности при задании фазового сдвига и погрешности при измерении интенсивности. Будем считать, что погрешности достаточно малы для того, чтобы можно было пользоваться линейными оценками, т.е. пренебрегать произведениями выше первого порядка.

Дифференцируя по φ_k и I_k , получим:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \varphi_k} = \frac{I_k \cos \varphi_k \sum_{n=1}^N I_n \cos \varphi_n + I_k \sin \varphi_k \sum_{n=1}^N I_n \sin \varphi_n}{\left(\sum_{n=1}^N I_n \sin \varphi_n \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N I_n \cos \varphi_n \right)^2}, \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial I_k} = \frac{\sin \varphi_k \sum_{n=1}^N I_n \cos \varphi_n - \cos \varphi_k \sum_{n=1}^N I_n \sin \varphi_n}{\left(\sum_{n=1}^N I_n \sin \varphi_n \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N I_n \cos \varphi_n \right)^2}, \quad (4.3)$$

где $k = 1, 2, \dots, N$.

При условии $\Delta \varphi \ll \varphi_k$ и $\Delta I \ll I_k$ получим выражения для оценок абсолютной и относительной погрешностей.

$$\Delta \Phi \approx \sum_{k=1}^N \left| \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi_k} \right| (\pm \Delta \varphi_k) + \sum_{k=1}^N \left| \frac{\partial \Phi}{\partial I_k} \right| (\pm \Delta I_k); \quad (4.4)$$

$$\Delta \Phi \approx \sum_{k=1}^N \left| \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi_k} \varphi_k \right| (\pm \delta \varphi_k) + \sum_{k=1}^N \left| \frac{\partial \Phi}{\partial I_k} I_k \right| (\pm \delta I_k); \quad (4.5)$$

$$\delta \Phi = \frac{\Delta \Phi}{\Phi} \approx \sum_{k=1}^N \left| \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi_k} \frac{\varphi_k}{\Phi} \right| (\pm \delta \varphi_k) + \sum_{k=1}^N \left| \frac{\partial \Phi}{\partial I_k} \frac{I_k}{\Phi} \right| (\pm \delta I_k), \quad (4.6)$$

где $\delta \varphi_k = \frac{\Delta \varphi_k}{\varphi_k}$, $\delta I_k = \frac{\Delta I_k}{I_k}$.

Рассмотрим зависимость абсолютной погрешности фазы от величин фазы при различных значениях N , $\delta \varphi$, δI (рис. 4.1 а, б, в). Символом '*' показано результирующее значение абсолютной по-

Оценка абсолютной погрешности определения
фазы

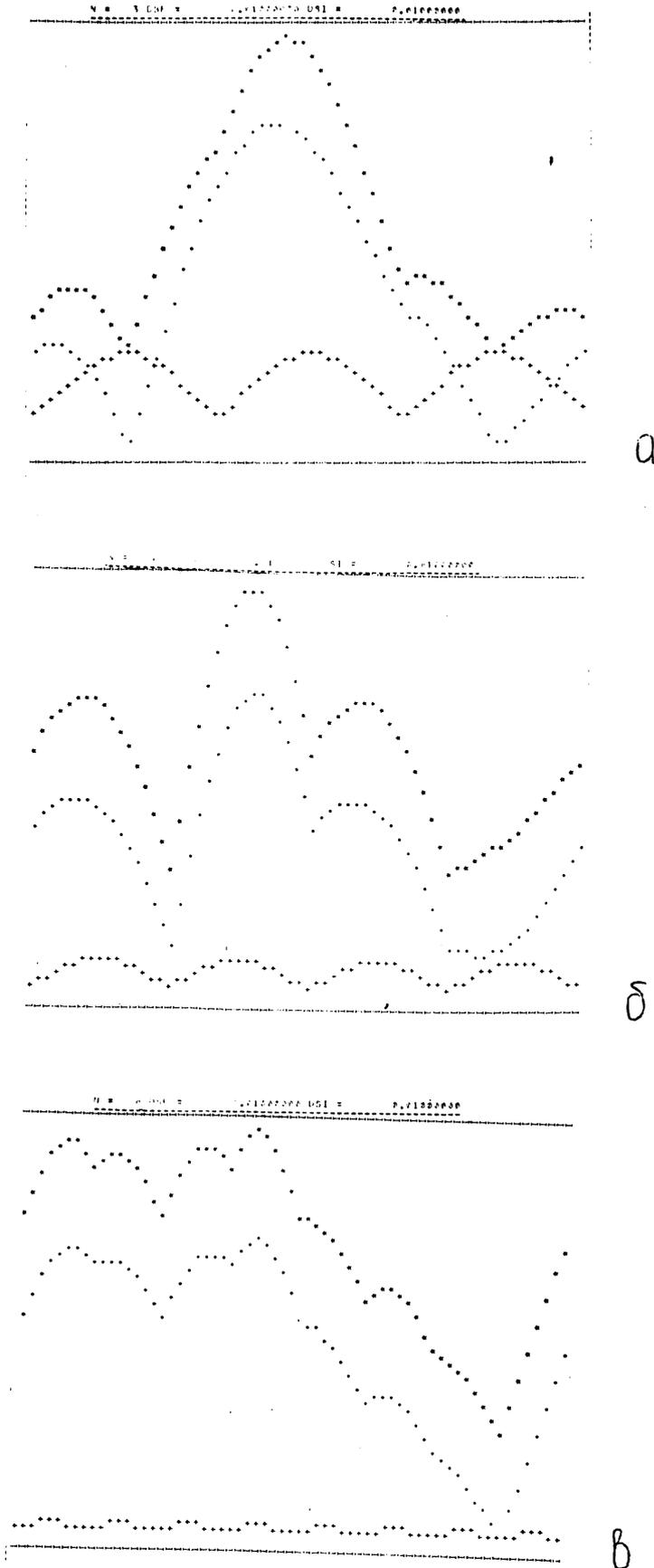


Рис. 4.1

грешности; '·' и '+' - соответственно значения первого и второго слагаемых выражения (4.5). Из графиков видно, что приведенная погрешность не превышает 2% при погрешностях установки фазы и измерения интенсивности порядка 1%. Следовательно, при фазовых измерениях оптических полей в интерферометрах с ценой полосы $\lambda/2$ погрешность определения фазы $\lambda/100$.

Заметим, что в выражении для оценки абсолютной погрешности (4.4) коэффициенты $\frac{\partial \Phi}{\partial \psi_k}$ и $\frac{\partial \Phi}{\partial I_k}$ имеют различный порядок. Из выражений (4.2) и (4.3) видно, что эти коэффициенты отличаются множителем I_k . Для оценки влияния погрешностей задания фазы и погрешности определения интенсивности на абсолютную погрешность измерения фазы получим:

$$\Delta \Phi \approx \sum_{k=1}^N \left| \frac{\partial \Phi}{\partial \psi_k} \right| (\pm \Delta \psi_k) + \sum_{k=1}^N \left| \frac{\partial \Phi}{\partial I_k} \cdot I_k \right| (\pm \delta I_k). \quad (4.7)$$

Оценка абсолютной погрешности фазы зависит от относительной флуктуации $\frac{\Delta I}{I}$ измеряемой интенсивности и случайной флуктуации $\Delta \psi$, вызванной температурной турбулентностью и механической нестабильностью. Погрешность измерения интенсивности зависит от конкретного типа устройств регистрации. Наиболее часто используются системы ввода оптических изображений на базе телевизионных трубок. Случайный шум отношения $\frac{\Delta I}{I}$ телевизионных камер на основе электроннолучевых трубок типа видикон зависит от шумов самой трубки, от шумов входных каскадов видеоусилителя, от пульсации и фона источников питания, от наводок и электромагнитных помех внешних устройств, и едва ли может быть теоретически рассчитан [62]. Средняя величина электрического шума определяется эксперименталь-

но и составляет около 2-3% для различных видов телевизионных камер [91]. Усреднение по N независимым сканированиям уменьшает эту величину в \sqrt{N} раз. Учесть ошибки при задании фазового сдвига сложнее, поскольку проявляются они косвенно, через измеряемую интенсивность.

Рассмотрим влияние погрешности при установке фазы на погрешность измеряемой разности фаз [123].

Интенсивность интерференционной картины запишем в виде:

$$I_n(x, y) = I_0(x, y) \{1 + V(x, y) \cos[\Phi(x, y) - \Psi_n]\}, \quad (4.8)$$

где Ψ_n - действительный сдвиг фаз; V - контраст интерференционной картины.

Абсолютная погрешность при установке фазового сдвига равна:

$$\Delta \Phi = \Psi_n - \Psi_n, \quad (4.9)$$

где Ψ_n - используемое при расшифровке значение сдвига фаз. Подставив (4.9) в (4.8), получим:

$$I_n'(x, y) = I_0(x, y) \{1 + V(x, y) \cos[\Phi(x, y) - \Psi_n + \Delta \Psi_n]\}. \quad (4.10)$$

С помощью выражения (4.1) по этим значениям интенсивности определяется фаза Φ' , которая отличается от истинной фазы Φ на величину $\Delta \Phi$:

$$\Delta \Phi = \Phi' - \Phi. \quad (4.11)$$

Подставив в (4.1), получим:

$$\operatorname{tg} \Phi' = \frac{M}{D} = \frac{\sum_n I_n' \sin \Psi_n}{\sum_n I_n' \cos \Psi_n}, \quad (4.12)$$

$$\Delta \Phi = \operatorname{arctg} \left(\frac{M}{D} \right) - \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} \Phi), \quad (4.13)$$

$$\Delta\varphi = \operatorname{arctg} \frac{M - D \operatorname{tg}\varphi}{D + M \operatorname{tg}\varphi}. \quad (4.14)$$

При малых $\Delta\varphi_n$ можно принять $\cos \Delta\varphi_n = 1, \sin \Delta\varphi_n = \Delta\varphi_n$. Тогда выражение примет вид:

$$\Delta\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{n=1}^N \Delta\varphi_n - C \cos 2\varphi - S \sin 2\varphi}{N - C \sin 2\varphi + S \cos 2\varphi}, \quad (4.15)$$

где $C = \sum_{n=1}^N \Delta\varphi_n \cos 2\varphi_n$; $S = \sum_{n=1}^N \Delta\varphi_n \sin 2\varphi_n$.

В выражении (4.15) $\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Delta\varphi_n$ превосходит все другие

члены. Кроме того, видно, что фазовая погрешность является функцией от двойной величины фазы. Если ошибка при установке фазы случай-

на, то $\sum_{n=1}^N \Delta\varphi_n$ уменьшается в \sqrt{N} . Поэтому использование

алгоритмов с большим числом сдвигов приводит к заметному уменьшению погрешности измерения фазы. Однако использование микрокомпьютеров и дрейф интерферометров приводит к тому, что высокоскоростные измерения становятся возможны только при небольшом числе сдвигов. В этом случае для уменьшения фазовой погрешности необходимо проводить усреднения по нескольким сериям наблюдений.

Наиболее часто для внесения фазового сдвига используются фазовые модуляторы, представляющие собой зеркало, закрепленное на пьезокерамике. Подавая калиброванное напряжение на пьезокерамику, управляют разностью хода волн интерферирующих пучков. Однако, перемещение пьезокерамики не всегда линейная функция от приложенного напряжения. Тем самым вносится погрешность, не являющаяся случайной.

Рассмотрим эффект влияния нелинейности фазового сдвига на наи-

более часто используемые трех- и четырехточечные алгоритмы [82] .

Так как в действительности пьезокерамика нелинейна очень слабо, то перемещение закрепленного на ней зеркала можно описать квадратичной функцией.

Пусть интенсивность интерференционной картины определяется выражением (4.8). Фазовая разность между двумя интерферирующими пучками в этой точке (x, y) во время t может быть выражена как

$$\Phi'(x, y, t) = \Phi(x, y) + S_1 V(t) + S_2 V^2(t), \quad (4.16)$$

где S_1 - линейный, а S_2 - квадратичный коэффициенты движения пьезокерамики; $V(t)$ - напряжение, поданное на пьезокерамику.

Для пошагового метода напряжение изменяется с одинаковым приращением так, что

$$\Gamma'_n(x, y) = \Gamma_0(x, y) \times \left\{ 1 + V(x, y) \cos \left(\Phi(x, y) + 2\pi c \frac{n}{N} + 2\pi d \left(\frac{n}{N} \right)^2 \right) \right\}, \quad (4.17)$$

где n - порядковый шаг; $n = 0, 1, 2, \dots, N$; c и d - линейный и квадратичный коэффициенты. Для линейной пьезокерамики, которая точно откалибрована при условии сдвига на 2π за N шагов, $c = 1$ и $d = 0$.

Подставляя значения Γ'_n в соответствующие формулы расшифровки, получим значения фазы, которая будет отличаться от действительной. Изменяя значения фазы от 0 до 2π , можно показать [82], что фазовая ошибка имеет приблизительно синусоидальный вид. Рассмотрим наиболее часто применяемый четырехточечный алгоритм расшифровки (1.40). Фазовые ошибки для измерений $\Gamma_0, \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ сдвинуты относительно измерений $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$

на π . Это следует из выражения (4.15). Сдвиг между двумя последовательностями измерений - $\frac{\pi}{2}$, а фазовая ошибка является функцией от двойной величины фазы. Поэтому усреднение двух измерений по наборам данных, имеющих сдвиг на $\pi/2$, приводит к значительно - му уменьшению фазовой ошибки. Полной корректировки фазовой ошибки не произойдет, поскольку соответствующие ошибки при одном значении фазы имеют разную амплитуду. Первая серия измерений имеет меньшую фазовую ошибку, чем вторая. Так, при значении квадратичного коэф - фициента $d = 0,01$ суммарный фазовый сдвиг должен быть для четы - рех шагов 360° , но в действительности он равен $363,6^\circ$ для первой серии и $365,4^\circ$ - для второй.

Тот же результат получается и при использовании алгоритма (I.39). Однако амплитуды фазовых ошибок значительно меньше. Это объясняется тем, что квадратичное перемещение пьезокерамики лучше описывается прямой с $C > 1$ и $d = 0$. В этом случае между соседними отсчетами сдвиг одинаков, но не равен $\pi/2$. Именно при таких ус - ловиях и работает алгоритм (I.39).

Для трехточечного алгоритма (I.35) со сдвигом 120° для каждо - го шага фазовые ошибки сдвинуты на 240° . Поэтому усреднение позво - ляет только очень слабо уменьшить ошибку.

Наиболее удачным алгоритмом при небольшой нелинейности движе - ния пьезокерамики является (I.39). Но более предпочтительно ис - пользовать простую формулу (I.40) с усреднением измерений по сери - ям, сдвинутым друг относительно друга на $\pi/2$. Наименее удачным в этом случае является трехточечный алгоритм (I.35).

Подобные результаты получены в [82] также для алгоритмов непрерывного сдвига.

Таким образом:

- абсолютная погрешность при определении фазы пропорциональ-

на абсолютной погрешности при задании сдвига фаз;

- абсолютная погрешность определения фазы является периодической функцией с частотой, в два раза большей частоты интерференционных полос.

Если ошибки при внесении сдвига фаз случайны и не коррелированы, то погрешность определения фазы может быть уменьшена:

- использованием алгоритмов восстановления с большим числом сдвигов;

- усреднением измеренных фаз, полученных по нескольким сериям наблюдений.

Если присутствует эффект влияния слабой нелинейности при фазовом сдвиге, то погрешность определения фазы значительно уменьшается при использовании алгоритмов (1.39) и (1.40) при усреднении измеренных фаз, полученных по нескольким сериям наблюдений, сдвинутых на $\pi/2$. Особенно эффективна эта процедура при использовании алгоритма (1.39). При использовании одиночных серий наблюдений или при расшифровке с помощью трехточечного алгоритма (1.35) необходимо производить точную калибровку фазового сдвига.

4.2. Влияние спекл-шума на погрешность определения разности фаз

При использовании когерентного лазерного освещения возникает высокочастотная пространственная фазовая модуляция, которая приводит к модуляции интенсивности интерферограммы. Появляется пятнистая структура, так называемый спекл-шум. Спекл-шум становится помехой при измерении поля разности фаз, когда интерферирующие волны смещаются, или когда возникают относительные наклоны и повороты фронтов при внесении сдвига фаз, соизмеримые с размером спеклов. В этом случае возникают грубые погрешности, хорошо видимые на рис. 4.2а. Для борьбы с такими погрешностями возникают два пути. Пер -

вый: разработка оптических схем интерферометров, при которых не возникает пространственных сдвигов, наклонов, поворотов интерферирующих фронтов при внесении сдвигов фаз. На рис. 5.13 а результаты расшифровки интерференционных картин, полученных в интерферометре Тваймана-Грина, для которого соблюдается условие параллельной юстировки. Результирующее поле разностей фаз свободно от влияния грубых погрешностей, связанных с влиянием спекл-шума. Если же аппаратными средствами не удастся избавиться от влияния спекл-шума, то необходимо применять математические методы фильтрации. Поскольку спекл-шум имеет более высокие пространственные частоты, чем интерференционные полосы, то достаточно эффективна обычная низкочастотная фильтрация полей интенсивностей, по которым производится расшифровка. Другим способом борьбы с грубыми погрешностями, вызванными спекл-шумом, является медианная фильтрация результирующего поля разностей фаз [10] . Медианная фильтрация осуществляется посредством движения некоторой апертуры вдоль дискретизированного изображения и замены значения элемента изображения в центре апертуры медианой исходных значений отсчетов внутри апертуры. Этот метод нелинейной обработки предпочтительней использовать при сглаживании импульсного шума, а именно такой вид имеют погрешности от спекл-шума. На рис. 4.2 б поле разностей фаз, очищенное с помощью медианной фильтрации.

Таким образом, вызванные влиянием спекл-шума погрешности, возникающие при разъюстировке интерферометра при внесении фазового сдвига, эффективно устраняются математическими методами фильтрации.

Влияние спекл-шума на определение поля
разности фаз



Рис. 4.2

4.3. Влияние паразитных волновых фронтов на погрешность определения поля разности фаз

Небольшие неоднородности оптики и частички пыли на поверхности оптических элементов создают дифракционные волны, которые интерферируют с фоновой волной.

Влияние паразитных волновых фронтов на точность измерения фазы наиболее полно рассмотрено в [84, 123] .

Пусть интерферируют три волновых фронта:

- $\exp(i\varphi)$ - волновой фронт от объекта;
- $\exp(i\varphi_2)$ - опорный волновой фронт;
- $q \exp(i\eta)$ - паразитный волновой фронт,

где q - отношение амплитуды паразитного фронта к амплитуде объектного ($q \ll 1$), тогда результирующая интерференционная картина:

$$I_r = 2 + q^2 + 2 \cos(\varphi - \varphi_2) + 2q \cos(\eta - \varphi_2) + 2q(\varphi - \eta). \quad (4.18)$$

Эти значения подставляются в (4.1) для вычисления измеряемого поля фаз. Эту искаженную фазу обозначили φ' .

$$\varphi' = \arctg q \frac{\sin \varphi + q \sin \eta}{\cos \varphi + q \cos \eta}. \quad (4.19)$$

Абсолютная погрешность $\Delta \varphi = \varphi' - \varphi$, вызванная интерференцией с паразитным фронтом, равна:

$$\Delta \varphi = \arctg q \frac{q \sin(\eta - \varphi)}{1 + q \cos(\eta - \varphi)}. \quad (4.20)$$

Из выражения (4.20) видно, что $\Delta \varphi$ зависит от φ . Эта зависимость приводит к методу уменьшения этого типа фазовых искажений. Введем добавочный фазовый сдвиг опорного волнового фронта. Если фазовый сдвиг равен π , усреднение фаз ведет к значительно-

му уменьшению фазовой ошибки.

Остаточное отклонение равно:

$$\Delta \bar{\Phi} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{q^2 \sin(2\eta - 2\Phi)}{q^2 \cos(2\eta - 2\Phi) - 1}. \quad (4.21)$$

Сравнение (4.21) и (4.20) показывает значительное улучшение регулярности фазового профиля. Однако полного подавления подобных искажений не происходит. Кроме этого, происходит значительное падение точности при измерении фаз вблизи π .

В [123] предложен следующий алгоритм. Производим две серии измерений, причем во второй изменим фазу на χ и отдельно вычислим числитель и знаменатель для каждого измерения. Эти значения подставляем в следующее выражение:

$$\tilde{\Phi} = \operatorname{arctg} \frac{N_1 - N_2}{D_1 - D_2}. \quad (4.22)$$

Учитывая выражение (4.19), заметим, что $\tilde{\Phi}$ не зависит от паразитного волнового фронта. С другой стороны,

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi} &= \operatorname{arctg} \frac{\sin \Phi - \sin(\Phi + \chi)}{\cos \Phi - \cos(\Phi + \chi)}, \\ \tilde{\Phi} &= -\operatorname{arctg} \frac{1}{\operatorname{tg}(\Phi + \chi/2)}. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Учитывая, что

$$\operatorname{arctg} x + \operatorname{arctg} \frac{1}{x} = \begin{cases} \frac{\pi}{2}, & \text{если } x > 0, \\ -\frac{\pi}{2}, & \text{если } x < 0, \end{cases}$$

получим:

$$\tilde{\Phi} = \Phi + \frac{\chi}{2} - \frac{\pi}{2}. \quad (4.24)$$

Лучший результат получается при $X = \pi$. Однако X не может быть равно $2\pi n$, поскольку это ведет к неопределенности типа 0/0. Это ограничивает использование алгоритма (4.22) при позиционно зависимом сдвиге фаз. Такой случай возникает, например, перед съемом данных для второго измерения.

Таким образом, для компенсации ошибок, вызванных паразитными волновыми фронтами, необходимо произвести две серии измерений, во второй из которых вносится фазовый сдвиг, равный π . Усреднение фаз ведет к значительному уменьшению фазовой ошибки. В случае, если сдвиг фаз непозиционно зависим, возможна полная компенсация при использовании алгоритма (4.22).

4.4. Анализ погрешности от дискретности измерения интенсивности

Непрерывное значение интенсивности в каждой точке интерферограммы при вводе в ЭВМ квантуется по уровню. При малых шагах квантования Δi количество отсчетов будет большим, и точность воспроизведения значения интенсивности - высокой. При большом количестве отсчетов уменьшается, но при этом, как правило, снижается точность восстановления [72]. Тем самым вносится погрешность измерения интенсивности, которая влияет на точность определения разности фаз. Оптимальным является такое число уровней квантования, которое обеспечивает измерение разности фаз с заданной точностью при минимальном количестве уровней. В этом случае все отсчеты существенны. Избыточные отсчеты отрицательно сказываются на производительности обработки данных, вызывают дополнительные расходы на хранение, приводят к значительному усложнению используемых устройств ввода оптических изображений. Поэтому необходимо рассмотреть влияние количества уровней квантования измеряемой интенсивности на погрешность определения фазы с целью сокращения избыточ-

ных отсчетов. Рассмотрим равномерное квантование по уровню, при котором непрерывное значение сигнала отождествляется с ближайшим меньшим уровнем. При этом максимальная погрешность квантования равна :

$$\max \Delta x_k = \max |I - I_k| = \Delta i . \quad (4.26)$$

Рассмотрим наиболее часто используемый алгоритм расшифровки (I.40):

$$\Phi = \operatorname{arctg} \frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4} = \operatorname{arctg} \frac{A}{B} . \quad (4.27)$$

При n -уровнях квантования значения числителя и знаменателя меняются в пределах от -2^n до 2^n с шагом 1. На рис. 4.3 показано распределение значений разности фаз в зависимости от значений числителя и знаменателя выражения (4.27) (меньшему значению фазы соответствует более темный цвет). Из рис. 4.4 видно, что при произвольном распределении значений A и B в допустимых диапазонах фазовая ошибка увеличивается при приближении к центру координатной плоскости и может достигать $\pi/4$ при максимальной погрешности квантования Δi . Однако значения числителя и знаменателя связаны между собой. При выводе формул для расшифровки использовался тот факт, что значение числителя пропорционально $\sin \Phi$, а значение знаменателя - $\cos \Phi$. Множителем является контраст интерферограммы в измеряемой точке. Эта величина пропорциональна используемому динамическому диапазону. Если при сдвиге фаз 2π значение интенсивности изменяется от 0 до I_{\max} , коэффициент пропорциональности равен 2^n . В этом случае можно записать:

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{2^n \sin \Phi}{2^n \cos \Phi} = \frac{A}{B} , \quad (4.28)$$

откуда следует:

$$\sqrt{A^2 + B^2} = 2^n , \quad (4.29)$$

Распределение значений фаз $\Phi = \arctg \frac{A}{B}$.

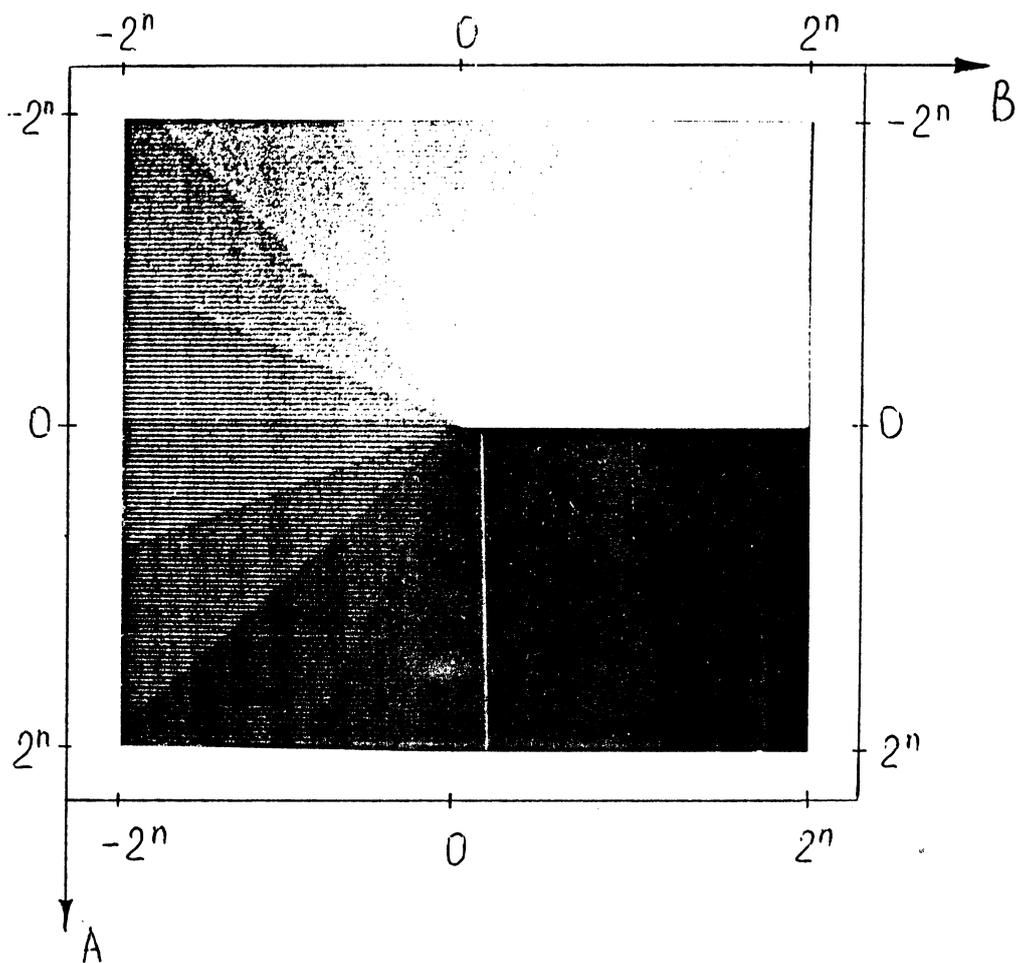


Рис. 4.3

Влияние погрешности квантования на погрешность определения разности фаз

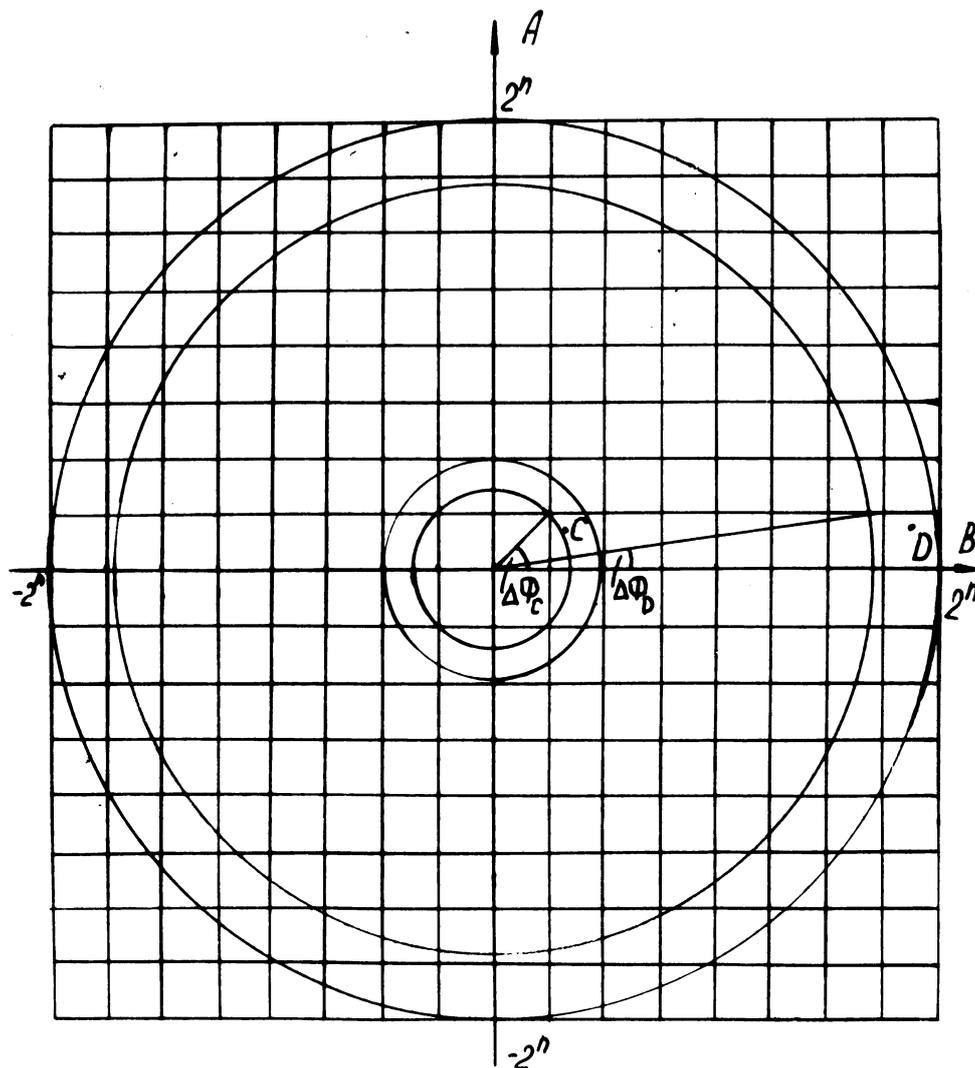


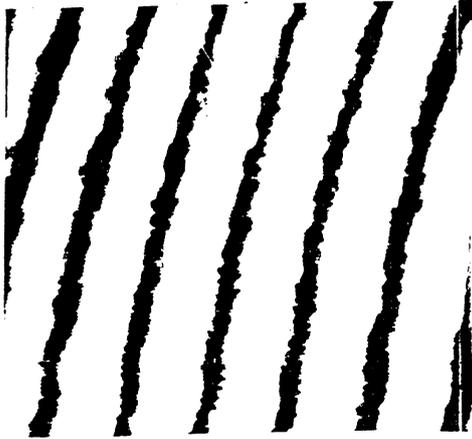
Рис. 4.4

т.е. при максимальном использовании динамического диапазона значения числителя и знаменателя являются координатами точек, расположенных на окружности с радиусом 2^n . Погрешность определения фазы при максимальной ошибке квантования не превышает $\arctg \frac{1}{2^n - 1}$. Значения абсолютных погрешностей при различных значениях n приведены в следующей таблице:

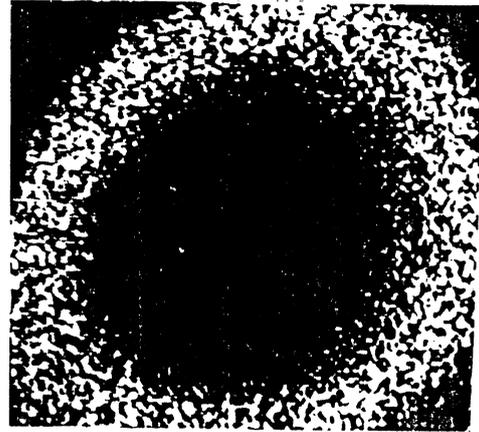
n	1	2	3	4	5
$\Delta\varphi_n$	0,7854	0,3218	0,1419	0,0666	0,0322
n	6	7	8	9	10
$\Delta\varphi_n$	0,0159	0,0079	0,0039	0,002	0,001

Как видно из таблицы, при шести и более уровнях квантования величина погрешности становится приемлемой. Неполное использование динамического диапазона оказывает то же влияние, что и уменьшение числа уровней квантования при полном диапазоне. На рис. 4.5 - 4.7 показаны реальные распределения $\text{tg } \varphi$ по координатной плоскости (A, B) (A - одна из интерференционных картин, B - график значений интенсивности вдоль центрального сечения интерферограммы, δ - распределение $\text{tg } \varphi$, 2 - график распределения $\text{tg } \varphi$ вдоль центрального сечения). Конечная ширина колец объясняется неравномерностью распределения динамического диапазона по всей плоскости интерферограммы. Радиус зависит от используемого динамического диапазона. Приведенные распределения могут являться косвенной оценкой качества эксперимента. Радиус и ширина кольца определяют величину и распределение динамического диапазона по полю интерферограммы.

Реальное распределение $\operatorname{tg}\varphi$.



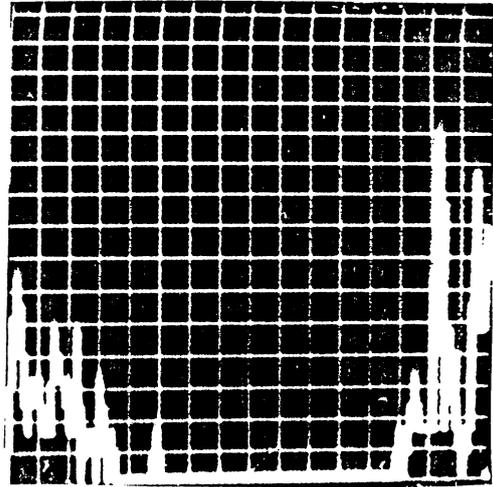
a



б



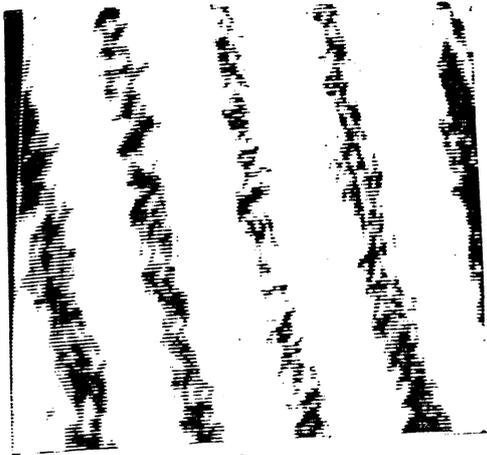
в



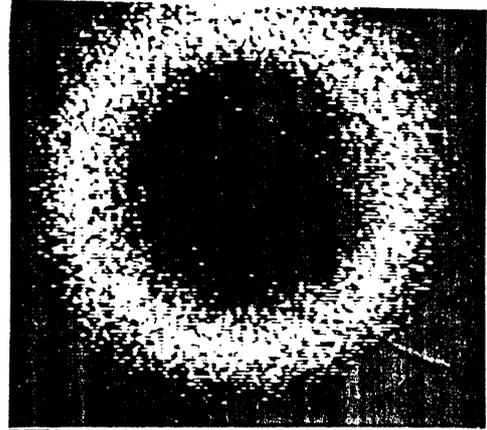
г

Рис. 4.5

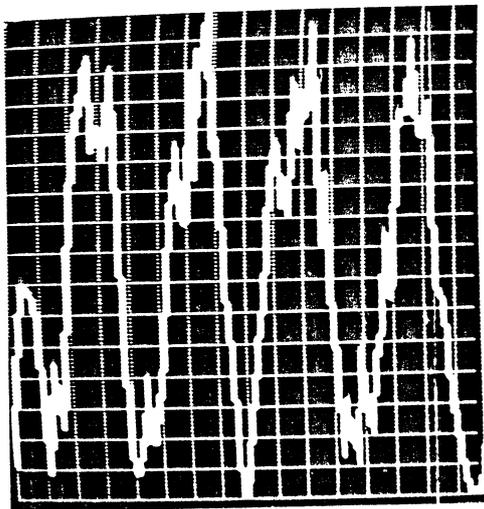
Реальное распределение $\operatorname{tg}\varphi$.



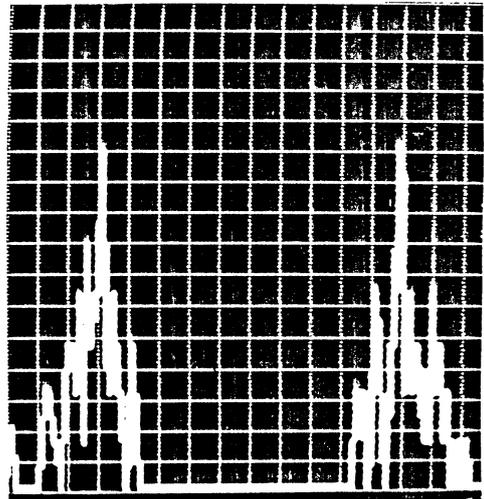
a



b



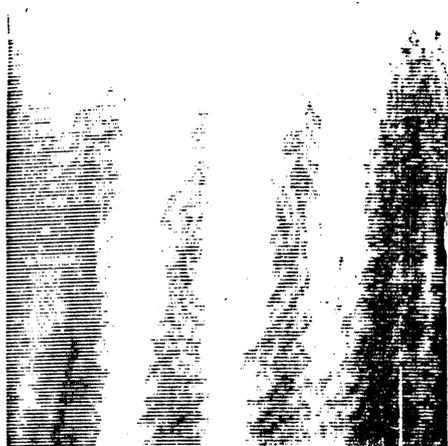
c



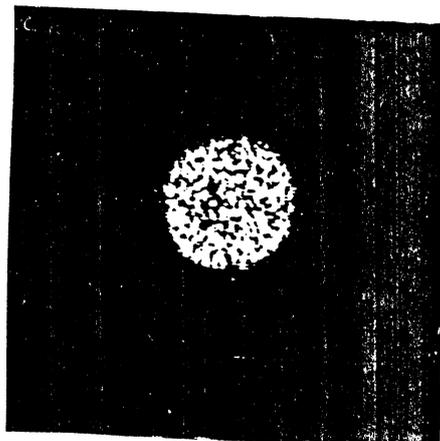
d

Рис. 4.6

Реальное распределение $\text{tg}\varphi$.



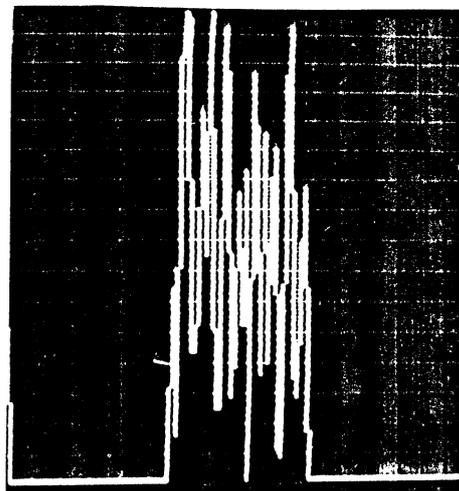
a



b



c



d

Рис. 4.7

4.5. Калибровка устройств управления фазовым сдвигом

Как видно из выражения (4.4), оценка максимальной погрешности при измерении разности фаз методом внесения управляемого фазового сдвига имеет тот же порядок, что и величина погрешности при задании сдвига. Неточность установки фазового сдвига приводит к погрешности, которая является периодической функцией с двойной пространственной частотой. В этом разделе рассматривается калибровка при задании сдвига с помощью эталонного зеркала, закрепленного на пьезокерамике. Однако описанный способ может быть использован и для других видов фазовых модуляторов.

Две проблемы связаны с движением закрепленного на пьезокерамике зеркала: изучение степени линейности движения пьезокерамики и определение чувствительности пьезокерамики, т.е. величину подаваемого напряжения, необходимого для перемещения эталонного зеркала из начального положения в положение, задаваемое значением фазового сдвига, используемого в формуле расшифровки.

Первым этапом исследований являлось определение приближенного значения полуволнового напряжения, т.е. напряжения, при котором эталонное зеркало смещается на половину длины волны. Для этого фазовый модулятор помещался в опорное плечо интерферометра Тваймана-Грина и измерялось напряжение, подаваемое на пьезодвижитель, при котором интерференционная картина менялась на период.

Для проверки линейности проводились многократные серии измерений с различными начальными значениями. Расшифровка производилась по четырехточечному алгоритму (I.39). Использование этого алгоритма позволяет значительно снизить искажения измеряемой разности фаз при нелинейном характере движения пьезокерамики. Проведенные исследования используемых модуляторов позволили выделить ли -

нейный участок характеристики. Дальнейшие измерения проводились при смещении пьезокерамики в пределах этого участка. Алгоритм (I.39) не зависит от конкретной величины сдвига. Требуется лишь, чтобы величины сдвигов были равны. Поэтому этот алгоритм наиболее удобен при использовании фазовых модуляторов с линейной характеристикой. Однако наиболее высоким быстродействием обладает алгоритм (I.40) с величиной фазовых сдвигов 0° , 90° , 180° , 270° . Для определения точного значения величины фазового сдвига использовалась следующая процедура. По величине полуволнового напряжения приближенно определялся сдвиг $\sim 90^\circ$. Делалось четыре сдвига. При сдвиге, точно равном 90° , результирующая интерференционная картина должна совпасть с исходной. Если фазовый сдвиг отличается, то визуально возможно отличить графики сечений интерференционных полос. Таким образом, после серии итерации определялся фазовый сдвиг с погрешностью $\pm 5^\circ$. Затем опять проводилась серия измерений с одинаковым фазовым сдвигом. Величина фазового сдвига может быть определена из выражения [89] :

$$\beta = \arccos \left[\left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{A-E}{B-D} \right) \right]. \quad (4.25)$$

Использование подобной процедуры позволило добиться погрешности при установке фазового сдвига менее 1 %.

Подобная уточняющая процедура проводилась в дальнейшем перед каждой крупной серией измерений для компенсации дрейфа электронных компонентов согласующего усилителя.

4.6. В ы в о д ы

I. Проведена оценка погрешностей при определении поля разностей фаз в зависимости от погрешностей установки сдвига фазы и погрешности при измерении интенсивности.

2. Исследовано влияние ошибок при установке фазы. Показано, что фазовая погрешность является функцией от двойной величины фазы.

3. При некоррелированной случайной ошибке установки фазы для снижения погрешности определения фазы необходимо или применять алгоритмы расшифровки с большим числом сдвигов, или производить усреднение по нескольким сериям наблюдений.

4. При случайной ошибке установки фазы со слабой нелинейностью погрешность определения фазы уменьшается при использовании алгоритмов (I.39) и (I.40) усреднением фаз, определенных по нескольким сериям измерений, сдвинутых на $\pi/2$. При использовании оди-
ночных серий наблюдений или при расшифровке с помощью трехточечного алгоритма (I.35) необходимо производить точную калибровку фазового сдвига.

5. Для компенсации ошибок, вызванных паразитными волновыми фронтами, необходимо произвести две серии измерений, во второй из которых вносится фазовый сдвиг, равный π . Если сдвиг фаз не позиционно зависим, возможна полная компенсация.

6. Погрешности, вызванные влиянием спекл-шума, носят характер грубых погрешностей и эффективно устраняются математическими методами фильтрации.

7. Разработан метод калибровки фазового модулятора.

8. Исследовано влияние погрешностей, вызванных конечным числом уровней квантования при измерении интенсивности. Показано, что для определения фазы с необходимой точностью достаточно шести уровней квантования.

9. Предложенные способы снижения уровня погрешности позволяют определять поле разностей фаз с погрешностью 1-2 % от цены полосы.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

5.1. Анализ полей деформаций накладными голографическими интерферометрами

Рассмотрим возможности системы при решении одной из задач экспериментальной механики - задачи растяжения изотропной пластинки, ослабленной центральным круговым отверстием (задача Кирша) [20, 29] .

Впервые задачу о распределении напряжений в пластине с круговым отверстием при известных растягивающих усилиях, приложенных в срединной плоскости, решил путем подбора Г. Кирш. В работе [73] были получены зависимости для перемещений U , V точек поверхности такой пластины. Компоненты тензора деформаций определяли по закону Гука и в соответствии с работой [42] .

Таким образом, при экспериментальном решении задачи Кирша можно было сравнить полученные результаты с известным теоретическим решением, что позволяет оценить эффективность использования системы для исследования напряженно-деформированного состояния образцов.

Образец из сплава Д16Т (длина 400 мм, ширина 40,2 мм, толщина 1,06 мм, диаметр отверстия 6 мм) испытывали на центральное растяжение на испытательной машине ДМ-30М. На одной стороне образца с помощью промежуточной оптически-прозрачной среды закрепляли фотопластинку ПЭ-2. Интерферограммы записывали во встречных пучках методом двух экспозиций [19] . Приращение нагрузки между первой и второй экспозициями составило 2,8 кН. Расшифровка интерференционных картин осуществлялась в соответствии с методикой, описанной в работе [42] .

Для определения компонент ϵ_x , ϵ_y тензора деформаций использовали следующие разрешающие уравнения:

$$\varepsilon_x = \frac{\lambda}{2 \cos \alpha} \left(\frac{\partial N_1}{\partial x} - \frac{\partial N_2}{\partial x} \right), \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\lambda}{2 \cos \beta} \left(\frac{\partial N_3}{\partial y} - \frac{\partial N_4}{\partial y} \right), \quad (5.2)$$

где α , β - углы, отсчитываемые от координатных осей и определяющие направление наблюдения; N_i ($i = 1, 2, 3, 4$) - порядковые номера интерференционных полос; λ - длина волны используемого источника света.

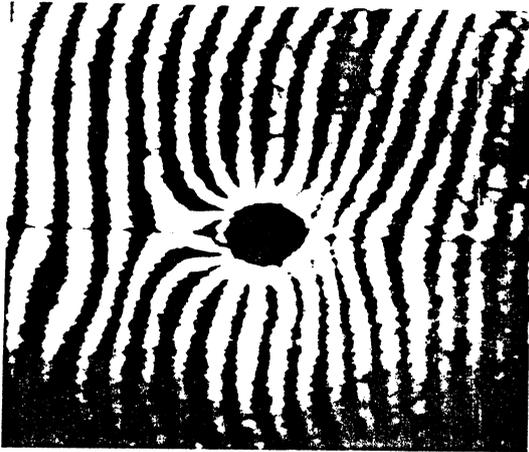
Процесс обработки состоял из следующих этапов: ввод интерферограмм в ЭВМ, предварительная обработка, выделение центров полос, коррекция и нумерация полос, определение полей деформаций.

Для ввода интерферограмм использовалось устройство на основе плоскостной электромеханической развертки [39], описанное в главе 3. Изображение квантовалось на 128 уровней, и в виде матрицы 256x256 точек записывалось в одну из зон внешнего ОЗУ. Информация, введенная в ЭВМ, одновременно отображалась на полутоновом дисплее. Для визуальной оценки качества оцифровки выводились графики по произвольным сечениям.

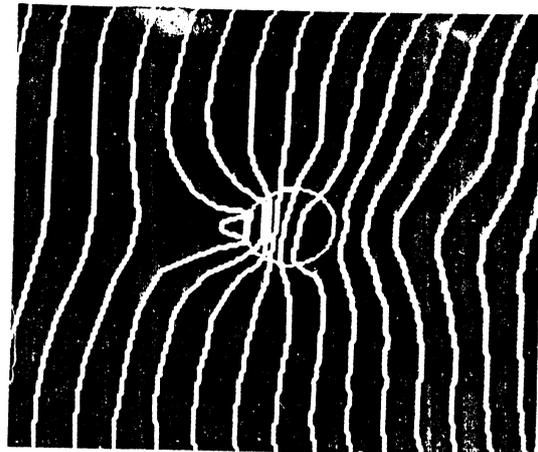
На рис. 5.1 а, в приведены фотографии интерферограмм, наблюдаемых в плоскости XOZ , после ввода в ЭВМ. Интерферограммы очищались от шумов с помощью рекуррентного цифрового фильтра [66, 67]. Согласование полосы пропускания фильтра с полосой полезного сигнала осуществлялось визуальной оценкой фильтруемого изображения.

По сглаженной интерферограмме определялись точки экстремумов. Прослеженные линии имели разрывы, ложные ответвления и соединения. В интерактивном режиме проводилось упорядочивание и нумерация полос. Средством редактирования являлся графический редактор, с помощью которого были исправлены картины середин интерференционных полос, пронумерованы полосы и продолжены линии в области отверстия

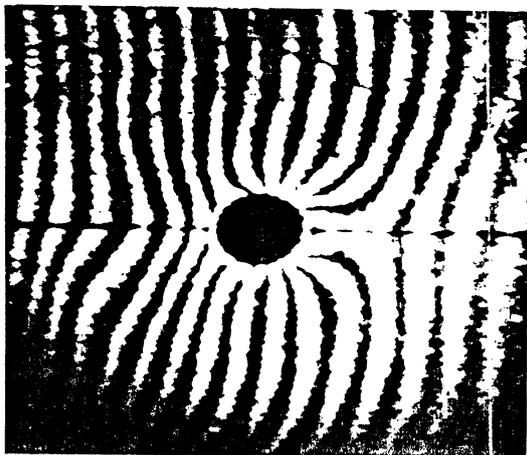
Выделение центров полос.



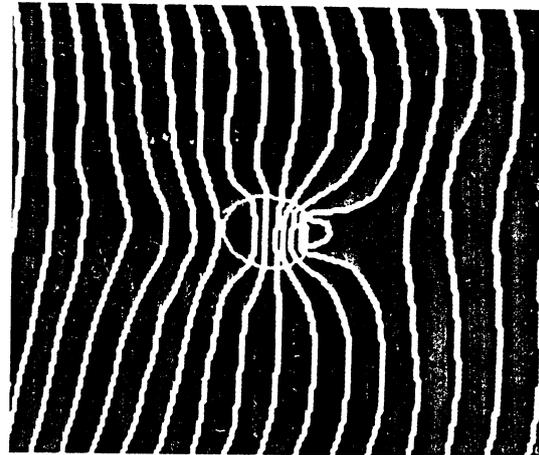
a



б



в



г

Рис. 5.1

на исследуемом образце для получения равномерной интерполяции. Кроме того, графический редактор применялся и для совмещения по реперным точкам двух интерферограмм, т.к. в принятом алгоритме расшифровки интерференционных картин для нахождения одной компоненты тензора деформаций используются два направления наблюдения, симметричные относительно нормали к поверхности образца. Выделенные центры полос показаны на рис. 5.1 б, г.

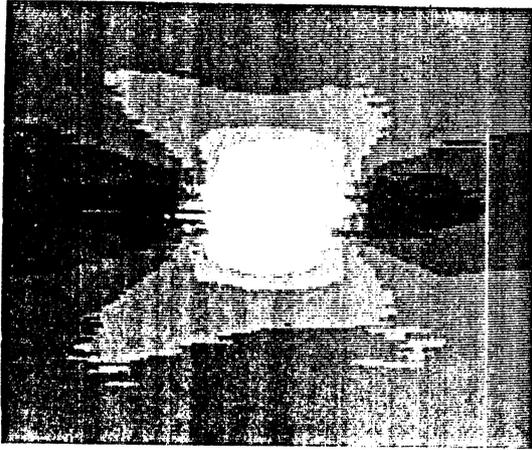
Относительные деформации ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy} определялись в соответствии с [42]. При этом использовались два подхода. Первый: вначале определялись компоненты вектора перемещения U и V (при аппроксимации полей перемещения используются кубические сплайны), а затем по соотношениям Коши вычислялись компоненты тензора деформаций. Второй подход: аппроксимация функции порядков полос осуществлялась с помощью упругой линии статически неопределимой балки переменной жесткости [43], затем определялись деформации, и интегрированием находились перемещения. Полученные обоими способами результаты оказались практически близкими. Из-за погрешностей в определении центров полос найденные деформации пришлось сгладить, воспользовавшись методом наименьших квадратов.

На рис. 5.2 а, б показаны деформации, полученные экспериментальным и расчетным путями, соответственно. Одинаковыми значениями яркости показаны зоны примерно одинаковых деформаций. На рис. 5.2 в, г показаны трехмерные графики полей деформаций. На рис. 5.3 показан график относительных деформаций $\epsilon_x / \epsilon_\infty$ (ϵ_∞ - деформация на удалении от отверстия) в опасном сечении образца ($\chi = 0$).

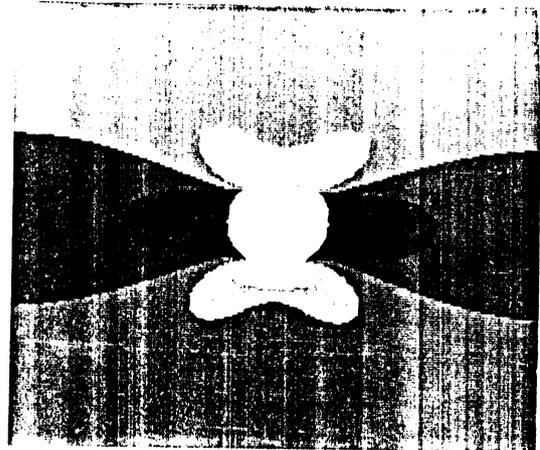
Приведенные результаты позволяют говорить о качественном совпадении экспериментального решения тестовой задачи и известного теоретического решения.

Использование информации лишь о выделенных центрах полос приводит к ошибкам при определении производных, используемых для оп -

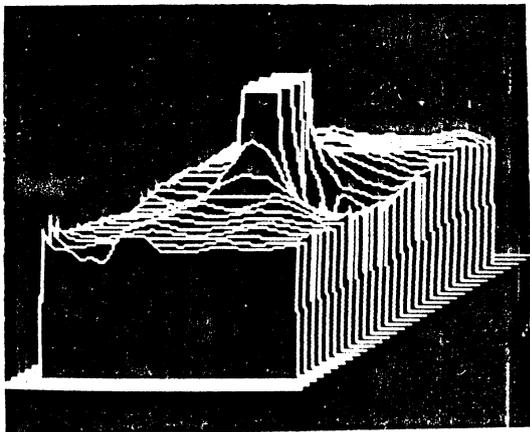
Поля деформаций, полученные экспериментальным
и расчетным путями.



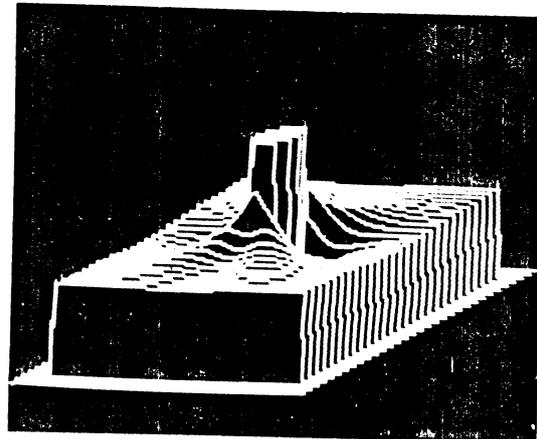
а



б



в



г

Рис. 5.2

Эпюры относительных деформаций в опасном сечении образца ($X=0$).

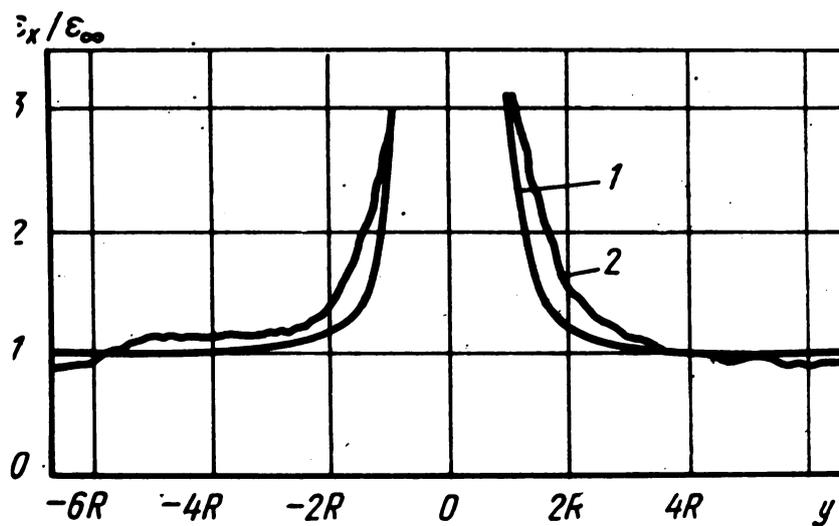


Рис. 5.3

ределения тензора деформаций. Максимальная погрешность в определении ε_x , ε_y возникает вблизи контура отверстия. Сопоставление соответствующих полей, вычисленных теоретически и найденных экспериментально, позволяет говорить о возможности определения напряженно-деформированного состояния образцов с допустимой для инженерных расчетов точностью [19].

5.2. Определение прогиба мембран интерференционными методами

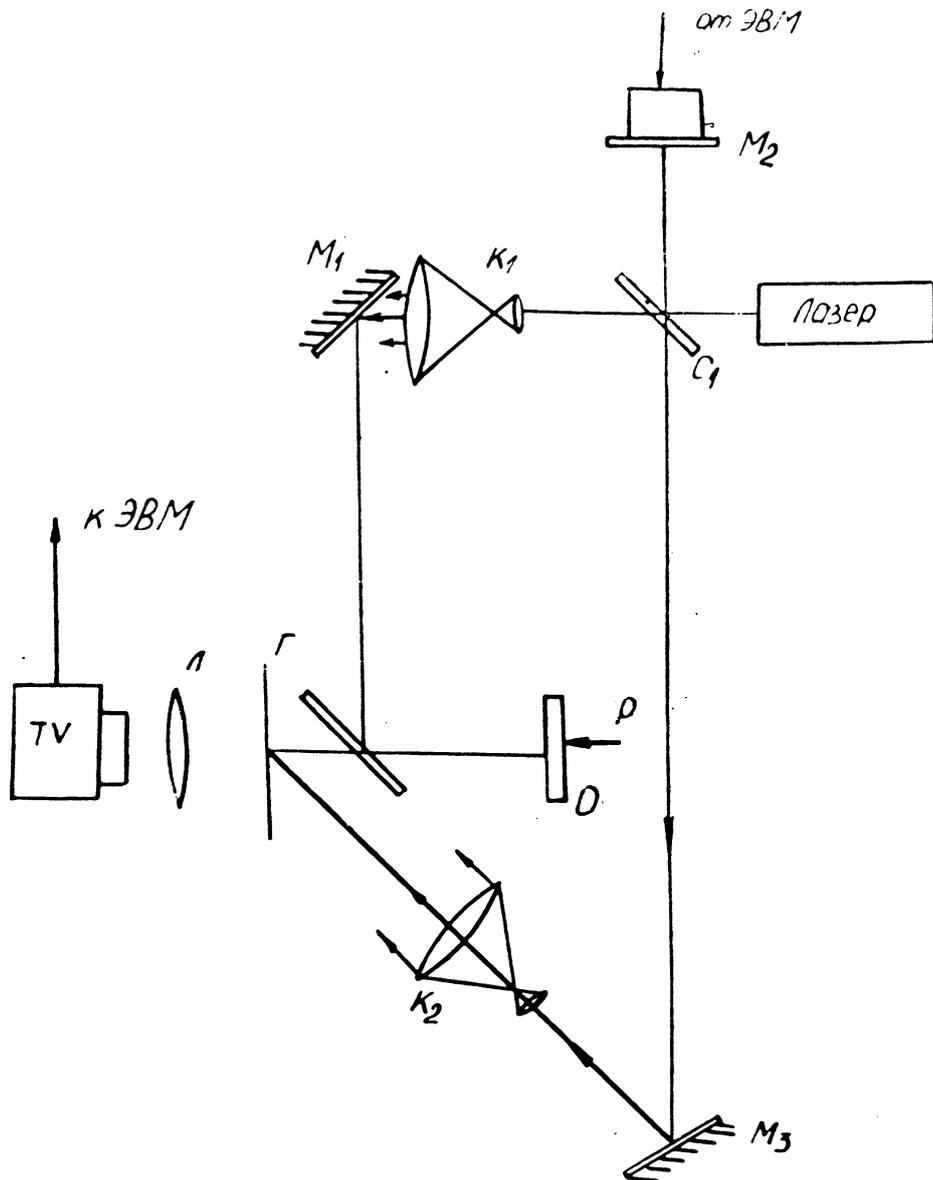
Рассмотрим возможности системы при измерении прогиба мембран. Экспериментально определялись поле прогиба мембраны, жестко закрепленной по краям и нагруженной в центре сосредоточенной силой, и поле прогиба полупроводниковых мембран в зависимости от приложенного к ним давления. Поля разности фаз, пропорциональные прогибам, находились методом управляемого фазового сдвига. Измерения проводились с помощью голографической интерферометрии реального времени и с помощью оптической интерферометрии.

В эксперименте с применением голографической интерферометрии [30, 33] использовалась мембрана, имеющая диаметр 42 мм и толщину 0,5 мм, изготовленная из материала ДІБТ. Объект освещался гелий-неоновым лазером ЛГ-38. Интерферограммы были получены с помощью интерферометра Майкельсона (рис. 5.4). В тракте опорного пучка интерферометра для внесения управляемого фазового сдвига помещалось зеркало, закрепленное на пьезокерамике. Устройство внесения сдвига фаз было предварительно откалибровано. Ошибка при сдвиге фаз не превышала 0,01 интерференционной полосы.

Фиксировалась голограмма нагруженного объекта на фотопластинке, которая после проявления устанавливалась на то же место.

После нагрузки мембраны отраженный волновой фронт от объекта интерферировал с волновым фронтом, восстановленным от голограммы.

Схема оптической установки для определения прогиба мембраны методом голографической интерферометрии реального времени



C_1, C_2 - светоделители; M_1, M_2, 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 объекта на мишени телевизионной камеры TV .

Рис. 5.4

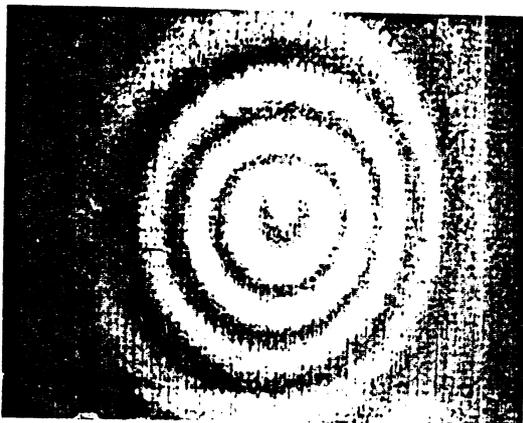
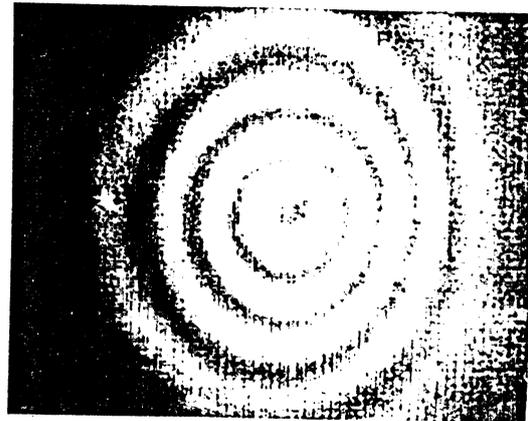
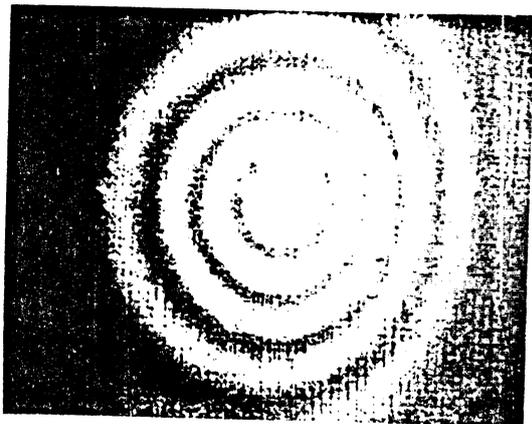
Для ввода интерферограмм использовалось устройство, выполненное на базе промышленной телевизионной установки, с оцифровкой 16 строк за время одного полукадра. Изображение квантовалось на 256 уровней, и в виде матрицы 256×256 точек записывалось в одну из зон ОЗУ. Перед вводом каждой интерферограммы вносился фазовый сдвиг. На рис. 5.5 а, б, в приведены фотографии интерферограмм, полученных методом реального времени в результате нагрузки мембраны. Интерферограммы получены со сдвигом фазы 0° , 120° , 240° . Расшифровка проводилась по алгоритму (1.35). Результирующее поле разности фаз, определенных с точностью до периода изменения, показано на рис. 5.5 г.

Полная фаза определялась методом развертки $[25, 34]$, с использованием двумерной структуры поля. Сначала определялись зоны, в которых фаза плавно менялась в пределах периода (рис. 5.6 а). На рис. 5.6 а показаны графики вдоль центрального сечения до удаления фазовой неоднозначности и после. На рис. 5.6 г - трехмерный график результирующего поля полных фазовых разностей.

Время обработки около 5 мин. Основное время затрачено на развертывание фазы. Во время эксперимента присутствовала значительная вибрация, что существенно сказалось на точности измерений. Погрешность определения поля фаз не превышает в данном случае 0,05 полосы. Однако процесс измерений полностью автоматический, что позволяет в реальном времени контролировать прогиб мембраны.

Одной из главных проблем в проектировании и производстве кремниевых интегральных тензопреобразователей является определение зависимости прогиба мембраны от приложенного давления. Расчетные методы описывают лишь "малые" прогибы, когда отклонение плоскости мембраны от нормального положения составляют величину порядка 0,1 толщины мембраны. Это граница линейной зависимости прогибов от прикладываемого давления. В нелинейной области данные экспериментов по определению прогибов полупроводниковых мембран крайне скудны и про-

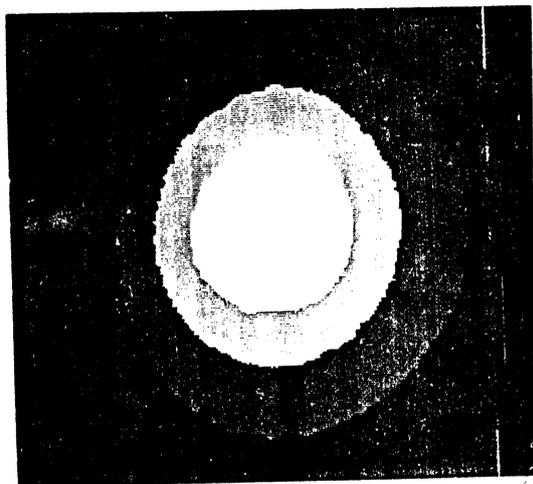
Расшифровка интерферограмм с помощью трехточечного алгоритма.



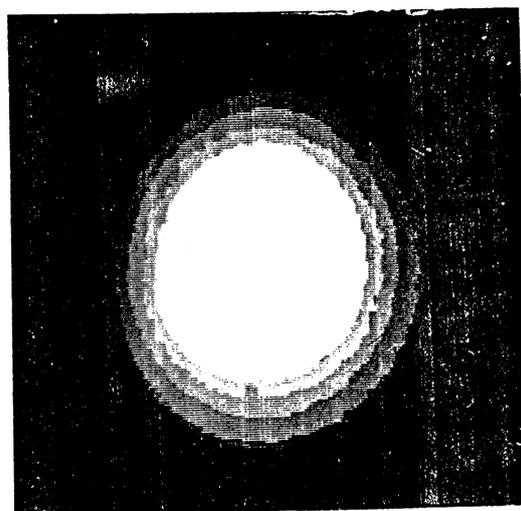
а, б, в - интерферограммы с фазовым сдвигом 0° , 120° , 240° ; г - поле разностей фаз.

Рис. 5.5.

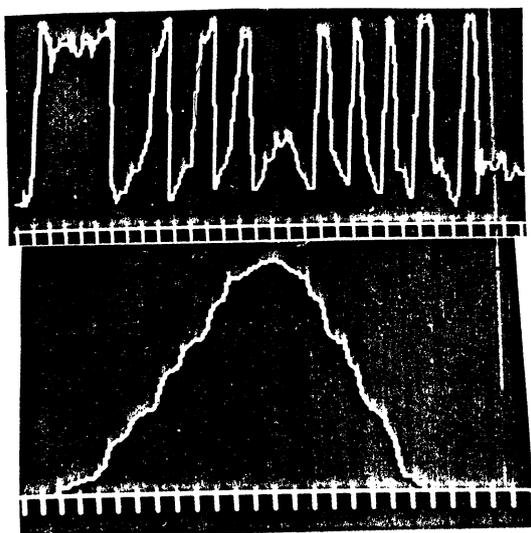
Определение прогиба мембраны.



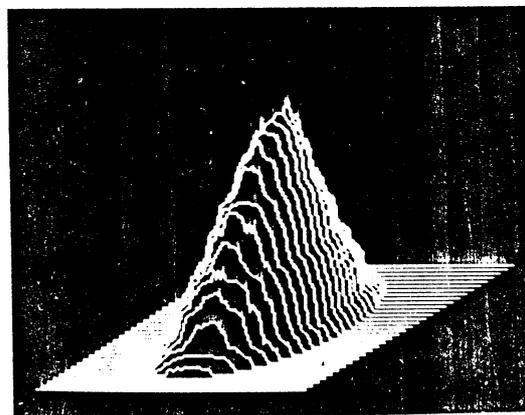
а



б



в



г

Рис. 5.6

тиворечивы. Кроме того, в рамках существующих экспериментальных методов происходит регистрация прогиба только в центре мембраны, поле прогибов определить невозможно. Подсчет механических напряжений в связи с этим сопряжен с трудностями.

С целью определения поля прогибов кремниевых мембран были проведены исследования зависимостей полей прогибов в широком диапазоне давлений.

Для определения формы прогибов мембраны использовалась система с управляемым фазовым сдвигом. Оптическая схема представляет собой интерферометр Тваймана-Грина, в которой опорное зеркало закреплено на пьезокерамике, управляемой от ЭВМ. Общий вид оптической установки показан на рис. 5.7. Исследовались кремниевые мембраны размерами 5x5 мм, толщиной около 30 мкм – плоские и профилированные, с жестким центром, а также плоские мембраны размером 1x1 мм (рис. 5.8). Для обеспечения отражения на мембраны напылялся слой алюминия.

Результаты экспериментов показали, что линейность зависимости прогиба соблюдается до давлений порядка 100 Па, а при дальнейшем увеличении давления зависимость становится сублинейной. 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 мембраны) расположения тензорезисторов. Исследования мембран 1x1 мм толщиной в пределах 5–20 мкм показали их пригодность для работы в расширенном интервале давлений.

5.3. Определение плоскостности поверхности оптических элементов интерференционными методами

Измерение плоскостности поверхностей проводилось с помощью модифицированного интерферометра ИТ-200 [46], оптическая схема которого представляет собой интерферометр Физо (рис. 5.9). Коллимиро-

Общий вид оптической установки для измерения прогиба мембран.

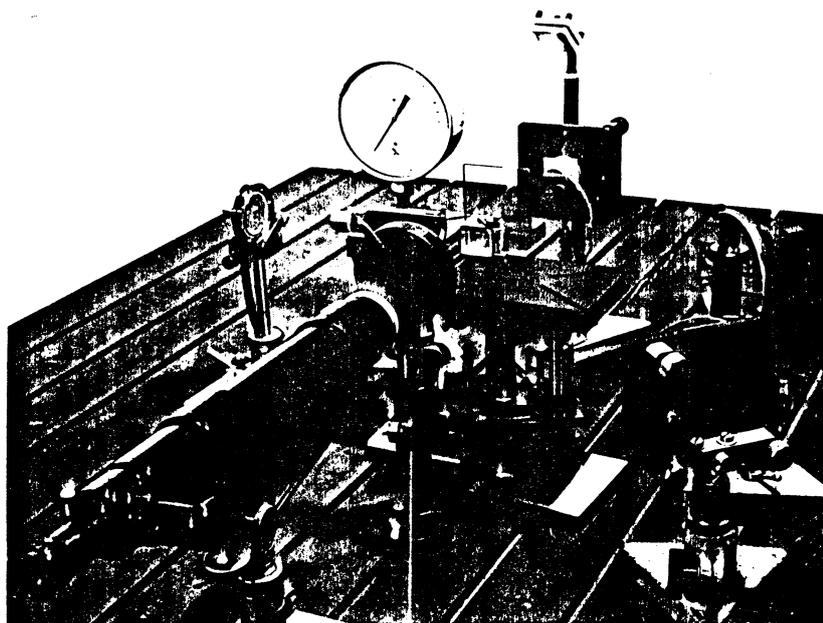


Рис. 5.7

Исследуемые кремниевые мембраны.

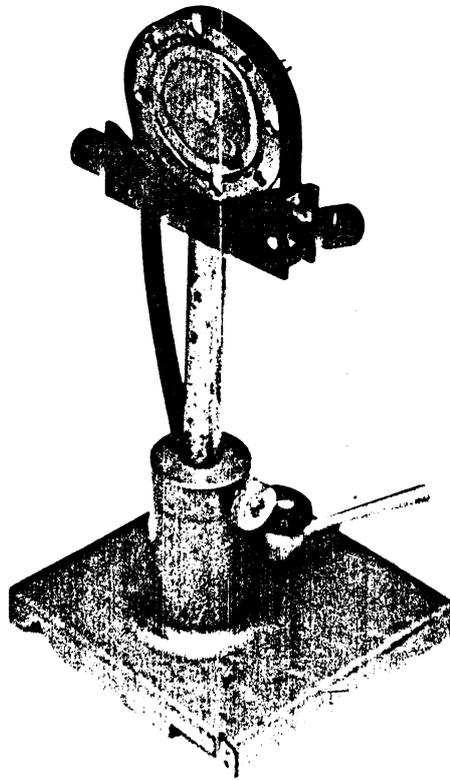
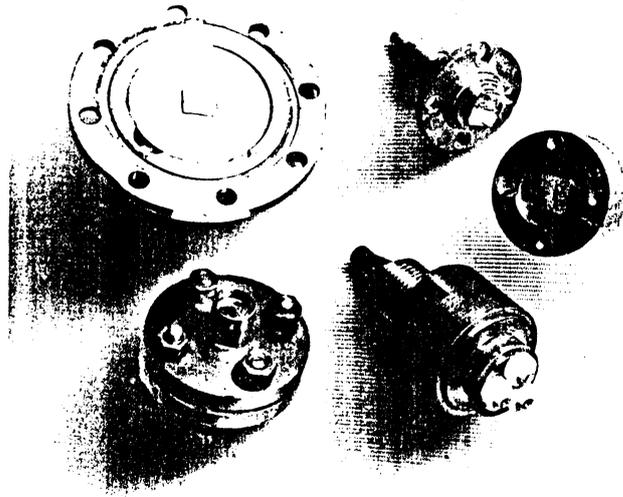


Рис. 5.8

Схематичная схема интерферометра ИТ-200

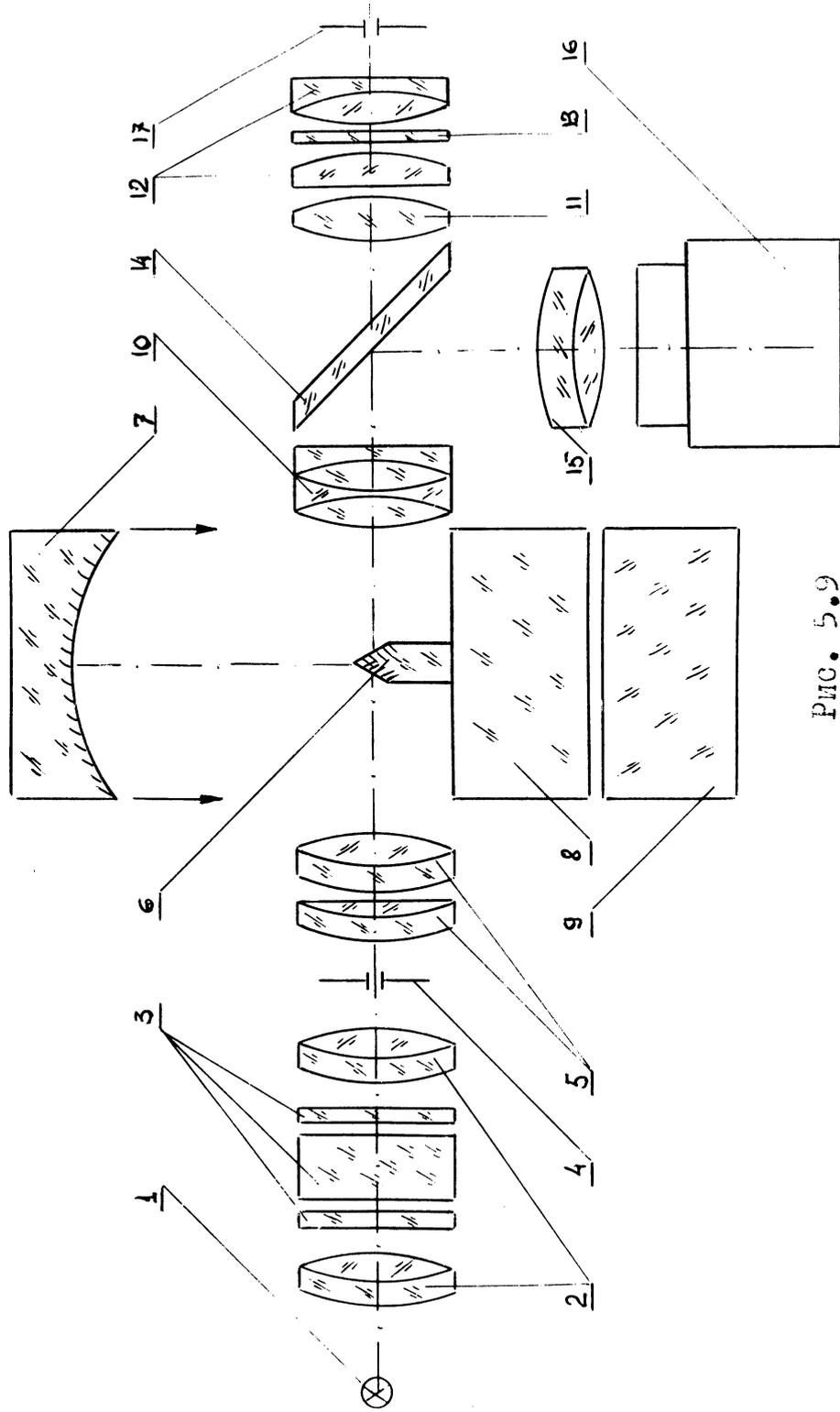


Рис. 5.9

ванный волновой фронт, отраженный от эталонной поверхности образцовой пластины 8 и проверяемой поверхности детали 9, образует интерференционную картину. В качестве монохроматического источника света I применяется ртутная лампа СМР-I ($\lambda = 0,546$ мкм - длина волны зеленой линии ртути). Интерференционная картина рассматривается в зрительную трубу. С помощью переключаемого зеркала I4 интерференционная картина, локализованная на эталонной поверхности образцовой пластины, может быть зарегистрирована на фотопленку I6 с помощью фотокамеры. Наружный корпус интерферометра представляет собой массивную силуминовую отливку, внутри которой крепится внутренний корпус. Амортизация внутреннего корпуса осуществляется посредством теннисных мячей, расположенных по окружности в верхней части между наружным и внутренними корпусами, и четырех пружин, расположенных в средней части наружного корпуса.

Для получения устойчивой интерференционной картины и устранения влияния деформаций, возникающих при работе, предметный стол и образцовая пластина устанавливаются в жестком внутреннем корпусе.

Предметный стол может перемещаться в трех направлениях. Наклон предметного стола возможен в горизонтальной плоскости вокруг двух взаимно перпендикулярных осей.

В случаях идеальной плоскостности проверяемой поверхности (при правильной юстировке интерферометра) в поле зрения интерферометра будут видны прямые, равные по ширине полосы.

Если проверяемая поверхность изготовлена с отступлениями от идеальной плоскостности, могут присутствовать самые разнообразные изгибы и изъёмы полос.

Интерферометр может работать в помещении с перепадом температуры в течение суток не более $1,5^{\circ} - 2^{\circ}$ С и при отсутствии потоков воздуха, а проверяемая деталь перед контролем должна быть выдержана на предметном столике интерферометра. Время выдерживания зависит от толщины и массы детали. Детали диаметром до 150 мм

должны выдерживаться в течение 30 минут, диаметром свыше 150 мм - до одного часа.

В ИТ-200 измерение отступления от плоскостности возможно тремя способами: оценкой на глаз, с помощью окулярного микрометра и по фотографии интерференционной картины. Результатом измерений является общая ошибка:

$$N = \frac{H}{l} \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (5.3)$$

где $H = x - y$ - стрелка прогиба; x - отсчет середины интерференционной полосы по краям поля зрения; y - отсчет середины изгиба интерференционной полосы; l - интервал между полосами, разность между отсчетами середин изгибов соседних интерференционных полос. Для определения местной ошибки измеряются интервал l_1 и стрелка прогиба H_1 в месте дефекта полосы:

$$\Delta N = \frac{H_1}{l_1} \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (5.4)$$

При таких измерениях возможна лишь грубая оценка качества проверяемой поверхности. В настоящее время указанная методика не удовлетворяет требований, предъявляемым к контролируемым изделиям. Для автоматизации процесса обработки измеренных данных и определения количественных результатов по всему полю проверяемой поверхности была проведена модификация интерферометра. Вместо фотокамеры в интерферометре ИТ-200 было установлено устройство ввода на основе телевизионной камеры КТ-М.

В состав системы входят также привод полутонного монитора, привод трехцветного монитора, внешнее оперативное запоминающее устройство. В качестве обрабатывающей использовалась микропроцессорная система <MEGA-60> .

Программа обработки аналогична *FRIC* , описанной в главе 3. После выделения середин полос информация поступала на вход программы *FR I* , которая выдавала контурную карту проверяемой поверхно -

сти, статические характеристики, графики сечений в различных направлениях; информация в точках между серединами полос аппроксимировалась с помощью полиномов Цернике.

Таким образом, без изменения схемы интерферометра, с помощью простой замены фоторегистрирующего устройства на устройство ввода оптической информации, удалось автоматизировать обработку интерферограмм при контроле плоскостности проверяемых поверхностей.

Система используется при контроле формы оптических изделий на НПО "Точприбор".

5.4. Определение рельефа поверхности пробных стекол

При изготовлении оптических деталей для контроля поверхностей применяются пробные стекла. Пробные стекла - это стеклянные пластины, одна из поверхностей которых является образцовой. Эталоны оптических плоскостей изготавливают из стекла, плавленого кварца или материалов с нулевым коэффициентом расширения. Наиболее часто пробные стекла применяют 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. Применение метода пробных стекол обеспечивает точность контроля $\lambda/20$, когда угол освещения в интерферометре не превышает 0,2 рад, т.е. можно использовать протяженные источники монохроматического света без коллимирующих линз. Могут применяться натриевые, ртутные, гелиевые лампы. Контроль с помощью пробных стекол широко используется в производственных условиях. Это вызвано простотой и достаточной эффективностью метода при изготовлении плоских и сферических поверхностей. Однако при соприкосновении с поверхностью контролируемого изделия пробные стекла подвергаются механическому воздействию -

ям 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 измерения с достаточно высокой точностью.

Для контроля формы поверхностей оптических деталей в реальном времени использовалась система с управляемым фазовым сдвигом. Оптическая схема представляет собой интерферометр Тваймана-Грина, в котором опорное зеркало закреплено на пьезокерамике, управляемой от ЭВМ.

Общий вид установки показан на рис. 5.10, оптическая схема интерферометра - на рис. 5.11. Луч от лазера I через систему поворотных зеркал 3 поступает в телескопическую систему 4, служащую для расширения пучка и формирования плоского волнового 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 II, преобразуется в расходящийся пучок и отражается от контролируемой детали I2, а после вторичного прохождения через объектив II преобразуется в плоский рабочий пучок. Интерференционная картина переносится в плоскость регистрирующей системы устройства ввода оптических изображений I6. Применяемое устройство ввода выполнено на основе серийной телевизионной камеры.

С помощью эталонного зеркала 9, закрепленного на пьезокерамике I0, вносится сдвиг фаз 0° , 90° , 180° , 270° . Поле разности фаз, определенных с точностью до периода изменения, определяется расшифровкой четырех интерферограмм по алгоритму (I.40). Имеется возможность проводить усреднение по нескольким сериям измерений.

Рельеф поверхности пропорционален полю полных фазовых разностей. Полная фаза может восстанавливаться разверткой по полю фаз, определенных с точностью до периода для простых форм, при динамиче-

Определение формы поверхности
пробных стекол.

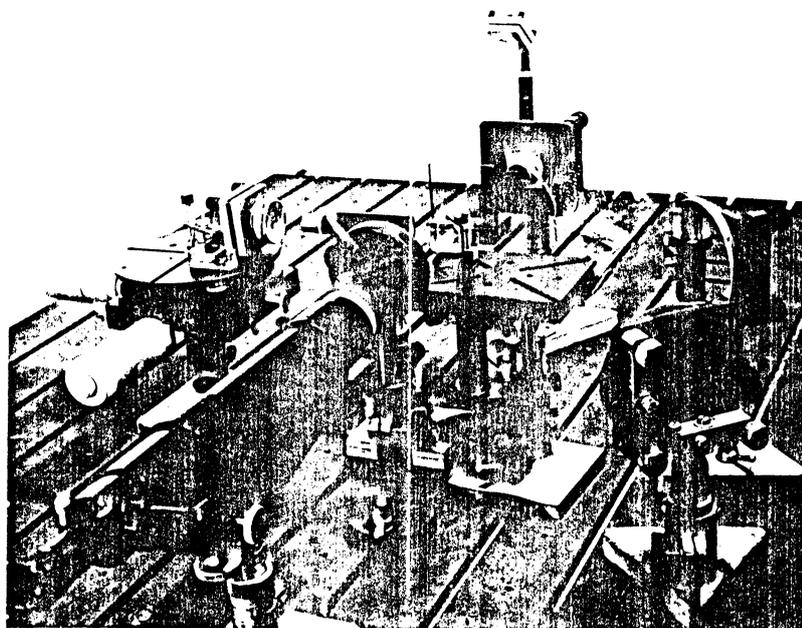
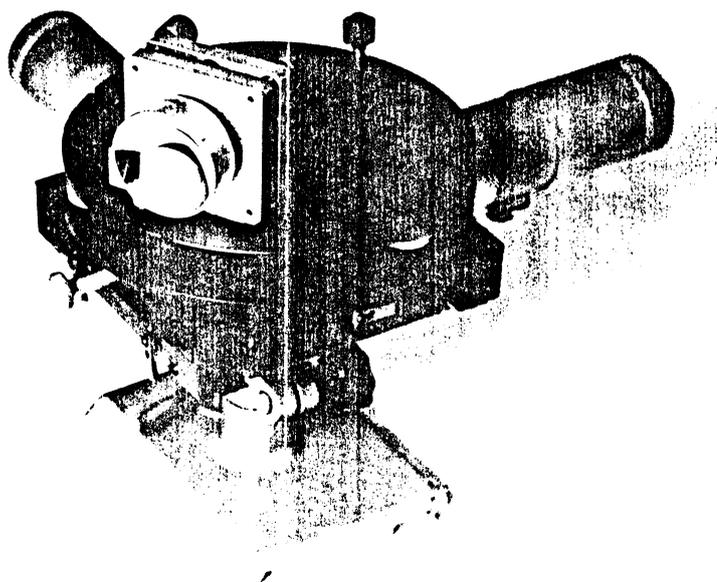


Рис. 5.10

Схема интерферометра для контроля высокоточных оптических поверхностей.

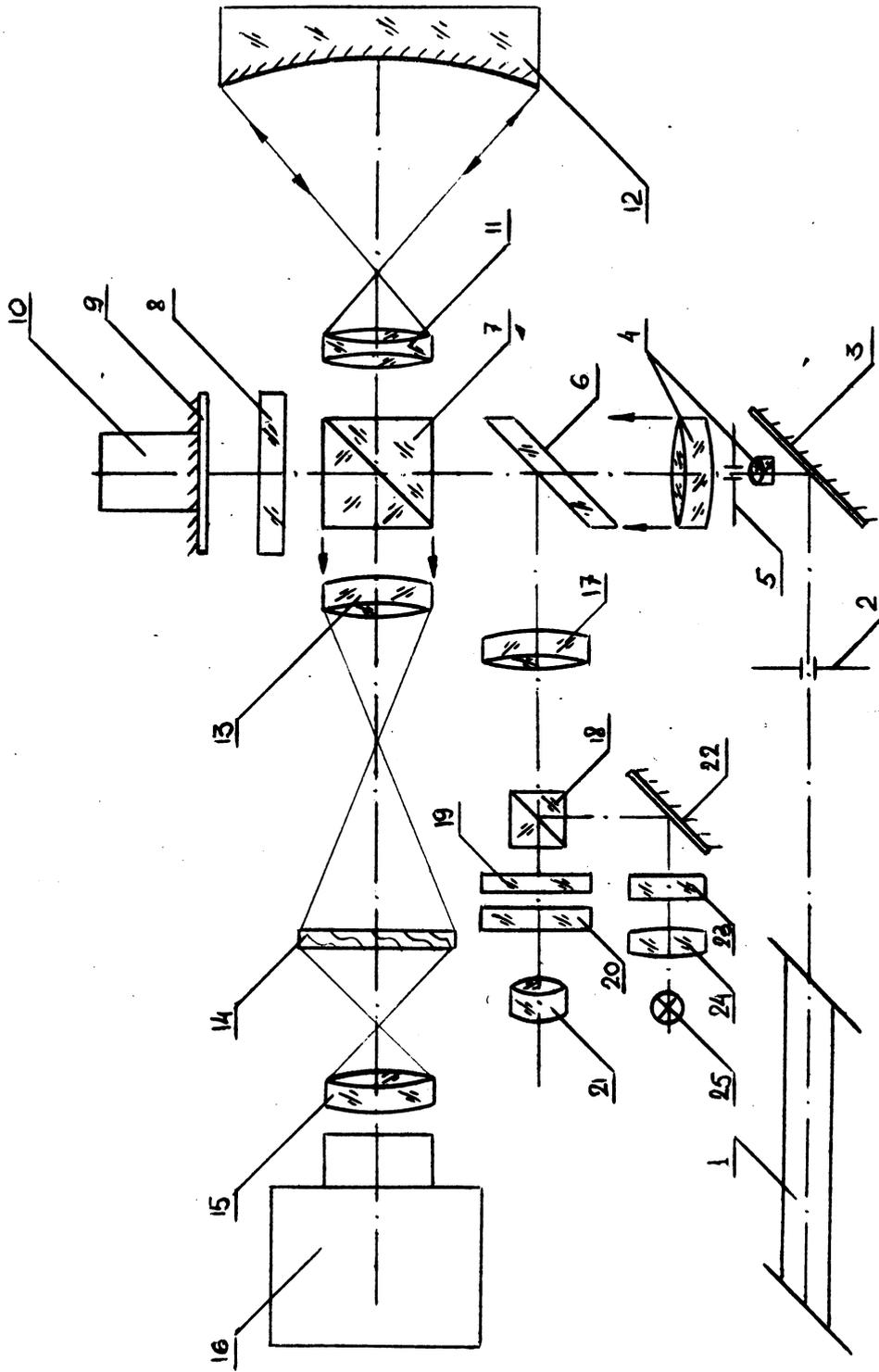


Рис. 5.11

ском диапазоне в несколько длин волн. При сложных формах рельефа или при диапазоне, превышающем возможности метода развертки, проводятся две серии измерений при разных значениях длины волны. В этом случае необходим лазер с перестраиваемой длиной волны или два лазера с разными длинами волн. Полная фаза восстанавливается локальным способом устранения фазовой неоднозначности, описанным в главе 2.

На рис. 5.12 показаны четыре интерферограммы со сдвигом фазы 90° . На рис. 5.13 показано восстановление рельефа поверхности. Определялась форма поверхности пробных стекол с диаметром до 150 мм. Время полной расшифровки около 1 мин.

5.5. В ы в о д ы

1. Разработанная интерференционная измерительная система может использоваться для расшифровки интерферограмм, полученных на различных типах оптических и голографических интерферометров.

2. При использовании готовых схем оптических установок может использоваться расшифровка интерферограмм методом выделения центров полос. В этом случае используется интерактивный режим обработки. Точность определения полей фаз не превышает 0,1 полосы.

3. Использование динамических методов расшифровки требует модификации схем оптических установок, что в некоторых случаях не представляется возможным. Однако процесс измерения становится полностью автоматическим, предельно достижимая точность может превышать 0,02 полосы.

4. Использование системы в производственных условиях показало необходимость оптимизации аппаратных и программных средств при контроле конкретных видов изделий. Однако уже реализованный вариант показал экономическую эффективность при определении форм рельефа высокоточных оптических поверхностей.

Интерференграммы со сдвигом фазы 0° , 90° , 180° , 270°

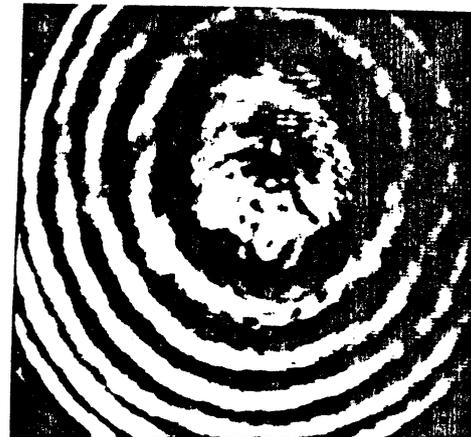
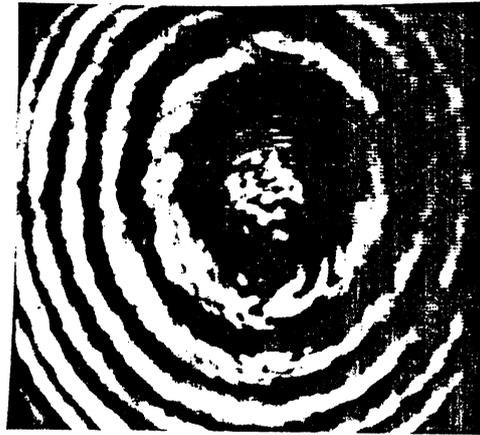
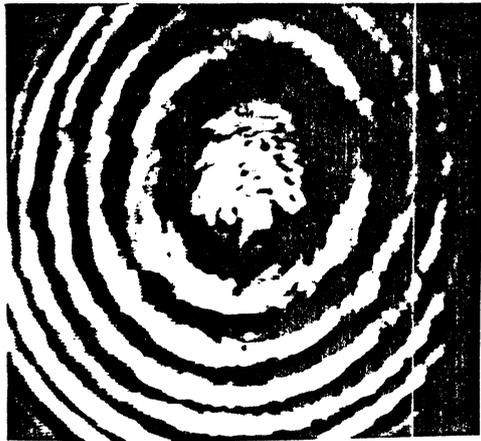
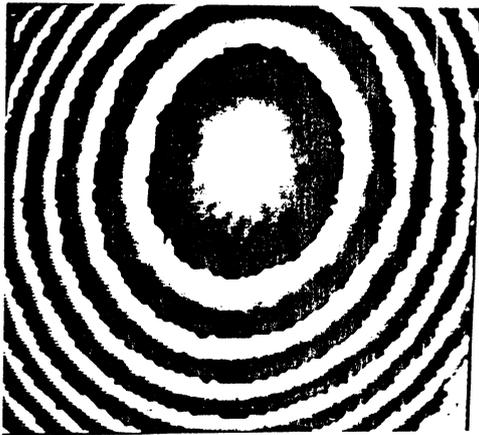
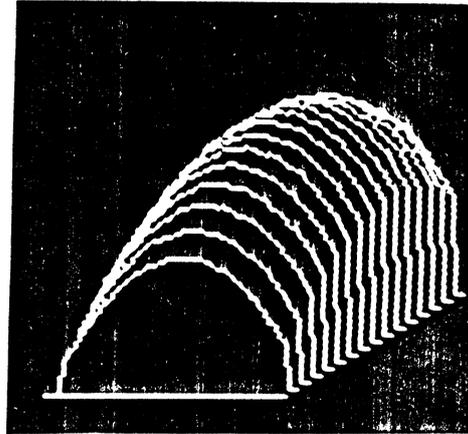


Рис. 5.12

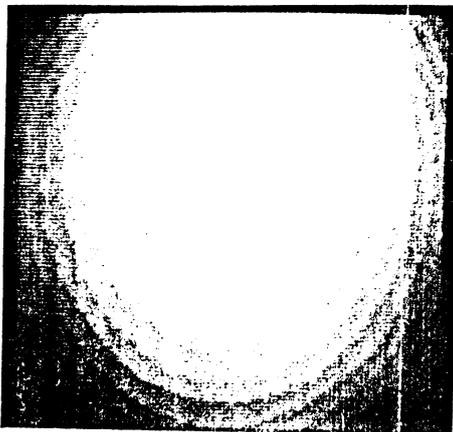
Определение рельефа поверхности высоко-
точных оптических изделий



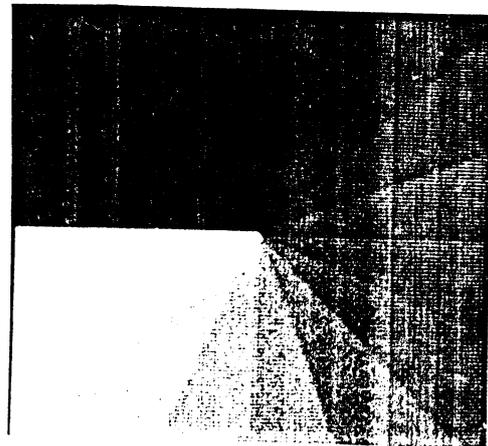
а



б



в



г

- а - поле разности фаз;
- в - поле полных разностей фаз;
- б - график поверхности изделия;
- г - распределение $i\theta\varphi$.

Рис. 5.13

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целями исследования, в диссертационной работе получены следующие результаты:

1. В результате анализа существующих методов и разработанных на их основе автоматизированных систем для расшифровки интерферограмм показано, что для определения полей разности фаз оптических волновых фронтов наиболее эффективными являются методы, основанные на интерференционных принципах. Широко используемые системы, основанные на выделении средин полос без участия оператора, не позволяют устранить неоднозначность определения фазы, обладают невысокой точностью. Системы с управляемым сдвигом обеспечивают высокую точность при определении разности фаз в пределах периода, однако существующие алгоритмы восстановления полной фазы используют информацию о пространственной структуре и поэтому накладывают дополнительные ограничения на исследуемые волновые фронты, имеют небольшой динамический диапазон.

2. Предложен локальный способ удаления фазовой неоднозначности, позволяющий значительно расширить динамический диапазон измерений. Способ основан на решении системы сравнений целых чисел и способен по нескольким сериям измерений, произведенных при различных ценах интерференционных полос, определять полную фазу в каждой точке поля. Результирующий алгоритм прост, легко автоматизируется.

3. Разработана интерференционная измерительная система, включающая интерферометр с устройством управления фазовым сдвигом, устройство ввода оптических изображений, микроЭВМ с набором периферийных устройств, специализированные устройства отображения полутонной информации и программное обеспечение.

4. Разработано программное обеспечение автоматизированных си-

стем для расшифровки интерферограмм, позволяющее в зависимости от целевого назначения эксперимента работать в трех режимах: без внесения фазового сдвига; с внесением фазового сдвига и удалением фазовой неоднозначности методом развертки фаз; с внесением фазового сдвига и удалением фазовой неоднозначности локальным способом, основанным на решении системы сравнений целых чисел. Комплекс программ обеспечивает функционирование системы в качестве автономного рабочего места и обеспечивает доступ к архивам центральной ЭВМ по линии связи.

5. Проведен анализ источников погрешностей, в результате которого установлено, что основными источниками погрешностей являются погрешности установки сдвига фазы и погрешности при измерении интенсивности. При некоррелированной случайной ошибке установки фазы для снижения погрешности определения фазы необходимо применять алгоритмы расшифровки с большим числом сдвигов или производить усреднение по нескольким сериям наблюдений. При случайной ошибке установки фазы со слабой нелинейностью - усреднение фаз, определенных по нескольким сериям наблюдений, сдвинутым на $\pi/2$, четырехточечными алгоритмами. Для компенсации ошибок, вызванных паразитными волновыми фронтами, необходимо произвести две серии измерений со сдвигом. Исследовано влияние погрешностей, вызванных конечным числом уровней квантования при измерении интенсивности. Показано, что для определения фазы с погрешностью $1-2\%$ достаточно шести-восемью разрядов уровней квантования. Для компенсации погрешности установки фазового сдвига разработана методика калибровки фазовых модуляторов.

Предложенные способы снижения уровней погрешности позволяют определять разность фаз с погрешностью $1-2\%$ от цены полосы.

6. Эффективность системы подтверждена при исследовании напряженно-деформированного состояния объектов и измерений формы высо-

кочных поверхностей. Апробация системы при измерении параметров изделий оптического приборостроения позволила сформулировать конкретные рекомендации для построения специализированных измерительных систем для автоматического контроля формы поверхности пробных стекол с диаметром до 150 мм при дискретизации исследуемого поля 256x256 элементов менее, чем за 1 мин. Система внедрена на ПО "Новосибирский приборостроительный завод".

Список использованной литературы

1. Агурок И.П. Исследование возможностей автоматизированной обработки интерферограмм в системе с ПЭС-матрицей путем моделирования на ЭВМ // ОМП. - 1983. - № 11. - С. 14-17.
2. Александров Е.Б., Бонч-Бруевич А.М. Исследование поверхностных деформаций с помощью голограммной техники // ЖТФ. - 1967. - Т. 37. - Вып. 2. - С. 360-367.
3. Аблеков В.К., Зубков П.И., Фролов А.В. Оптическая и опто-электронная обработка информации. - М.: Машиностроение, 1976. - 256 с.
4. Авдеев В.С., Васьков С.Т., Мамонтов Г.М. и др. "КАРАТ" - устройство вывода графической и буквенно-цифровой информации из ЭВМ на микрофильм // Автометрия. - 1976. - № 1.
5. Андреев В.П., Белов Д.А., Вайнштейн Г.Г., Москвина Е.А. Эксперименты с машинным зрением. - М.: Наука, 1978. - 128 с.
6. А.С. 748125 (СССР). Интерференционный способ измерения длины интерферометров / Л.Я. Густырь, В.Н. Пучков, Ю.Ф. Томашевский. - Опубл. в Б.И., 1980. - № 26.
7. Бакут П.А., Троицкий И.Н., Демин А.А., Сафронов А.И. Современное состояние фазовой проблемы в оптике // Зарубежная радиоэлектроника. - 1978. - № 11. - С. 3-40.
8. Буйнов В.П., Воронов В.М., Кравченко Ю.Л. и др. Устройство ввода и обработки графической информации // Обработка изображений и дистанционные исследования. Ч.2. Тез. докладов Всесоюзной конференции. - Новосибирск, 1984. - С. 11-12.
9. Бурый Л.И., Золотухин Ю.Н., Иванов В.А. и др. Автоматизированный комплекс обработки изображений // Автометрия. - 1980. - № 3. - С. 41-48.
10. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений /

Т.С. Хуанг, Дж.-О. Эндунд, Г. Дж. Нусбаумер и др. : Под ред. Т.С. Хуанга: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1984. - 224 с.

11. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений / М.: Радио и связь, 1986. - 304 с.

12. Василенко Г.И., Цибульский Л.М. Голографические распознающие устройства. - М.: Радио и связь, 1985. - 312 с.

13. Васьков С.Т., Выдрин Л.В., Касперович А.Н. и др. Прецизионная система ввода-вывода изображений для ЭВМ // Автометрия. - 1977. - № 2. - С. 86-93.

14. Вест Ч. Голографическая интерферометрия // Пер. с англ. - М.: Мир, 1982. - 497 с.

15. Виноградов И.М. Основы теории чисел. - М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва Наука, 1972. - 168 с.

16. Витриченко Э.А. Методы исследования астрономической оптики. - М.: Наука, 1980. - 152 с.

17. Виттих В.А., Сергеев В.В., Соффер В.А. Обработка изображений в автоматизированных системах научных исследований. - М.: Наука, 1982. - 214 с.

18. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. - 336 с.

19. Герасимов С.И. Исследование плоских упругопластичных задач с помощью накладных интерферометров // Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. - Новосибирск, 1984. - 280 с.

20. 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.

21. Голографические измерительные системы. Вып. 1 / Под ред. А.Г. Козачка. - Новосибирск: НЭТИ, 1976.

22. Голографические измерительные системы. Вып. 2 / Под ред. А.Г. Козачка. - Новосибирск: НЭТИ, 1978. - 160 с.

23. Голографические измерительные системы. Вып. 3 / Под ред. А.Г. Козачка. - Новосибирск: НЭТИ, 1980. - 126 с.
24. Голографические неразрушающие исследования / Под ред. Р.К. Эрфа : Пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1979. - 448 с.
25. Голография. Методы и аппаратура / Под ред. В.М. Гинзбург, В.М. Степанова. - М.: Сов. радио, 1974. - 376 с.
26. 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: НЭТИ, 1980. - С. 93-100.
27. 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.
29. Гужов В.И., Козачок А.Г., Жилкин В.А., Герасимов С.И. Автоматизация обработки оптической информации, получаемой с использованием голографических интерферометров // Тез. докладов пятой Всесоюзной конф. по голографии. Ч. 2. - Рига, 1985. - С. 321-322.
28. Гужов В.И., Дружинин А.И., Козачок А.Г. и др. Некоторые вопросы использования мини- и микроЭВМ в системах автоматизации обработки когерентно-оптической информации // Автоматизация научных исследований. Материалы 16 Всесоюзной школы по автоматизации научных исследований. - Горький, 1982. - С. 43-46.
30. Гужов В.И., Козачок А.Г., Лопарев Е.Г. и др. Голографическая измерительная система для определения поля разности фаз методом контролируемого фазового сдвига // Автометрия. - 1986, № 2. - С. 116-118.
31. 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. Тез. семинара. - Новосибирск, 1985. - С. 142-142.

32. Гужов В.И., Ким В.Ф., Родионов В.А. Цифровое моделирование оптических систем для фазометрии // Системы автоматизации обработки оптической информации. - Новосибирск: НЭТИ, 1984. - С. 112-121.

33. Гужов В.И., Тимшин А.В., Цигуткин В.И. Специфика цифровой обработки голографических интерферограмм в системах с управляемым фазовым сдвигом // Автоматизация научных исследований. Тез. докладов 19 Всесоюзной школы. - Новосибирск: ИАЭ СОАН СССР, 1985. - С. 169-169.

34. Гужов В.И., Тимшин А.В. Устранение фазовой неопределенности при расшифровке голографических интерферограмм // Интерференционно-оптические методы механики твердого тела и механики горных пород. Тез. семинара. - Новосибирск, 1985. - С. 141-141.

35. Гурьев Л.П., Гужов В.И., Де С.Т. и др. Универсальная измерительно-вычислительная система для обработки голографических изображений // Материалы 6 Всесоюзной конференции "Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ". - Новосибирск: ИАЭ СОАН СССР, 1981. - С. 122-123.

36. Гурьев Л.П., Кунов В.М., Нечаев В.Г. Устройство ввода голографических интерферограмм в ЭВМ // Голографические измерительные системы. Вып. 1. - Новосибирск: НЭТИ, 1978. - С. 107-114.

37. 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.: ЛДНТП, 1975. - С. 90-91.

38. Де С.Т., Козачок А.Г., Логинов А.В. и др. Исследование возможностей создания лазерной установки для записи оптической информации. Отчет по НИР А-80-75, 74054034, 1976. - 75 с.

39. Де С.Т., Козачок А.Г., Логинова Н.А., Натальченко В.В. Измерительная система для исследования статистических характеристик яркости изображения // Голографические измерительные системы. Вып.

3. - Новосибирск: НЭТИ, 1980. - С. 37-50.

40. Де С.Т., Козачок А.Г., Логинов А.В., Солодкин Ю.Н. Голографический интерферометр с минимальной погрешностью измерений смещения и деформации // Голографические измерительные системы. Вып. 2. - Новосибирск: НЭТИ, 1978. - С. 30-50.

41. Де С.Т., Козачок А.Г., Логинов А.В., Солодкин Ю.Н. Голографическая система для получения, обработки и расшифровки интерферограмм // Квантовая электроника. - 1977. - Т. 4. - № 1. - С. 103-107.

42. Жилкин В.А., Герасимов С.И. О возможности изучения деформированного состояния изделий с помощью накладного интерферометра // Журнал технической физики. - 1982. - Т. 52. - № 10. - С. 2079-2085.

43. Жилкин В.А. Заводская лаборатория. - 1982. - № 10. - С. 64-67.

44. Захарьевский А.Н. Интерферометры / Под ред. С.И. Фрейберга. - М.: Оборонгиз, 1952. - 296 с.

45. Заявка на изобретение 4087285/24-28(110851) СССР. Способ определения разности фаз / В.И. Гужов, Ю.Н. Солодкин. - Решение о выдаче А.С. от 29.01.87.

46. Интерферометры ИТ-200, ИТ-200А, ИТ200В / Техническое описание и инструкция по эксплуатации. - Л.: ЛОМО. - 17 с.

47. Кавалеров Г.И., Мандельштам С.М. Введение в информационную теорию измерений. - М.: Энергия, 1974. - 376 с.

48. Ким В.Ф., Козачок А.Г., Логинов А.В., Солодкин Ю.Н. Анализ пространственных шумов изображений диффузных объектов в когерентном свете // Голографические измерительные системы. Вып. 3. - Новосибирск: НЭТИ, 1980. - С. 3-36.

49. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. Получисленные алгоритмы. Т. 2 / Пер. с англ. - М.: Мир, 1977. - 726 с.

50. Козачок А.Г. Проблемы построения голографических измерительных систем // Материалы Всесоюзной конференции "ИИС-75". - Ки -

шинев, 1975. - С. 46-51.

51. Козачок А.Г. Проблемы обработки информации в голографических измерительно-вычислительных комплексах // Материалы Всесоюзной конференции по измерительным информационным системам. - Львов, 1981. - С. 213-215.

52. Козачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике. - М.: Машиностроение, 1984. - 176 с.

53. Кольер Р. Дж., Беркхард С.Б., Лин Л.Х. Оптическая голография. - М.: Мир, 1973. - 688 с.

54. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1976. - 296 с.

55. Кульков Н.В., Никульцев В.С., Стубарев В.М. Интерактивная система обработки данных // Системы автоматизации обработки оптической информации. Межвузовский сборник трудов. - Новосибирск, 1984. - С. 85-93.

56. Малеев Н.М., Павликов А.И. Стабилизация мощности ионного ОКГ // Голографические измерительные системы. Вып. 2. - Новосибирск: НЭТИ, 1978. - С. 100-106.

57. Оптическая голография / Под ред. Г. Колфилда: Пер. с англ. - М.: Мир, 1982. - Т. 1, Т. 2. - 732 с.

58. Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары: Пер. с англ.: Под ред. А.Н. Соснова. - М.: Машиностроение, 1985. - 400 с.

59. Ореб, Браун, Харихарен. Система с микроЭВМ для сбора и обработки цифровой информации // Приборы для научных исследований. - 1982. - № 5. - С. 153-155.

60. Островский Ю.И. Голография и ее применение. - Л.: Наука, 1973. - 180 с.

61. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. - М.: Наука, 1977. - 336 с.

62. Петраков А.В. Автоматические телевизионные комплексы для регистрации быстропротекающих процессов. - М.: Энергоиздат, 1987. - 152 с.
63. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. - М.: Мир, 1982, Т. 1. - 312 с.
64. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. - М.: Мир, 1982, Т. 2. - 480 с.
65. Родионов С.А. Автоматизация проектирования оптических систем. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1982. - 270 с.
66. Сарнадский В.Н. Использование рекуррентного цифрового фильтра при обработке голографических изображений // Голографические измерительные системы. Межвузовский сборник трудов. - Новосибирск, 1980. - С. 100-106.
67. Сарнадский В.Н. Произвольно ориентированный цифровой низкочастотный фильтр для обработки изображений, реализуемый на микроЭВМ // Системы автоматизированной обработки изображений. Межвузовский сборник трудов. - Новосибирск, 1984. - С. 158-173.
68. Системы автоматизации обработки оптической информации / Под ред. А.Г. Козачка. - Новосибирск: НЭТИ, 1984. - 177 с.
69. Сканирующие устройства на ЭЛТ высокого разрешения (для ЭВМ) / Под ред. С.Т. Васькова. - Новосибирск: Наука, 1978.
70. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. - М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва Наука, 1971. - 616 с.
71. Тартаковский В.А. Восстановление фазы двумерных полей при интерференционном контроле оптики // Автореферат Д. на соискание у.с.к. Ф.-м. наук. - Томск, 1976. - 21 с.
72. Темников Ф.Е., Афанини В.А., Дмитриев В.И. Теоретические основы информационной техники. - М.: Энергия, 1979. - 512 с.
73. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструк -

ций. - М.: Наука, 1975. - 704 с.

74. Ушаков А.Н. Автоматическая обработка интерферограмм на ЭВМ. - Автометрия, 1980, № 4 - С. 75-82.

75. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы. - М.: Энергия, 1974. - 320 с.

76. Цапенко М.П. Развитие измерительных информационных систем. - Приборы и системы управления, 1978, № 8. - С. 4-6.

77. Ярославский Л.П. Устройства ввода-вывода изображений для цифровых вычислительных машин. - М.: Энергия, 1968. - 95 с.

78. Ярославский Л.П., Фаянс А.М. Исследование возможностей обработки и анализа интерферограмм на ЦВМ // Иконика. - М.: Наука, 1975. - С. 27-29.

79. Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С. Методы цифровой голографии. - М.: Наука, 1977. - 192 с.

80. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. - М.: Сов. радио, 1979.

81. Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С. Цифровая голография. - М.: Наука, 1982. - 219 с.

82. Ai C., J.C. Wyant

Effect of piezoelectrical transducer nonlinearity on phase shift interferometry. - APPLIED OPTICS.-1987.-V.26.-No.6.-pp. 1112-1116.

83. Breuckmann B., Thiemi W.

Computer-aided analysis of holografik interferograms using the phase-shift method. - APPLIED OPTICS.-1985.-V.24.-No.14.-pp. 2145-2149.

84. 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.-pp. 2693-2703.

85. Clark C.G., Gaylord T.K.

Phase stabilization system for holographic optical data processing. APPLIED OPTICS.-1985.-V.24.-No.14.-pp. 2140-2144.

86. Crane R.

Interference phase measurement. - APPLIED OPTICS.-1969.-V.8.-No.3.-pp. 538-542.

87. Creath K.

Phase-shifting speckle interferometry. - APPLIED OPTICS.-1985.-V.24.-No.18.-pp. 3053-3058.

88. Chang M., Hu C.-P., Lam P., Wyant J.C.

High precision deformation measurement by digital phase shifting holographic interferometry. - APPLIED OPTICS.-1985.-V.24.-No.22.-pp. 3780-3783.

89. Cheng Y.-Y., Wyant J.C.

Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry.-APPLIED OPTICS.-1985.-V.24.-No.18.-pp. 3049-3052.

90. Dandliker R., Maron E., Mottier F.M.

Two-reference-beam holographic interferometry. - JOS A.-1976.-V.66.-No.1.-pp. 23-30.

91. 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.-pp. 301-306.

92. 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.-pp. 2604-2611.

93. Fercher A.F., Vry U.

Two-wavelength speckle interferometric technique for rough surface contour measurement. - OPTICAL ENGINEERING.-1986.-V.25.-No.5.-

pp. 623-626.

94. Frantz L.M., Sawchuk A.A., Von der ohe W.

Optical phase measurement in real time. - APPLIED OPTICS.-1979.-
V.18.-No.19.-pp. 3301-3306.

95. Funnel W.R.J.

Image processing applied to the interactive analysis of interfero-
metric fringes. - APPLIED OPTICS.-1981.-V.20.-No.18.-
pp. 3245-3250.

96. Hariharan P., Oreb B.F., Brown N.

A digital phase-measurement system for real-time holographic inter-
ferometry. - OPTICS COMMUNICATION.-1982.-V.41.-No.6.-p.393.

97. Hariharan P., Oreb B.F., Brown N.

Real-time holographic interferometry: a microcomputer system for
the measurement of vector displacements. - APPLIED OPTICS.-1983.-
V.22.-No.6.-pp. 876-880.

98. Oreb B.F., Sharon B., Hariharan P.

Elektronic speckle pattern interferometry with a microcomputer. -
APPLIED OPTICS.-1984.-V.23.-No.22.-pp. 3949-3951.

99. Ichioka Y., Inuija M.

Direct phase detecting system. - APPLIED OPTICS.-1972.-V.11.-
No.7.-pp. 1507-1514.

100. Kazuyoshi I., Yoshihiro O.

Spatial coherence measurement through turbulent atmosphere using
computer-aided interferometer. - OPTICS COMMUNICATION.-1981.-
V.36.-No.4.-pp. 250-254.

101. Kothiyal M.P., Delisle C.

Shearing interferometer for phase shifting interferometry with po-
larization phase shifter. - APPLIED OPTICS.-1985.-V.24.-No.24.-
pp. 4439-4442.

102. Kreis T.M., Kreitlow H.

Quantitative evaluation of holographic interference pattern under image processing aspects. - PROCEEDING OF SPIE.-1979.-V.210.-pp. 196-202.

103. Malacara D., Cornejo A., Murty V.R.K.

Bibliography of various optical testing methods. - APPLIED OPTICS.-1975.-V.14.-No.5.-pp. 1065-1080.

104. Massie N.A.

Real-time digital heterodyne interferometry: a system. - APPLIED OPTICS.-1980.-V.19.-No.1.-pp. 154-160.

105. Mertz L.

Complex interferometry. - APPLIED OPTICS.-1983.-V.22.-No.10.-p. 1535.

106. Macy W.W., Jr.

Two-dimensional fringe-pattern analysis. - APPLIED OPTICS.-1983.-V.22.-No.3.-pp. 3898-3901.

107. Moore D.T., Murray R., Neves F.B.

Large aperture ac interferometer for optical testing. - APPLIED OPTICS.-1978.-V.17.-No.24.-pp. 3959-3963.

108. Nakadate S., Magone N., Honda T., Tsujiuchi J.

Hibrid holographic interferometr for measuring tree-dimensional deformation. - OPTICAL ENGINEERING.-1981.-V.20.-No.2.-pp. 246-252.

109. Nakadate S., Yatagia T., Saito H.

Computer-aided speckle pattern interferometry. - APPLIED OPTICS.-1983.-V.22.-No.2.-pp. 237-243.

110. Nakadate S., Saito H.

Fringe scanning speckle-pattern interferometry. - APPLIED OPTICS.-1985.-V.24.-No.14.-pp. 2172-2180.

111. 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.-

pp. 223-225.

112. Patorski K., Kujawinska M.

Optical differentiation of displacement patterns using moire interferometry. - APPLIED OPTICS.-1985.-V.24.-No.18.-pp. 3041-3048.

113. Prettyjohns K., Devore S., Dereniak E., Wyant J.

Design and operation of a real time interferometer working at 3.8 M. - PROCEEDING OF SPIE.-1983.-V.429.-pp. 142-147.

114. Psaltis D., Gasasent D.

Phase determination of an amplitude modulated complex wavefront. - APPLIED OPTICS.-1978.-V.17.-No.7.-pp. - .

115. 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.-pp. 2790-2796.

116. Rimmer M.P.

Metod for evaluating lateral shearing interferograms. - APPLIED OPTICS.-1974.-V.13.-No.3.-pp. 623-629.

117. Robinson D.W.

Automatic fringe analysis with a computer image-processing system. - APPLIED OPTICS.-1983.-V.22.-No.14.-pp. 2169-2176.

118. Robinson D.W., Williams D.C.

Digital phase stepping speckle interferometry. - OPTICS COMMUNICATIONS.-1986.-V.57.-No.1.-pp. 26-30.

119. Sasaki O., Okazaky H.

Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurement. - APPLIED OPTICS.-V.25.-No.18.-pp. 3137-3140.

120. Sasaki O., Okazaki H.

Analysis of measurement accuracy in sinusoidal phase modulating interferometry. - APPLIED OPTICS.-V.25.-No.18.-pp. 3152-3158.

121. Schehem M.

Precision optical wavefornt measurement. - PROCEEDING OF SPIE.-

1981.-V.306.-pp. 183-191.

122. Schmidt-Wienmar H.G.

Spatial distribution of magnitude and phase of optical-wave fields. - J.OPT.SOC.AM.-1973.-V.63.-No.5.-pp. 547-555.

123. Schwider J., Burow R., Elsner K., Grzanna J., Spolaczyk R., Mezkel K.

Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources. - APPLIED OPTICS.-1983.-V.22.-No.21.-pp. 3421-3432.

124. Smythe R., Moore R.

Instantaneous phase measuring interferometry. - PROCEEDING OF SPIE.-1983.-V.429.-pp. 16-21.

125. Sommargren C.E.

Double-exposure holographic interferometry using common-path reference waves. - APPLIED OPTICS.-1977.-V.16.-No.6.-pp. 1736-1741.

126. Schluter M., Nowatzuk A.

In-plane deformation measurement by video-electronic hologramm interferometry. - OPTICA ACTA.-1980.-V.26.-No.6.-pp. 799-808.

127. Takeda M., Ina H., Kobayashi S.

Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. - J.OPT.SOC.AM.-1982.-V.72.-No.1.-pp. 156-160.

128. Thalmann R., Dandliker R.

Holographic contouring using electronic phase measurement. - OPTICAL ENGINEERING.-1985.-V.24.-No.6.-pp. 930-935.

129. Wang J.Y., Silva D.E.

Wave-front interpretation with zernike polynomials. - APPLIED OPTICS.-1980.-V.19.-No.9.-pp. 1510-1518.

130. Wyant J.C.

Testing aspherics using two-wavelength holography. - APPLIED OPTICS.-1971.-V.10.-No.9.-pp. 2113-2118.

131. 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.-pp. 4020-4023.

132. Wyant J.C., Creath K.

Recent advances in interferometric optical testing. - LASER FOCUS.-1985.-V.21.-No.11.-pp. 118-132.

133. Ytagai T., Nakadate S., Idesawa M., Saito H.

Automatic fringe analysis using digital image processing techniques. - OPTICAL ENGINEERING.-1982.-V.21.-No.3.-pp. 432-435.

134. Ytagai T., Inaba S., Nakano H., Suzuki M.

Automatic flatness tester for VLSI. - PROCEEDING OF SPIE.-1983.-V.429.-pp. 130-135.

135. Ytagai T., Kanou T.

Aspherical surface testing with shearing interferometer using fringe scanning detection method. - PROCEEDING OF SPIE.-1983.-V.429.-pp. 136-141.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

П.1. Описание программы для определения окрестности грубых сбоев при заданном диапазоне.

Имя программы: *DIAP I*

Назначение. Расчет окрестности грубых сбоев.

Тип ЭВМ. СМ-4, СМ-1420, "Электроника-60".

Язык программирования. Фортран-IV.

Вводились данные:

NL - число сравнений.

L(NL) - модули сравнений.

DIA - диапазон.

Выходные данные. Минимальная и максимальная окрестность грубых сбоев по каждой координате. Минимальная и максимальная окрестность по всем координатам.

Внутренние подпрограммы.

MNRST(A, N, L, M). Определяет минимальную разность между элементами целого массива $A(N)$. Сравнивает ее с L , и минимальное значение засылает в M .

SORT(A, N). Сортирует целый массив $A(N)$ в порядке возрастания.

EVKLID(L1, L2, U). Проверяет целые числа $L1, L2$ на взаимную простоту. ($L1$ должно быть меньше $L2$). Если числа взаимно простые - $U = 1$, если не взаимно простые - $U \neq 1$.

EVKL(L, N, U). Проверяет значения целого массива $L(N)$ на взаимную простоту. Устанавливает значения U , как в предыдущем случае.

KFS(L, MS1, MS2, N, PS, U). Нахождение коэффициентов в уравнении решения системы сравнений.
$$X_0 = M_1 M_1' b_1 + \dots + M_n M_n' b_n \pmod{(m_1 \dots m_n)}$$

$L(N)$ - целый массив модулей.

$MS1(N)$ - реальный массив M_i .

$MS2(N)$ - целый массив M_i' .

PS - $m_1 m_2 \dots m_n$

$U = 1$, если решение существует.

$U \neq 1$, если решение не найдено.

$EQX(MS2, L, K, X)$ Решение сравнения первой степени.

$$MS2 \cdot X \equiv K \pmod{L}$$

Текст программы:

ЛАЭИ НЭТИ

```

C
C*****
C   ДАТА СОЗДАНИЯ:      30/09/86
C   ДАТА РЕДАКТИРОВАНИЯ: 29/10/86
C   FILE -              DIAPI.FTN
C   ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОКРЕСТНОСТИ ГРУБЫХ СБОЕВ
C   ПРИ ЗАДАННОМ ДИАПАЗОНЕ.
C   ПЕРЕМЕННЫЕ:
C   L(100) - МОДУЛИ              INTEGER
C   NL      - ЧИСЛО СРАВНЕНИЙ    INTEGER
C   BX(1024) - МАССИВ КООРДИНАТ РЕШЕНИЙ INTEGER
C   MIN     - МИНИМАЛЬНАЯ ОКРЕСТНОСТЬ INTEGER
C           - БЕЗ УЧЕТА ГРАНИЦ
C   MING    - С УЧЕТОМ ГРАНИЦ    INTEGER
C*****

```

```

C*****
C   INTEGER L(100)
C   REAL MS1(100)
C   INTEGER MS2(100)
C   INTEGER U,X,BX(1024)
C   INTEGER MIN,MING
C   MAXDIA = 1024

```

C.....1) ВВОД НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ:.....
C-----

```

99  WRITE(5,1)
1   FORMAT('n NUMBER L = ')
   READ(5,2)NL
2   FORMAT(I6)
   DO 14 I=1,NL
   I1=I
   WRITE(5,3)I1
3   FORMAT('n L',I2,'= ')
   READ(5,2)L(I1)
14  CONTINUE
   CALL SORT(L,NL)
C   CALL EVKL(L,NL,U)
   IF (U.EQ.1)GOTO 15
   WRITE(5,4)

```

```

C-----
4   FORMAT(' ERROR 001 ')
5   FORMAT(' ERROR 002 ')
6   FORMAT(' ERROR 003 ')
7   FORMAT(' ERROR 004 ')
C   FORMAT(' ERROR 005 ')
8   FORMAT(' ERROR 005 ')
10  FORMAT(' -----')
   GOTO 99

```

C.....2) НАХОЖДЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ УРАВНЕНИЯ РЕШЕНИЯ.....
C-----

```

15  CALL KFC(L,MS1,MS2,NL,FL,U)
   IF (U.EQ.1)GOTO 25
   WRITE(5,5)
   GOTO 99
25  DO 16 I=1,NL
   I1=I
   WRITE(5,17)I1,MS1(I1),MS2(I1),MS1(I1)*MS2(I1)
17  FORMAT(' I= ',I3,' MS1=',F16.0,' MS2=',I7,' MS=',F16.0)
16  CONTINUE
   WRITE(5,18)FL

```


C-----
 C СЛУЖЕБНЫЕ ПОДПРОГРАММЫ. ЧИСЛА ВЗАИМНО
 C-----

```

SUBROUTINE MNRST(A,N,L,M)
INTEGER A(N)
M=L
DO 10 I=1,N-1
IM=A(I+1)-A(I)
IF (IM.LT.M)M=IM
10 CONTINUE
RETURN
END

```

```

C-----
SUBROUTINE SORT(A,K)
INTEGER A(K)
KNTR=0
DO 10 I=1,K-1
IF (A(I+1).GE.A(I))GOTO 10
KNTR=1
II=A(I)
A(I)=A(I+1)
A(I+1)=II
10 CONTINUE
IF (KNTR.GT.0)GOTO 90
RETURN
END

```

! СОРТИРОВКА МАССИВА A(K)
! В ПОРЯДКЕ ВОЗРАСТАНИЯ,

```

C-----
SUBROUTINE EQX(MS2,L,K,X)
INTEGER MS2,L,K,X
INTEGER PS,PSM1,PSM2,N
PSM1=1
PSM2=0
PS=1
N=0
I2=L
I3=MS2
10 I1=MOD(I2,I3)
IF (I1.EQ.0)GOTO 20
N=N+1
I=I2/I3
I2=I3
I3=I1
PS=I*PSM1+PSM2
PSM2=PSM1
PSM1=PS
GOTO 10
20 IF (MOD(N,2).NE.0)GOTO 22
X=PS*K
GOTO 24
22 X=-PS*K
21 IF (X.GE.0)GOTO 24
X=X+L
GOTO 21
24 X=MOD(X,L)
RETURN
END

```

! MS2*X=K (MOD L)
! MS2 < L

C-----
 C SUBROUTINE EVKLID(L1,L2,U) ! L1 < L2
 C-----

```

INTEGER U
INTEGER V,R
U=L2
V=L1
15 IF (V.EQ.0) GOTO 100
R=MOD(U,V)
U=V
V=R
GOTO 15
100 RETURN
END

```

! АЛГОРИТМ ЕВКЛИДА.
! ЧИСЛА ВЗАИМНО ПРОСТЫ ?
! ДА - U = 1
! НЕТ - U <> 1

МАТЕРИАЛЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ СУЩЕСТВЕННОЕ

C-----

```

SUBROUTINE EVKLID(L,N,U)
INTEGER L(N),U
INTEGER U1
U=1
DO 10 I=1,N-1
DO 10 J=I+1,N
CALL EVKLID(L(I),L(J),U1)
IF (U1.EQ.1) GOTO 10
U=0
10 CONTINUE
RETURN
END

```

! ПРОВЕРКА МАССИВА
! НА ПОПАРНУЮ ПРОСТОТУ.
! ЧИСЛА ПОПАРНО ПРОСТЫ ?
! ДА - U = 1
! НЕТ - U <> 1

C-----

```

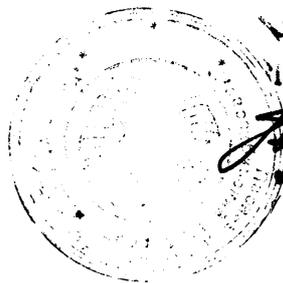
SUBROUTINE KFC(L,MS1,MS2,N,PS,U)
INTEGER L(N),U
REAL MS1(N),PS
INTEGER MS2(N)
U=1
PS=1,
DO 10 I=1,N
PS=PS*FLOAT(L(I))
DO 16 I=1,N
FLS=L(I)
F1=PS/FLS
J=0
11 J=J+1
IF (J.GT.L(I))GOTO 90
FJ=F1*FLOAT(J)
K=AMOD(FJ,FLS)
IF (K.NE.1) GOTO 11
MS1(I)=F1
MS2(I)=J
16 CONTINUE
RETURN
90 U=0
RETURN
END

```

! НАХОЖДЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ
! В УРАВНЕНИИ РЕШЕНИЯ
! СИСТЕМЫ СРАВНЕНИЙ.
! U = 1 РЕШЕНИЕ СУЩЕСТВУЕТ
! U <> 1 РЕШЕНИЕ НЕ НАЙДЕНО

! X0=SUM(MS1(I)*MS2(I)*B(I))
! MOD(L(1)*L(2)*...*L(N))
! - L(1)*L(2)*...*L(N)=MS1(S)*L(S)
! - MS1(S)*MS2(S) = 1 (MOD L(S))

П.2. Материалы, подтверждающие внедрение и
использование результатов диссертации.



Зам. главного инженера

ИО "ИЗ"

Павлов С.Р.

"10" II 1987 г.

Акт внедрения

Настоящий акт составлен в том, что на ИО "ИЗ" внедрена когерентно-оптическая система для автоматизированного контроля интерференционным методом формы оптических деталей.

Методическое решение измерительной системы, её аппаратное и программное обеспечение основаны на результатах научных исследований, изложенных в диссертации заведующего лабораторией АИИ ИЭТИ тов. Гужова Владимира Ивановича "Разработка и исследование когерентно-оптических измерительных систем для определения фазовых характеристик волновых полей."

Измерительная система используется в лаборатории перспективной технологии отдела главного оптика. Её применение позволяет повысить точность и объективность измерений, а также повысить производительность труда при контрольных операциях. Уровень разработки соответствует лучшим мировым образцам - измерительной системе типа марк-II фирмы "айга" США. Оснащение измерительной системой ИЭТИ серийно выпускаемых интерферометров типа ИТ-100, ИТ-200 позволит отказаться от приобретения автоматизированного контрольного оборудования по импорту.

Экономический эффект от внедрения одной системы составляет 62 тыс. руб. в 1988 году на основе существующей измерительной системы на ИО "ИЗ" совместно с ИЭТИ будет создана и внедрена аппаратура для автоматизированного контроля формы плоских оптических деталей в цеховых условиях.

Главный оптик

Аршов А.И.

Зам. главного оптика,
кандидат технических наук

Штейнгольц С.И.

Проректор по учебной работе
Новосибирского электротехнического
института



К. Т. н., доцент

..... Ю. И. Соболев

..... 11..... 1987 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы
ГУЖОВА Владимира Ивановича "Разработка и исследова-
ние когерентно-оптических измерительных систем
для определения фазовых характеристик волновых
полей".

На кафедре Информационно-измерительной техники Новосибирского электротехнического института в учебном процессе внедрены результаты диссертации Гужова В. И. "Разработка и исследование когерентно-измерительных систем для определения фазовых характеристик волновых полей". Результаты работы используются при выполнении лабораторной работы "Голографическая измерительная система" по курсу "Новые методы измерений" и в курсах лекций "Системотехническое проектирование и программное обеспечение", "Программирование". Студенты знакомятся с основными методами определения полей разности фаз интерферирующих волновых фронтов и методами автоматизации при обработке и расшифровке интерферограмм.

Зав. кафедрой ИИТ

д. т. н., профессор

М. П. Цапенко

М. П. Цапенко

Ученый секретарь каф. ИИТ

ст. преподаватель

Т. В. Власова

Т. В. Власова