

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 620.178.5

67.5.07
27 ОКТ 1998

НЕЧАЕВ ВИКТОР ГЕОРГИЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ СПЕКТЛ-
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ С РАСШИРЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ
ДИАПАЗОНОМ

Специальность 05.11.07-Оптические и оптико-электронные приборы

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Новосибирском государственном техническом университете.

Научный руководитель – к.т.н. Гужов В.И.

Официальные оппоненты: - д.т.н. Чугуй Ю.В.
 к.ф.-м.н. Черненко А.А.

Ведущая организация Сибирский научно-исследовательский
институт оптических систем
(г.Новосибирск)

Защита состоится 18 ноября 1998 г.
на заседании диссертационного совета Д 063. 34.08 при Новоси-
бирском государственном техническом университете (630092, Новоси-
бирск 92, пр. К. Маркса, 20)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского
государственного технического университета.

Автореферат разослан

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент В.Л. Полубинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы Развитие современных производственных технологий требует создания новых методов и средств получения измерительной информации. После изобретения лазеров и голографии значительное внимание уделялось развитию и использованию голографических интерференционных методов. Ранее применяемая только для оптически совершенных объектов интерферометрия оказалась пригодной и для исследования диффузно-отражающих деталей и конструкций.

Дальнейшим развитием метода голографической интерферометрии стал метод цифровой спекл-интерферометрии. Метод основан на применении цифровых систем обработки изображения для корреляционного сравнения спеклограмм исходной и деформированной поверхности объекта. При этом удается получить картину корреляционных полос, несущих информацию о поле смещения на поверхности объекта.

Исследования в области спекл-интерферометрии в настоящее время приобретают новый импульс в связи с появлением новых высокоразрешающих приемников изображений, а также малогабаритных твердотельных лазеров. Созданная из таких элементов спекл-интерференционная система малогабаритна, и может быть закреплена непосредственно на исследуемой конструкции в реальных условиях эксплуатации, что позволит уменьшить влияние жестких перемещений объекта.

При использовании интерференционных методов одной из наиболее важных и трудных задач является расшифровка спекл-интерферограмм, под которой понимается определение по картинам полей пространственной разности фаз волновых фронтов, а затем измеряемой величины, однозначно связанной с этим полем.

Актуальным является разработка новых методов, позволяющих объединить достоинства спекл-интерференционных методик с высокой точностью интерференционных методов и методов голографической интерферометрии.

В настоящей работе предлагаются методы определения статических и динамических смещений поверхности с расширенным динамическим диапазоном для исследования напряженно-деформированного состояния объектов.

Связь с государственными программами и НИР

Работы по теме диссертации выполнены в соответствии с Единой целевой комплексной научно-технической программой о.ц. 047, задание 06,21 (№ гос. рег. 74029772, 01820090929, У88871, У17700, 01840035541); общесоюзной научно-технической программой ГКНТ 080.03 задание 06.15А (№ гос. рег. 81029971, 1850038872), координационными планами АН СССР по проблемам "Измерительные процессы и

системы" (№ гос. рег. 76028712, 80944795, У00197) и "Оптика. Квантовая электроника (№№ гос.рег. 74050015, 77050215, 79000614).

Работа выполнена в Лаборатории автоматизации экспериментальных исследований кафедры "Оптические информационные технологии" НГТУ.

Цель работы

Исследование и развитие измерительных систем на основе методов цифровой спекл-интерферометрии:

-развитие метода управляемого фазового сдвига для анализа напряженно-деформированного состояния объектов и получения повышенных значений точности определения смещений точек диффузных поверхностей;

-разработка и исследование метода поточечного определения полной фазы сигнального фазового поля, соответствующего нагруженной поверхности объекта на основе создания референтного фазового поля от недеформированного состояния;

-увеличение динамического диапазона измерения амплитуд вибраций за счет комбинирования методов голографической и цифровой спекл-интерферометрии.

Методы исследования

В проводимых исследованиях использовались методы теории спектрального анализа, волной оптики, голографии, а также методы компьютерного моделирования и физический эксперимент.

Научная новизна

-разработаны новые методы расшифровки спекл-интерферограмм, основанные на создании референтного фазового поля до нагружения объекта, позволяющие определять смещения точек диффузной поверхности в реальном времени с интерференционной точностью;

-предложены способы уменьшения ошибок, вызванных погрешностями при задании эталонных сдвигов и нелинейностью фотоприемника путем преобразования масштабов спеклов и тестирования интерферометра;

-предложен способ определения амплитуд вибраций, позволяющий повысить точность измерений за счет исключения погрешностей, связанных с не кратностью амплитуд вибраций четверти длины волны излучения лазера;

-новизна научных результатов подтверждена авторскими свидетельствами и патентами А.С. №1165885, №1022209, №1116325, №4170605, №41339093, патент №96109642/28.

Практическая ценность и реализация результатов работы

-создана универсальная когерентно-оптическая измерительная система с управляемым фазовым сдвигом для исследования измерений при статической и динамической нагрузке;

-разработаны устройства ввода когерентно-оптической информации, как составные части спекл-интерференционных систем;

-предложено устройство для определения смещения точек поверхности объекта (А.С. №1165885) с использованием метода спекл-фотографии для увеличения производительности обработки информации.

Разработанные системы успешно используются в ряде организаций страны:

-голографическая виброизмерительная система для количественного определения амплитуд вибрации объекта на предприятиях “Морфиз-прибор” (г. Санкт-Петербург)

-в “ Сибирском научно-исследовательском институте авиации” (г. Новосибирск)

-устройства ввода когерентно-оптической информации, на предприятии Р-6324 (г. Москва)

На защиту выносятся

-методы расшифровки спекл-интерферограмм, основанные на создании референтного фазового поля до нагружения объекта, позволяющие определять смещения точек диффузной поверхности в реальном времени с интерференционной точностью;

-способ и устройство определения амплитуд вибраций в реальном времени при использовании фотоприемников с временным разнесением окон считывания;

- реализация методов цифровой спекл-интерферометрии в универсальной когерентно-оптической системе для определения поля смещений и вибрационных характеристик поверхности.

Апробация работы

Результаты работы докладывались, обсуждались на Всесоюзных конференциях: “Использование оптических квантовых генераторов в современной технике” (Ленинград, 1977г.), “Применение лазеров в технологии и системах передачи и обработки информации” (Ленинград, 1984г.), “Фотометрия и ее метрологическое обеспечение” (Москва, 1976г.), “Автоматизация научных исследований на базе ЭЦВМ” (Новосибирск, 1981г.), “Конференция по кодированию и передаче информации” (Москва, 1981г.), на Международной конференции “Измерительные информационные системы” (Москва, 1994г.), “International Conference Photomechanics’95” (Новосибирск, 1995г.).

Система автоматизации обработки оптической информации в прочностных исследованиях демонстрировалась на ВДНХ СССР и была отмечена Дипломом первой степени.

Публикации

По результатам исследований опубликовано: 19 статей и тезисов докладов, 5 отчетов по НИР, получено 6 авторских свидетельств и патентов.

Структура и объем диссертации

Содержание диссертации изложено во введении, четырех главах и заключении.

В первой главе проведен анализ спекл-интерференционных методов определения фазовых характеристик волновых полей при отражении от диффузных поверхностей. Рассмотрены различные типы спекл-интерферометров, и их основные метрологические характеристики при определении параметров напряженно-деформированного состояния объектов. На основе проведенного анализа сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены методы расшифровки спекл-интерферограмм, исследованы их метрологические характеристики предложены способы повышения точности.

Метод цифровой спекл-интерферометрии основан на применении цифровых систем обработки изображений для корреляционного сравнения исходной и деформированной поверхности объекта. Корреляционное сравнение осуществляется сравнением на компьютере двух интенсивностей в соответствии с выражением

$$I_s(x,y) = [I_0(x,y) - I_1(x,y)]^2, \quad (1)$$

где $I_0(x,y)$ и $I_1(x,y)$ значения интенсивности в точках наблюдения до и после нагружения объекта.

Методы расшифровки спекл-интерферограмм в основных чертах основываются на методах расшифровки интерференционных картин в обычной фазосдвигающей интерферометрии. Это возможно, потому что, сглаживая выражение (1), получаем косинусоидальную зависимость подобную выражению при интерференции двух пучков.

Однако, в отличие от интерференционных методов, при получении полос методом корреляционной спекл-интерферометрии уверенно можно выделить только полосы с нулевой интенсивностью.

Расшифровка методом управляемого фазового сдвига. Фиксируется распределение интенсивности недеформированной поверхности объекта. Затем после нагружения последовательно вносятся дополнительные фазовые сдвиги между предметным и опорными пучками и вычисляются картины корреляционных полос.

$$I_{s,k}(x,y) = |I_{ref}(x,y) - I_{def,k}(x,y)|, \quad (2)$$

где индексы $k=1,2,3,4$ соответствуют внесенным фазовым сдвигам. Было предложено определять фазовый сдвиг Ψ , вызванный нагружением объекта, из соотношения

$$\operatorname{tg}\Psi = (I_{s,4} - I_{s,2}) / (I_{s,1} - I_{s,3}), \quad (3)$$

где $I_{s,k}$ - картины корреляционных полос, усредненные по столь малым областям, в пределах которых фазовый сдвиг $\Psi(x,y)$, вызванный нагружением объекта, можно считать почти постоянным. Необходимо применять фильтрацию, т.к. алгоритм (3) применим только для косинусоидальных распределений. Анализ корреляционной картины показывает, что средний размер спеклов соизмерим со средним размером области усреднения, поэтому соотношение (3) не позволяет эффективно устранить влияние спекл-шума. На рис. 1 показана принципиальная схема оптической установки, в которой фазовый сдвиг задается перемещением зеркала, закрепленного на пьезокерамике.

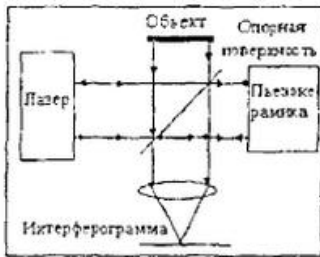


Рис.1. Интерферометр с управляемым фазовым сдвигом

Если фазовые сдвиги одинаковы, то фаза Ψ может быть определена как

$$\Psi = \arctan \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n I_i \sin \delta_i}{\sum_{i=1}^n I_i \cos \delta_i} \right\} \quad (4)$$

Предложен алгоритм, основанный на проведении нескольких фазовых сдвигов до и после нагрузки, что позволяет производить измерения поверхностных перемещений с интерференционной точностью.

Предположим, что перед нагружением объекта регистрируют распределение интенсивности $I_{ref}(\alpha)$ в спеклограмме исходной поверхности объекта, полученное при внесении контролируемого фазового сдвига

α между предметным и опорным пучками. После нагружения объекта регистрируют спеклограмму $I_{def}(\beta)$ деформированной поверхности объекта при фазовом сдвиге β . Предполагается, что уровень нагружения объекта выбран таким, что эффект декорреляции спеклов отсутствует. Разность $\Phi_s - \Phi_r$ является разностью фаз от спеклообразных фазовых картин в каждой точке (x,y) недеформированного и деформированного состояния. Индексы k соответствуют внесенным фазовым сдвигам. Выражение (2) после некоторых преобразований можно представить в следующем виде:

$$I_{ref}(a) - I_{def}(b) = 4 A_S A_T \sin(\Phi_S - \Phi_T + \pi/2 + (\alpha + \beta)/2) \sin(\pi/2 + (\alpha - \beta)/2). \quad (5)$$

Откуда

$$\tan(\Psi/2) = \frac{I_{\text{ref}}(\pi/2) - I_{\text{def}}(\pi/2)}{I_{\text{ref}}(0) - I_{\text{def}}(\pi)} = \frac{N \sin(\Psi/2)}{N \cos(\Psi/2)}. \quad (6)$$

Используя четыре спеклограммы, две из которых зарегистрированы до нагружения объекта при фазовых сдвигах между предметным и опорным пучками 0 и $\pi/2$, а две другие после нагружения, при сдвигах $\pi/2$ и $3/4\pi$, определяем фазовый сдвиг, вызванный нагружением объекта, при этом составляющие, зависящие от спекл-структуры, сокращаются.

$$\text{Пусть} \quad K_1(x,y) = I_{\text{ref}}(\pi/4) - I_{\text{def}}(3\pi/4) \quad (7)$$

$$K_2(x,y) = I_{\text{ref}}(\pi/2) - I_{\text{def}}(\pi/2) \quad (8)$$

$$K_3(x,y) = I_{\text{ref}}(0) - I_{\text{def}}(\pi), \quad (9)$$

тогда для определения полного фазового сдвига $\Psi(x,y)$, вызванного нагрузкой, получено следующее выражение:

$$\Psi = \arctan(2(K_1)^2 - (K_2)^2 - (K_3)^2) / ((K_3)^2 - (K_2)^2). \quad (10)$$

Выражение (10) требует регистрации 6 спеклограмм: 3-х до нагрузки и 3-х после деформации объекта. Получено более простое выражение, имеющее те же характеристики:

$$\Psi(x,y) = \arctan \frac{2K_2K_3}{(K_3)^2 - (K_2)^2}. \quad (11)$$

Анализ знаков числителя и знаменателя позволяет расширить область определения $\arctan\Psi$ в (5) от 0 до 2π . Выражение (11) требует регистрации только 4 спеклограмм: 2-х до нагрузки и 2-х после деформации объекта. При этом необходимо внести всего два фазовых сдвига. Следует подчеркнуть, что соотношение (5) является локальным, поскольку все величины, входящие в него относятся к одной и той же точке плоскости изображения, в связи, с чем пространственное усреднение не требуется.

Приведенный метод позволяет проводить измерения поверхностных перемещений диффузных объектов с точностью близкой к интерференционной.

Как показали, проведенные эксперименты, наиболее рационально производить ввод спеклограмм с минимальным размером спекла. В этом случае результирующая картина будет формироваться усреднением выбранного числа единичных спеклов. Такая методика позволяет, во пер-

вых, снизить величину искажений исходного фазового фронта и, во вторых, использовать в оптических установках больший размер апертуры.

Экспериментальная проверка показала, что точность предложенного метода составляет $\lambda/20$ - $\lambda/30$. Эти значения близки к точности интерференционных измерений.

Созданная цифровая спекл-интерференционная система позволяет производить измерения с точностными характеристиками практически равными точности измерения голографических измерительных систем, но она намного проще и не требует промежуточных носителей оптической информации.

В третьей главе рассмотрены когерентно-оптические системы для исследований напряженно-деформированного состояния объектов объединяющие достоинства методов спекл-интерферометрии с методами голографической интерферометрии. Показаны пути построения систем, оценены их метрологические характеристики.

Для определения смещений точек методом спекл-фотографии был разработан способ и устройство для определения смещения точек поверхности объекта. Сущность измерения смещения заключается в определении шага и угла наклона интерференционных полос. Шаг и угол наклона определялся двухкоординатным фурье-анализатором и блоком обработки. Анализатор реализован в виде акустооптического дефлектора, производящего поочередное сканирование дифракционной картины по координате X и Y дефлектора. Переменная составляющая выходного сигнала представляет собой Фурье-спектр интерференционной картины. Смещение точек объекта равно:

$$\Delta\xi = \lambda L \nu(\xi) / m, \quad (12)$$

где $\nu(\xi)$ -пространственная частота модуляции, L, m-параметры интерферометра. Измерив частоты $\nu(\xi)$ по двум ортогональным направлениям, определяем смещение в выбранной точке поверхности объекта. Метод основан на анализе спектральных составляющих, и не требует предварительной фильтрации от шумов. Предложенная система позволяет значительно повысить производительность процесса измерения смещений при исследовании напряженно-деформированного состояния объектов.

Когерентно-оптическая измерительная система для исследования вибрационных характеристик изделий. В основе разработанной системы лежит использование метода голографической интерферометрии в реальном времени (усреднение "живых" полос) и телевизионных передающих устройств с различными временными окнами считывания входной информации. Именно такое сочетание позволило создать универсальную систему, обладающую высоким быстродействием и точностью.

Достоинства метода усреднения "живых" полос при создании универсальной измерительной системы настолько существенны, что делают выбор практически безальтернативным.

В системе для получения численных значений вибросмещений в заданных точках был выбран вариант счета "живых" полос с использованием электронно-оптического преобразователя "мгновенного" действия.

Блок - схема такой системы представлена на рис.2. Записывается голограмма неподвижного объекта, которая или обрабатывается на месте экспонирования, или после обработки возвращается на это место с интерференционной точностью. Затем объект возбуждается генератором вибраций, и картина бегущих интерференционных полос проектируется на фотокатоды видикона и диссектора.

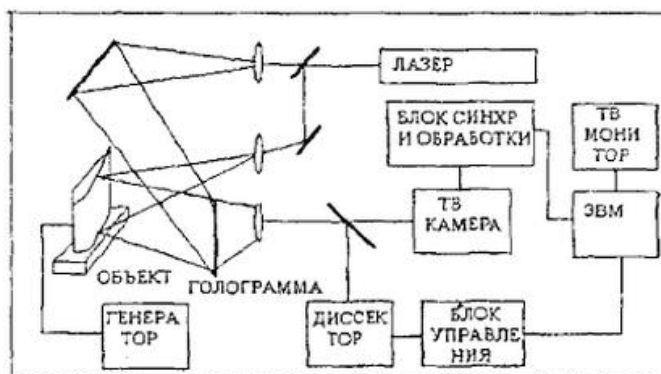


Рис.2. Универсальная система для измерения вибрационных характеристик.

Усредненная интерференционная картина, преобразованная в электрический сигнал, через блок синхронизации и обработки поступает на телевизионный монитор и визуализируется на его экране. ЭВМ с помощью привода телевизора идентифицирует точки поверхности вибрирующего объекта на экране монитора и в автоматическом или ручном режиме задает точки, в которых необходимо получить численные значения вибросмещений.

Применение в этой системе методов спекл-интерферометрии существенно упрощает оптическую схему - отпадает необходимость в изготовлении голограммы невозмущенного состояния объекта, а соответственно и освещающего ее оптического пучка. Эта система наиболее пригодна для экспресс-анализа вибраций. Присущий данному методу малый контраст изображения был поднят предварительной обработкой видеосигнала. Для повышения контраста спекл-интерференционных полос были разработаны как аппаратные так и про-

граммные алгоритмы. Путем выбора соответствующих фильтров изображение полос приобретает вид барельефа. Это позволяет увеличить число различимых спекл-интерференционных полос и поднять производительность работы оператора.

Для увеличения точности при измерении малых смещений предложена система, в которой объединены методы спекл-интерферометрии и голографического метода "живых" полос. Амплитуда вибраций в выбранной точке поверхности определяются по минимальному значению периода видеосигнала от бегущих интерференционных полос. Наблюдение производится быстродействующим оптическим фотоприемником (диссектором) с малой вырезающей апертурой. При амплитудах вибраций соизмеримых с длиной волны лазера число интерференционных полос мало. В этом случае измерение амплитуд вибрации производится с учетом дробных частей интерференционных полос. Предложен и реализован способ измерения амплитуд вибраций, который предусматривает вместо счета числа интерференционных полос производить измерение периода их следования и выбирать минимальный период, равный τ_{\min} (рис.3).

Амплитуда вибраций равна:

$$U_0 = \lambda / 4 \sin \pi f \tau_{\min}, \quad (13)$$

где f -частота вибраций объекта. Предложенная система позволяет измерять амплитуды вибраций с точностью до $\lambda/20$.

Дальнейшим развитием когерентно-оптических систем было создание спекл-интерференционной системы для измерения смещений точек поверхности (Рис. 4). Свет от лазера поступал на интерферометр Тваймана-Грина в одном плече которого, находилась диффузная поверхность, закрепленная на пьезокерамике, в другом исследуемый объект. Для перемещения опорной диффузной поверхности на пьезокерамику подавалось напряжение от цифро-аналогового преобразователя, управляемого от компьютера.



Рис.3 Сигнал диссектора при измерении амплитуд вибраций в точке поверхности

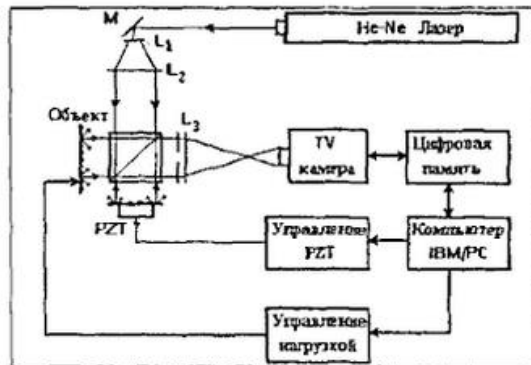


Рис.4. Схема спекл-интерферометра для определения смещений точек поверхности объекта.

Спекл-изображение поверхности объекта фиксировалось с помощью телевизионной камеры и преобразовывалось в цифровой вид с помощью устройства ввода. Устройство ввода оцифровывало изображение в темпе телевизионной развертки с размерами кадра 512 на 512 точек, и с 256 градациями по интенсивности. Исследуемая область имела размеры 50 на 50 мм.

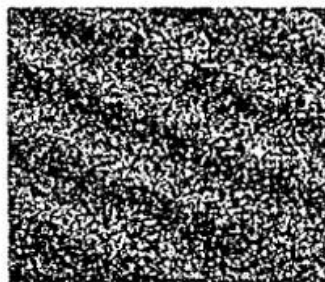


Рис.5.Результирующее поле фаз.

Полного удаления спекл-структуры в результирующем поле (рис.5) не произошло. Это связано с эффектом декорреляции спеклов до и после нагрузки. На рис.6 показаны поле фаз после низкочастотной фильтрации и трехмерный график этого поля.

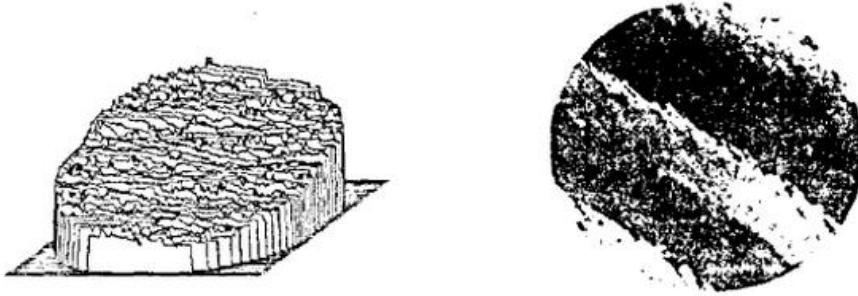


Рис.6. Поле фаз после низкочастотной фильтрации.

Эксперименты показали, что метод фазового сдвига с использованием опорного фазового поля недеформированной поверхности объекта позволяет проводить измерения без сглаживания исходных спектрограмм. Появилась возможность варьировать величины сдвигов, что расширяет возможности по определению смещений и деформаций поверхности. Точность определения смещений без обработки результатов составляет $\lambda/10$ - $\lambda/20$.

В четвертой главе приведены технические средства обеспечения экспериментов, описана и разработана универсальная когерентно-оптическая установка.

В качестве источника когерентного излучения использовался гелий-неоновый лазер ЛГ-38 мощностью 50 мВт. Оптическая установка выполнена на виброизолированном массивном металлическом столе с набором подставок и креплений собственной разработки с частичным использованием элементов из комплекта СИН (стол интерференционный). Подробно произведен анализ устройств ввода оптической информации в ЭВМ для когерентно-оптических систем.

При исследовании вибраций методом "живых" полос необходимо следить за изменениями яркости в выбранных точках поверхности. Для измерений высокочастотных составляющих колебаний объекта с большой амплитудой, необходимо применение устройств с высокими скоростями обработки сигналов.

Для определения вида форм колебаний объекта необходимо производить усреднение распределения яркости по всей плоскости наблюдения за отрезки времени много большие периода колебаний. Усреднение производится фотоприемниками с эффектом накопления (видиконы, матрицы ПЗС). Следовательно, для виброизмерительной системы необходимо два различных по функциональным возможностям устройства ввода.

Быстродействующие устройства ввода требуют применения фотоприемников с малыми временами преобразования свет-ток, а также с малыми шумами. Поставленным требованиям удовлетворяют фотоэлектрон-

ные умножители (ФЭУ и диссектор), обеспечивающие быстрый ввод оптической информации в выбранных точках поверхности, большой диапазон измеряемых амплитуд.

Высокое разрешение устройств ввода обеспечивают линейные приемники оптического излучения, с разрешением до 10000 элементов по строке. Данные фотоприемники сопрягаются с электромеханическим приводом для сканирования по ортогональной координате, при этом, используя специальные методы, можно добиться разрешения до 12 рядов по яркости.

Для увеличения скорости ввода использовались высококачественные передающие ТВ камеры. Устройство ввода состоит из быстродействующего аналого-цифрового преобразователя (ADC), блока синхронизации и коммутации, блоков динамической и буферной памяти, управления и сопряжения с ЭВМ.

Было предложено устройство для измерения яркостей в большом динамическом диапазоне на основе фотодиодов. Разработанное устройство обладает малым уровнем шумов, большой чувствительностью, а по динамическому диапазону приближается к ФЭУ. Отсутствие высоких напряжений, малые габариты и масса позволяют его использовать в составе малогабаритных измерительных устройств.

При исследовании напряженно-деформированного состояния объекта методом спекл-интерферометрии необходимо обеспечить ввод изображения всей поверхности объекта с минимальными искажениями. Для обработки и расшифровки изображений в лаборатории было разработано и изготовлено универсальное электромеханическое устройство ввода, позволяющее использовать в качестве фотоприемников стандартные ТВ камеры (и другие фотоприемники). Размер сканирования изображения - 100x100 мм. Абсолютное значение координаты точки ввода измерялось линейным датчиком перемещений с использованием целочисленного кодирования для увеличения точности ввода координат (рис.9).

Устройство состоит из предметного стола, перемещаемого по координатам X,Y с помощью ходовых винтов. Вращение ходовых винтов обеспечивается шаговыми двигателями. Управление перемещением предметного стола в точку съема информации производится через блок сопряжения с ЭВМ и блок управления приводами. Важно отметить, что измерение координат производилось измерителем абсолютных перемещений, что позволило значительно уменьшить геометрические искажения и при обработке изображений применять программы сшивки фрагментов.

Для устранения влияний внешних факторов на повторяемость результатов измерений были приняты специальные меры по температурной стабилизации установки, исключению турбулентности воздушной среды и защите от вибраций. Исследования устройства показали, что

точность определения абсолютного положения составляет 2,5мкм при перемещении в пределах 100мм.

Важнейшим элементом спекл-измерительной системы являются устройства для *обеспечения управляемого фазового сдвига*. Сдвиг фаз производится изменением оптического пути луча. Для этого использовалось устройство, изменяющее длину пути опорного пучка с помощью пьезопреобразователя. Оно обеспечивает сдвиг фазы до 4л с точностью до 0,5 градуса. Управление устройством осуществлялось с помощью высоковольтного 12-ти разрядного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), сопряженного с управляющей ЭВМ. Перед проведением исследований проводилось тестирование устройства с целью линеаризации его передаточной характеристики и определения гистерезиса.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Получены и экспериментально подтверждены аналитические зависимости определения сигнального поля фаз без формирования корреляционных полос на основе создания референтного фазового поля недеформированного состояния объекта. Показано, что определение фазы каждой точки локально-независимо. Усреднение результатов по всему полю не требуется, за счет этого повышается точность измерений. Диапазон измерений ограничивается конечным размером приемной апертуры, вызывающим искажения опорных волн.

2. Показано, что использование различных окон считывания информации при фотоэлектрическом преобразовании сигнала в исследованиях вибрационных характеристик объектов методами голографической и спекл-интерферометрии с управляемым фазовым сдвигом обеспечивает повышение точности измерений за счет повышения контраста спеклограмм.

3. Для увеличения динамического диапазона измерения амплитуд вибраций разработан и реализован метод измерения вибраций, основанный на определении минимального периода видеосигнала и исключении погрешностей, связанных с не кратностью амплитуд вибраций четверти длины волны излучения лазера.

4. Предложены и реализованы в составе универсальной когерентно-оптической измерительной системы новые технические решения для автоматического определения статических и динамических смещений точек поверхности объекта. Проведен анализ и рассмотрены устройства ввода оптической информации с высокими метрологическими характеристиками и с увеличенной производительностью измерений.

**МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В
СЛЕДУЮЩИХ ОСНОВНЫХ РАБОТАХ**

1. Гурьев Л.П., Кунов В.М., Нечаев В.Г. Устройство ввода голографических интерферограмм в ЭВМ. // В сб.: "Голографические измерительные системы".- Новосибирск: НЭТИ, 1976 г.- С.93-99.
2. Гурьев Л.П., Нечаев В.Г. Об использовании диссекторов и ПЗС-матриц в устройствах ввода изображений в ЭВМ. // В сб.: "Голографические измерительные системы".- Новосибирск: НГУ-НЭТИ, 1978 г.
3. Гурьев Л.П., Нечаев В.Г. Устройство восстановления полутонных изображений с перфоленты. // В сб.: "Голографические измерительные системы".- Новосибирск: НЭТИ, 1980 г.-С.85-92.
4. Гурьев Л.П., Козачок А.Г., Нечаев В.Г. Устройство для отображения информации на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). А.с.№ 1022209 // Оpubл. 07.06.83. Бюл. № 21. Приоритет от 21.01.81 г.
5. Гурьев Л.П., Козачок А.Г., Нечаев В.Г. Фотометр. А.с. № 1116325 // Оpubл. 30.09.84. Бюл. № 36. Приоритет от 15.07.83 г.
6. Гурьев Л.П., Евсеев Н.И., Нечаев В.Г., Солодкин Ю.Н. Устройство для определения смещений точек поверхности объекта. А.с. № 1165885.// Оpubл. 07.07.85. Бюл. № 25. Приоритет от 16.01.84 г.
7. Гурьев Л.П., Козачок А.Г., Нечаев В.Г. Устройство для оконтуривания изображений интерферограмм. А.с. № 1389010. // Оpubл. 14.04.88. Бюл. № 14. Приоритет от 27.10.1986 г.
8. Гурьев Л.П., Козачок А.Г., Карпюк Б.В., Нечаев В.Г., Солодкин Ю.Н. Способ определения амплитуд вибраций и голографическая система для его реализации. А.с. №4170605.// Оpubл. 30.04.88. Бюл. № 16. Приоритет от 30.12.1986 г.
9. Козачок А.Г., Гужов В.И., Нечаев В.Г., Котарский Б.С., Тарновский А.В. Разработка и исследование алгоритмов, методов и технических средств цифрового представления, сжатия и организации полутонных изображений в информационных картографических системах // Отчет по НИР Гос. рег. № г.р. 02.9.40 004672.-Новосибирск, 1994 г. - 44с.
10. Гужов В.И., Козачок А.Г., Нечаев В.Г., Котарский Б.С., Тарновский А.В. Разработка и исследование когерентно-оптических методов измерения и контроля деформаций, вибраций и формы поверхности объектов больших размеров сложной формы // Отчет по НИР/НГТУ. № г.р. 02.9.50 000181.- Новосибирск, 1994г. - 92с.
11. Гужов В.И., Нечаев В.Г., Корнев В.М., Штейнгольц З.И. Измерение абсолютных перемещений на основе растровых оптических линеек с целочисленным кодированием // Автометрия.-1995г.- №1.-стр.77-81.

12. Gushov V.I., Nechaev V.G. Deformation measurement by digital phase-shifting speckle interferometry // International Conference Photomechanics'95. Abstracts.- Novosibirsk.-1995.-P.23-24.
13. Gushov V.I., Nechaev V.G. In-plane deformation measurement by digital phase-shifting speckle-interferometry // Proc.SPIE.-1996.-Vol. 2791.-P.165-169.
14. Козачок А.Г., Гужов В.И., Нечаев В.Г., Котарский Б.С., Мишина Е.М. Разработка и исследование автоматизированных систем определения полей смещений и деформаций на поверхности деформируемых диффузно-отражающих объектов средствами цифровой спекл-интерферометрии // Отчет о научно-исследов. работе- Гос.рег. № 01.9.40 009101.-Новосибирск, 1996 г.-51с.
15. Гужов В.И., Козачок А. Г., Нечаев В.Г. Измерение деформаций диффузных поверхностей методом цифровой спекл-интерферометрии // Оптический журнал. -1996г. №10.-С.73-76.
16. Гужов В.И., Нечаев В.Г. Измеритель абсолютных перемещений. МПК 6G01B11/00 Патент № 2097685. Приоритет изобретения 13.5.1996г. Заявка 96109642/28 (015294), 1996 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений 27 ноября 1997 г. Бюл. №33 Новосибирский государственный технический университет.
17. Гужов В.И., Нечаев В.Г., Мишина Е.М. Коррекция нелинейных ошибок задания начальной фазы при расшифровке интерферограмм методом пошагового сдвига. // Автометрия.-1997.-№4.-С.35-42.
Gushov V.I., Nechaev V.G., Mishina E.M. Correction of nonlinear errors of initial phase setting in interferogram decoding by phase shifting interferometry. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.-1997.-No.4.
18. Гужов В.И., Нечаев В.Г. Расшифровка спеклограмм методом управляемого фазового сдвига. // Автометрия.-1998.-№6.