# НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Нечаев Виктор Георгиевич

УДК 620.178.5

# РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ С РАСШИРЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ

05.11.07 Оптические и оптико-электронные приборы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: кандидат технических наук, В.И.Гужов

Новосибирск-1998

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Анализ спекл-интерференционных методов	11
1.1. Интерференционные методы	12
1.2. Спекл-интерферометрия	15
1.2.1. Корреляционные спекл-интерферометры	21
1.3. Методы расшифровки спекл-интерференционных картин	24
1.4. Выводы	28
2. Метод расшифровки цифровых спекл-интерферограмм	29
2.1. Образование корреляционных полос	29
2.2. Расшифровка с выделением центров полос	33
2.3. Расшифровка методом управляемого фазового сдвига	35
<ol> <li>2.4. Методы расшифровки, ориентированные на природу образования спекл-структур</li> </ol>	41
2.5. Выводы	49
3.Разработка и экспериментальное исследование измерительных спекл-интерференционных систем	ς 51
3.1. Спекл-интерференционная система для определения смещений применением спектрального анализа	йс 51
3.2. Голографическая измерительная система для исследования вибрационных характеристик изделий	55

3.3. Спекл-интерференционная система для измерения смещений точек поверхности	69
3.4. Выводы	74
4. Технические средства обеспечения экспериментов	76
4.1. Устройства ввода оптической информации для когерентно- оптических систем	77
4.1.1. Критерии выбора устройств ввода.	77
4.1.2. Быстродействующие устройства ввода	83
4.1.3. Устройства ввода кадра изображения	84
4.1.4. Устройство ввода оптических изображений на основе телевизионных камер со стандартным телевизионным сигналом.	89
4.2. Устройства для обеспечения управляемого фазового сдвига	95
Заключение	98
Список использованной литературы	99
Приложение	112

## Введение

Актуальность проблемы. Развитие современных производственных технологий требует создания новых методов и средств получения измерительной информации. После изобретения голографии интенсивное лазеров И развитие получили голографические интерференционные измерения. Ранее применяемая только для оптически совершенных объектов интерферометрия оказалась пригодной и для исследования диффузно-отражающих деталей и конструкций. Бесконтактные и высокочувствительные методы голографической интерферометрии дают информацию по всему полю измеряемого объекта. Такие методы стали одним из средств исследования напряженно-деформированного мощных состояния объектов, их вибрационных характеристик, параметров рельефа, качества обработки поверхностей, дефектов структуры и т.д. /55,56,105,88/.

Дальнейшим развитием голографической интерферометрии стала цифровая спекл-интерферометрия. Метод основан на применении цифровых систем обработки изображений для корреляционного сравнения спеклограмм исходной и деформированной поверхности объекта. При этом удается получить картину корреляционных полос, несущих информацию о поле смещения на поверхности объекта /74,75,76,85/.

Исследования в области спекл-интерферометрии в настоящее время приобретают новый импульс В СВЯЗИ С появлением изображений, высокоразрешающих приемников а также малогабаритных твердотельных лазеров. Новая элементная база малогабаритные спекл-интерференционные позволяет создавать

системы, способные к работе в жестких условиях промышленной эксплуатации /67,69,89,91/.

При использовании интерференционных методов одной из наиболее важных и трудных задач является расшифровка спеклинтерферограмм, под которой понимается определение пространственной разности фаз волновых фронтов с последующим расчетом смещений или деформаций исследуемой поверхности /44/.

При расшифровке интерферограмм возникает ряд проблем, в частности, выбор начальной точки отсчета, разграничение периодов, т.е. выделение середин полос и выбора методики и способа определения дробной части полосы. Особые трудности возникают интерферограмм замкнутыми расшифровке с при интерференционными проблемы полосами, что создает С определением знака полосы. Поэтому для решения задачи требуется априорная информация о начальных точках и знаках полос /45,46/.

Спекл-интерференционные методы позволяют определять разности фаз волновых фронтов в более широких пределах, чем методы классической интерферометрии. При этом не требуется высокая разрешающая способность регистрирующих приемников. Актуальным является разработка новых методов, сочетающих спекл-интерференционных достоинства методов с высокой интерференционной точностью голографической И интерферометрии.

В настоящей работе предлагаются определения методы статических И динамических смещений с расширенным динамическим диапазоном для исследования напряженнодеформированного состояния объектов. Рассмотрены требования и пути реализации устройств обеспечения экспериментов. Оценены их метрологические характеристики.

5

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 (№№гос.рег.81029971, 080.03 06.15A задание 1850038872), AH CCCP координационными планами по проблемам (№№гос.рег.76028712, «Измерительные процессы системы» И 80944795, У00197) «Оптика. Квантовая электроника И (№№гос.рег.74050015, 77050215, 79000614).

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

Целью диссертационной работы является:

-исследование и развитие измерительных систем на основе метода цифровой спекл-интерферометрии;

-развитие метода управляемого фазового сдвига для анализа напряженно-деформируемого 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, с использованием референтного фазового поля от недеформированном состоянии;

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

Методы исследования.

6

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

<u>Научная новизна.</u> Разработаны новые методы расшифровки спекл-интерферограмм, позволяющие определять смещения точек диффузной поверхности в реальном времени с интерференционной точностью с использованием референтного фазового поля от ненагруженного объекта.

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 величин 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.

Разработана универсальная когеррентно-оптическая измерительная система с управляемым фазовым сдвигом для 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 "Морфизприбор" (г. Санкт-Петербург)

-в Сибирском научно-исследовательской 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 от ненагруженного 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 поверхностей.

Апробация работы.

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

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

<u>Публикации.</u> По результатам исследований опубликовано: 18 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 метода спекл-интерферометрии для определения фазовых характеристик волновых полей при отражении ОТ диффузных поверхностей, сформулированы задачи диссертационной работы. Во второй главе рассмотрены методы расшифровки цифровых спекл-интерферограмм методом управляемого фазового Исследованы метрологические сдвига. характеристики, рассмотренных методов, предложены способы повышения точности. В третьей рассмотрены главе автоматизированные интерференционные системы для определения полей смещений диффузных поверхностей, а также для исследования вибрационных характеристик объектов. Четвертая глава посвящена основным интерференционных элементам автоматизированных систем, наибольшее внимание уделено устройствам ввода оптической информации в ЭВМ, приведены исследования их метрологических характеристик и даны практические рекомендации для решения конкретных задач.

9

Автор благодарен профессору, докт.техн.наук Козачку А.Г. и канд.техн.наук Гужову В.И. за постоянную поддержку и помощь при проведении исследований.

кафедре Настоящая работа выполнена Оптических на Лаборатории информационных технологий В автоматизации экспериментальных исследований Новосибирского государственного университета. выражает Автор технического благодарность сотрудникам лаборатории за постоянную помощь.

# 1. Анализ спекл-интерференционных методов

Во многих отраслях промышленности широкое распространение получили бесконтактные когерентно-оптические методы для определения поля смещений или деформаций, к их числу относятся методы голографической интерферометрии (ГИ) и электронной спекл-интерферометрии (ЭСИ). Наиболее приспособленной к условиям промышленного производства оказалась цифровая спеклинтерферометрия (ЦСИ) /5,13,14,48,66,86/.

В цифровой сдвиговой спекл-интерферометрии /67/ в качестве референтного оптического сигнала используется пространственно смещенное (сдвинутое) спекл-изображение исследуемой поверхности. При ЭТОМ корреляционные полосы связаны С производными компонент вектора смещения поверхности ПО направлению сдвига, то есть непосредственно с деформациями объекта. Корреляционное сравнение позволяет получить картину полос, несущих информацию о поле смещений или деформаций на поверхности объекта /4,97,100/.

Для ввода спеклограмм в ЭВМ обычно используют видеосистемы с передающими телевизионными трубками, мишень которых совмещена с плоскостью изображения поверхности объекта и, таким образом, является плоскостью регистрации спеклограмм.

Возможность регистрации спеклограмм непосредственно с помощью телевизионных систем, обладающих относительно низкой разрешающей способностью, вытекает из того факта, что размеры спеклов можно легко изменять в эксперименте, задавая разрешения без искажения информации о фазах положения исследуемой поверхности /10,25,57/.

11

Сочетание телевизионной регистрации спеклограмм с обработкой на ЭВМ позволяет практически мгновенно получать информацию о поле смещений или деформаций по картине корреляционных полос. При правильном выборе нагружения, поверхностные дефекты, имеющиеся у исследуемого объекта, проявятся как локальные искажения корреляционных полос. Таким образом, уже ПО аномалиям полос можно установить наличие дефектов и определить области их локализации. Однако, в большинстве случаев необходима количественная информация. Для этого необходимо выполнить расшифровку корреляционных полос, т.е. определить фазовый сдвиг, вызванный деформацией поверхности объекта и связанный с компонентами вектора смещений или их производными /58,59,65,66/.

В отличие от других когерентно-оптических методов, требующих предварительной фотообработки (например, методы голографической интерферометрии), цифровая спеклинтерферометрия может быть использована для дефектоскопии в реальном времени /3,13,98/.

С целью уменьшения погрешностей, связанных со спекл-шумом предложен метод цифровой спекл-интерферометрии, основанный на внесении управляемого фазового сдвига между предметным и опорным пучками в интерферометре еще до нагружения объекта.

## 1.1. Интерференционные методы

Волновая картина, полученная в когерентном свете, имеет спеклструктуру и только выбором характеристического размера этой структуры можно отнести проводимое исследование или к чисто интерференционным методам, когда ее не учитывают в силу малых размеров по отношении к считывающей апертуре, или же используют для получения информации, в случае, когда эти размеры соизмеримы. Основные методы обработки интерференционных картин используются и в спекл-интерферометрии /57/. Рассмотрим процесс получения интерференционных полос для диффузных поверхностей спеклов.

При интерференции двух когерентных световых волн интенсивность результирующего поля описывается выражением:

$$I(x,y) = I_0(x,y) (1+V(x,y)\cos(\phi_1(x,y)-\phi_2(x,y))),$$
(1.1)

где,  $V(x,y) = 2A_1A_2/(A_1^2+A_2^2)$ -видность,  $I_0(x,y)$  - интенсивность.

Измерить разность фаз возможно, если частота полос в (1.1) такова, что интерференционная картина может быть зафиксирована системой регистрации с некоторым конечным размером детектора. Методами классической интерферометрии можно исследовать лишь оптически совершенные объекты –зеркала, линзы, пластины.

Голографическая интерферометрия расширила возможности классической, позволив производить измерения диффузно отражающих объектов имеющих сложные формы /6,48,56,58,60,65/. Оптические свойства объектов, сложность их формы практически перестали играть роль, поэтому интерференционные методы оказались пригодными для исследования промышленных деталей и конструкций в заводских условиях.

Различают три основных метода получения голографических интерферограмм /27,28,43,70,71/:

<u>1.Двух экспозиционная голографическая интерферометрия.</u> На одну и ту же пластинку производят запись голограмм объекта в двух состояниях, например, до и после приложения статической нагрузки.

2.Голографическая интерферометрия с усреднением во времени. Метод усреднения основан на длительной экспозиции объекта, испытывающее циклическое вибрационное воздействие, во время которого происходит интерференция между совокупностью отдельных изображений. Наиболее четко на интерферограмме проявляются полосы, записанные при скорости объекта равной нулю, т.е. в крайних амплитудных положениях /94,95/.

<u>3.Голографическая интерферометрия в реальном масштабе времени.</u> Производится запись голограммы неподвижного объекта, после чего полностью обработанная фотопластинка возвращается на то же место в оптической установке, Затем исследуемый объект наблюдается сквозь голограмму. Любая деформация поверхности объекта приводит к возникновению интерференционных полос, наблюдаемых в реальном масштабе времени.

Для записи голограммы в дискретном виде необходимо разрешение порядка 1000-2000 линий на мм. Ограниченная разрешающая способность современных устройств ввода оптических изображений не позволяет производить непосредственный анализ голограмм /7/. Поэтому необходимы методы, для которых телевизионное разрешение является достаточным. К таким методам относится метод спеклинтерферометрии /42,53,54,61,67,90/.

# 1.2. Спекл-интерферометрия

При анализе спекл-структур можно выделить спекл-фотографию и корреляционную спекл-интерферометрию. Классификация основных методов спекл-интерферометрии приведена в таблице 1.

		Метод корреляционных полос				
Спекл-фотография		Фотоно-	Электрон-		Цифровая	
		ситель	ная		электрон-	
					ная	
Статические	Динамические	Статичес	жие Дин		Динамические	
Определение	Усреднение по	Определение		Усреднение по		
шага полосы	времени	числа полос		времени		
Фоторегистра-		Управляемый		Метод бегущих		
ция	Стробоскопи-	фазовый сдвиг		г полос		
несфокусиро-	ческая					
ванной спекл-						
структуры						
	Двухимпуль-					
	сная					

# Табл.1. Методы спекл-интерферометрии.

В каждом из этих методов оптически шероховатая поверхность наблюдаются в начальном и смещенном относительно него положениях и изучается картина интерференционных полос. В зависимости от способа регистрации и наблюдения интерференционной картины можно добиться, чтобы расстояние между полосами было чувствительным к локальным смещениям поверхности, или либо к первым или вторым производным этих смещений/4,16,42,49,52/.

Метод спекл-фотографии основан на последовательной регистрации, рассеянных от диффузно-отражающей поверхности когерентных световых пучков, на фотографической пластинке, до и после нагружения объекта. При восстановлении спеклограммы угловое расстояние между дифракционных полосами равно /69/

$$\alpha = \lambda/9$$
 (1.2)

Соответственно, расстояние г между полосами равно lα, где lрасстояние между фотопластинкой и фурье-плоскостью a 9=md, где m-увеличение оптической системы, a d-смещение объекта перпендикулярно оптической оси системы. /71,79/.

Для исследования вибраций применяется <u>метод спеклфотографии с усреднением во времени.</u> В случае /103/, если смещение является гармонической функцией времени, то распределение интенсивности в фурье-плоскости, как и для обычной голографической интерферометрии определяется как:

$$Icp(\alpha) = I(\alpha) J_0^{2} (2\pi A \sin \alpha / \lambda)$$
(1.3)

где I(α)-интенсивность волны, дифрагировавшей на спеклфотографии, полученной от стационарного объекта, J<sub>0</sub>-функция Бесселя нулевого порядка. А-интервалы между интерференционными полосами на гало.

В методе спекл-фотографии интерференционная картина образуется при освещении единственным световым пучком

фотопластинки, и для наблюдения корреляционной картины необходимо наличие промежуточного носителя принципиально информации. Если в схему интерферометра внести опорный пучок, то наблюдение корреляционных полос можно осуществлять без промежуточного носителя.

На рис.1 приведена схема интерферометра /72/, позволяющего получать интерференционные полосы чувствительные к смещениям предмета по нормали к его поверхности. Волны рассеянных поверхностями D1 и D2 ,интерферируют в плоскости изображения линзы L. Пусть  $U_1=u_1\exp(i\psi_1)$  и  $U_2=u_2\exp(i\psi_2)$ . комплексные амплитуды этих волн. Результирующая интенсивность J<sub>1</sub> волны в заданной точке плоскости изображения равна:



Рис.1 Схема корреляционного спекл-интерферометра чувствительного к смещениям, перпендикулярным плоскости предмета J

$$I_1 = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{0.5} \cos \psi,$$
 (1.4)

где  $I_1=U_1U_1^*$ ,  $I_2=U_2U_2^*$ ,  $\psi=\psi_1-\psi_2$ . Смещение поверхности D1 на расстояние  $d_1$  по нормали к ней приводит к изменению фазы на величину

$$\Delta \phi(\mathbf{d}_1) = 4\pi \mathbf{d}_1 / \lambda. \tag{1.5}$$

В результате интенсивность волны в данной точке равна:

$$J_1 = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{0.5} \cos(\psi + \Delta \phi(d_1))$$
(1.6)

Максимальная корреляция возникает вдоль линий, для которых  $d_1 = n\lambda/2$ , а минимум

$$d_1 = (n+1/2)\lambda/2.$$
(1.7)

Таким образом, изменения интенсивности соответствуют изменениям величины нормального смещения поверхности предмета d<sub>1</sub>. Возникающие при этом деформации поверхности объекта могут привести к появлению корреляционных полос.

Если фотопластинку заменить фотоприемником, то получим электронный корреляционный спекл-интерферометр. Выходной фотоприемника формируется сигнал ИЗ суммарной интерференционной картины, спроецированной на его фотокатод. Это так называемый метод формирования системы корреляционных методом сложения видеосигналов. При ЭТОМ полос нет необходимости в одновременном формировании наложенных друг на друга изображений спеклов. Такой метод применяется при наблюдении интерференционных полос с усреднением во времени,

или в двухдлинноволновой методике наблюдения интерференционных полос при определении формы поверхности, когда предмет одновременно освещается двумя волнами разной длины.

При сложении двух распределений спеклов, участки с наибольшей взаимной корреляцией дадут наиболее контрастную картину; с уменьшением корреляции падает контраст (видность), который достигает минимальной (но не равной нулю) величины, когда рассматриваемые две спекл-структуры не коррелируют. Напряжение V на выходе телекамеры пропорционально сумме.

$$V = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{0.5} \cos(\psi + \Delta \varphi/2) \cos(\Delta \varphi/2)$$
(1.8)

#### Корреляция картины живых интерференционных полос.

Видность полученных этим методом интерференционных полос довольно низкая. Максимальная видность полос получается, когда средний коэффициент пропускания негатива равен 0.5 /55/. При этом

$$\langle \mathbf{I}_{a} \rangle = 2 \langle \mathbf{I}_{1} \rangle^{2} / 3 + \cos \Delta \phi(\mathbf{d}_{1}),$$
 (1.9)

где  $\langle I_0 \rangle$  средняя интенсивность спеклов, а видность полос равна V=1/3.

Метод двух экспозиций корреляционной В спеклинтерферометрии. Коррелирующие собой между участки фотопластинки, для которых выполняется равенство  $I_1=I_2$ , ведут себя точно так же, как фотопластинка, на которой осуществляется Интенсивность однократная запись. дифрагированного света обращается дифракции определяемых В ноль при углах соотношением

$$\sin\alpha = (2n+1)\lambda/2\Delta X. \tag{1.10}$$

Наблюдая с помощью телекамеры усредненную по времени систему интерференционных полос, возникающую при колебаниях поверхности (период колебаний должен быть меньше времени послесвечения экрана т), получаем для гармонических колебаний интенсивность изображения:

$$J = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{0.5} J_0^{-2} (4\pi a_0/\lambda) \cos \psi.$$
(1.11)

Соответственно выходной сигнал фотоприемника после выпрямления будет иметь вид

$$B = K [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle J_0^2 (4\pi a_0/\lambda)]^{1/2} . \qquad (1.12)$$

Схема интерферометра для исследования вибраций приведена на рис.2. Величину а<sub>0</sub> можно определить, измерив интервалы между интерференционными полосами на гало. Как и в случае стационарных смещений, величина а<sub>0</sub> зависит от положения плоскости регистрации.

Методы корреляционной спекл-интерферометрии позволяют проводить исследования напряженно-деформированного состояния объектов. При этом, как показано выше, возникают трудности в наблюдении интерференционных полос из-за их низкого качества. Использовать методы можно если поднять контраст полос, а также отстроившись от спекл-шума. Обычно это достигается получением дополнительной информации об объекте. путем внесения в процесс измерения воздействий - сдвиг фазы опорного или предметного пучка, изменение геометрии интерферометра и т.д.

Рассмотрим примеры корреляционных спекл-интерферометров для исследований смещений и вибрационных характеристик.

## 1.2.1. Корреляционные спекл-интерферометры

На рис.1 приведена схема <u>интерферометра, чувствительного к</u> <u>нормальным смещениям</u>, фазовый сдвиг определяется соотношением (1.4). При произвольном направлении падающего пучка  $\mathbf{n}_0$  и направления наблюдения  $\mathbf{n}_s$  выражение для  $\Delta \phi$  будет:

$$\Delta \varphi = (2\pi/\lambda)(\mathbf{n}_0 - \mathbf{n}_s)\mathbf{d} \tag{1.13}$$

Изменяя направление наблюдения а, также формируя различными способами опорную волну можно получить интерферометры, чувствительные к смещениям в предметной плоскости. Определение производных статического смещения производится корреляционным спекл-интерферометром, устройством, с так называемым, разделением спекл-структуры /8,89/.

Для исследований вибрационных характеристик объектов применяется <u>интерферометр с гладким опорным пучком</u> рис.2. Такая схема особенно важна в электронной спекл-интерферометрии, а также для изучения колебания поверхности с усреднением по времени /95/.

Величина  $\Delta \phi$  определяется выражением

$$\Delta \varphi = 2\pi (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) d/\lambda \tag{1.14}$$

С помощью фотоприемника усредняется интенсивность полос за промежуток времени т. В результате:



Рис.2. Интерферометр с гладким опорным пучком.

$$I(t) = I(r) + I(r) + I(p) + 2[I(r)I(p)]^{0.5} \int_0^{\tau} \cos[\varphi_r + \varphi_s + 4\pi a(t)/\lambda] dt \ (1.15)$$

Где a(t) смещение точки поверхности предмета в момент времени t.

Для синусоидальных колебаний a(t)=Asinωt, и при выполнении условия 2πω/<τ получаем:

$$I(\tau) = I(r) + I(p) + 2[(I(r) I(p)]^{0.5} J_0^{-2}(4\pi a_0 / \lambda) \cos(\varphi_r - \varphi_s)$$
(1.16)

Усреднённое по большому числу спеклов значение  $I(\tau)$  является постоянной величиной, но контраст спеклов будет изменяться при изменении значения функции  $J_0^2$ . Если  $J_0^2=0$  то интенсивность меняется только при изменении величины I(r), тогда как при

максимальном значении  $J_0^2$  интенсивность меняется при изменении величины I(p).

Таким образом, изменение амплитуды колебаний проявляется в изменении контраста спеклов. Причем минимальный контраст соответствует условию:

$$a_0 = n\lambda/4, n = 1, 2, 3..$$
 (1.17)

Фактически удается наблюдать максимумы первых порядков. Как было показано выше при наблюдении в реальном времени контраст интерференционной картины низкий, когда оба пучка, опорный и предметный, имеют спекл–структуру. Применение гладкого опорного пучка позволяет поднять контраст интерференционной картины, что позволяет использовать данный тип интерферометра для исследований вибрационных характеристик объектов.

Приведенные данные позволяют заключить, что исследования напряженно деформированного состояния объектов методами спеклинтерферометрии успешно развиваются. Основные вопросы, которые необходимо решать ЭТО повышение видности корреляционных полос для расширения диапазона измерений, а также поиск способов использования информации, заключенной в картине спеклов.

# 1.3. Методы расшифровки спекл-интерференционных картин

Для определения смещений и деформаций поверхности объекта необходима расшифровка корреляционных полос. Использование традиционных методов расшифровки, основанных на анализе пространственной структуры полос, позволяет производить измерения фазовых характеристик с чувствительностью в пересчете составляющих, несколько длин волн источника освещения. Эти результаты значительно уступают величинам, характерным для голографической интерферометрии. Это связано с вымоким уровнем Использование спекл-шума. получения новых методов И расшифровки спекл-интерферограмм приблизить позволяет точность измерения смещений и деформаций поверхности объекта к методам голографической интерферометрии /75,76/.

Основные методы расшифровки интерферограм применимы и к спекл-интерферограмм. Это, расшифровке прежде всего, расшифровка С выделением центров полос, расшифровка С спектрального анализа, расшифровка методом использованием введения дополнительных референтных сдвигов, и с использованием набора различных длин волн или непрерывного изменения длины волны источника света.

Расшифровка с выделением центров полос. Метод заключается в измерении координат центров полос и определении их порядка /13,43,47,57/. Развитие компьютерной техники позволило частично автоматизировать выделение центров полос. При этом решаются вопросы, связанные с фильтрацией изображений, прослеживанием нумерацией центров полос, полос (интерактивно ИЛИ автоматически), аппроксимацией значений между полосами, определением необходимых параметров объекта /81/. К недостаткам метода можно отнести следующее: без участия оператора невозможно определить знак приращения фазы для интерферограмм сложной формы; точность выделения центров полос снижается из-за вариаций амплитуд интерферирующих волновых полей, из-за искажений, вызванных спекл-шумами, вибрациями, воздушной турбулентностью; методы апроксимации вносят произвол при определении фазы в промежутках между центрами полос; трудно определить и скомпенсировать дефекты интерферометра. Кроме того, в методе спекл интерферометрии уверенно можно выделять только темные полосы.

<u>Метод расшифровки спекл-интерферограм с использованием</u> <u>спектрального анализа</u> /83,99,101,102/. При получении интерферограмм или спекл-интерферограмм возможны полосы без замкнутых контуров в этом случае интенсивность картины может быть представлена в виде:

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos(2\pi f_0 + \phi(x,y)), \qquad (1.18)$$

Или I(x,y)=
$$a(x,y)+c(x,y)\exp(2\pi i f_0 x)+c^*(x,y)\exp(-2\pi i f_0 x),$$
 (1.19)

где \* - знак комплексного сопряжения и

$$c(x,y)=(1/2)b(x,y)exp(i\phi(x,y))$$
 (1.20)

После одномерного преобразования Фурье получим

$$G(f,y) = A(f,y) + C(f-f_0,y) + C^*(f+f_0,y) \quad , \tag{1.21}$$

где G,A,b,C –спектры Фурье, f-пространственные частоты.

Если a(x,y), b(x,y), c(x,y) имеют частоты намного меньше, чем  $f_0$ , то функция  $C(f-f_0,y)$  может быть выделена фильтрацией относительно  $f_0$ . На этом шаге исключается составляющая A(x,y), представляющая неравномерность освещенности по полю интерферограммы.

После сдвига на  $f_0$  и обратного преобразования Фурье, получим с(x,y) (1.20) Откуда фаза может быть определена:

$$\phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \arctan[\operatorname{Im}\{c(\mathbf{x}, \mathbf{y})\} \operatorname{Re}\{c(\mathbf{x}, \mathbf{y})\}]$$
(1.22)

Этод метод легко распространить для двумерного случая. Выражение (1.21) приобретет вид:

$$G(f,g)=A(f,g)+C(f,g)+C^{*}(f,g)$$
 (1.23)

Методы, основанные на анализе спектральных составляющих, точны и легко реализуемы, по сравнению с методом выделения центров полос, однако область применения ограничена пространственным разрешением спектров интерференционных картин. Метод описан /9,80,87,88/.

Метод расшифровки с применением пошагового фазового сдвига, основан на регистрации нескольких спекл-интерферограм при изменении фазы опорной волны на известные значения /84,91,93/. Существует два способа сдвига: дискретный сдвиг и непрерывный сдвиг. Дискретный сдвиг изменяет фазу светового пучка на некоторую величину. Затем осуществляется ввод установившегося значения интерференционной картины в компьютер. При непрерывном сдвиге фаза меняется линейно во времени. Значения интенсивности считываются с помощью интегрирующего детектора, который усредняет значения по мере изменения фазы /15,22,92/.

Используются формулы расшифровки с различным числом шагов в зависимости от требований, которые необходимо выполнить. Разработаны алгоритмы определения фаз вплоть до пятнадцати сдвигов/20,26,64,96/.

С развитием полупроводниковых лазеров появилась возможность производить расшифровку спекл-интерферограмм, используя возможность непрерывной перестройки частоты излучения. Что даёт возможность увеличить диапазон и точность измерений /74,104,105/. Основу метода составляет непрерывное изменение длины волны лазера.

Аналогично методам голографической интерферометрии, позволяющих определять <u>динамические смещения</u> существуют подобные методы и в спекл-интерферометрии: спеклограмма с усреднением во времени; стробоскопическая спеклограмма; двухимпульсная спеклограмма /68,73,81,82,85/.

Методы классической и голографической интерферометрии можно с успехом использовать для расшифровки спеклинтерферограмм, при условии подавления спекл-шума. Метод выделения спектральных составляющих может быть использован в измерительных системах без модификации.

Перспективным является метод с управляемым фазовым сдвигом, позволяющий поднять точность определения смещений диффузных поверхностей и их профиля/16,18,19/.

Для определения динамических характеристик объектов используются как традиционные голографические методы, так и специфические, применяемые только в спекл-интерферометрии (интерферометр с гладким опорным пучком) /36,42,86/.

#### 1.4. Выводы

При корреляционном сравнении исходной и деформированной поверхностей объекта методом цифровой спекл-интерферометрии удается получить картину распределения поля фаз, содержащую информацию о смещении или деформации исследуемой поверхности. Для получения количественной информации о полях смещений или деформаций необходимо произвести расшифровку спекл-интерферограмм.

По результатам проведенного анализа можно заключить, что для повышения точности определения смещений И деформаций диффузной поверхности объектов методами спекл-интерферометрии предпочтительным является метод с управляемым фазовым сдвигом. Решить поставленные задачи позволяет применение интерферометров, разработанных специально для методов спеклинтерферометрии.

Основные вопросы, которые необходимо решить – это повышение видимости корреляционных полос расширения диапазона изменений, подавление спекл-шума, а также разработка новых алгоритмов обработки информации, заключенной в картине спеклов.

# 2. Метод расшифровки цифровых спеклинтерферограмм

В данной главе рассмотрены и проанализированы алгоритмы расшифровки спекл-интерферограмм, а также рассмотрен высокоточный метод измерения фаз. /8,17,26,51,52/

### 2.1. Образование корреляционных полос

Рассмотрим метод цифровой спекл-интерферометрии, основанный на корреляционном сравнении двух спеклограмм, одна из которых соответствует исходному, а другая - деформированному состоянию поверхности объекта. Обозначим через

$$E_r(x,y) = A_1(x,y) \exp(j\phi_1(x,y)),$$
 (2-1)

комплексную пространственную амплитуду исходной волны, отраженной ОТ недеформированной поверхности объекта И спекл-изображение образующей В некоторой плоскости регистрации, совпадающей с плоскостью мишени передающей телевизионной трубки.

Обозначим

$$E_{p}(x,y) = A_{p}(x,y) \exp(j\phi_{p}(x,y)), \qquad (2.2)$$

комплексную амплитуду когерентного опорного пучка в той же плоскости. Тогда интенсивность спеклограммы исходной поверхности объекта можно представить в виде

$$I_0(x,y) = |(E_p + E_r)|^2 = A_r^2 + A_p^2 + 2 A_p A_r \cos(\varphi_p - \varphi_r), \qquad (2.3)$$

При нагружении объекта изменяются фазы световых волн, рассеянных отдельными элементами его поверхности в точку (х,у). Однако если смещение поверхности не слишком велико (отсутствует эффект декорреляции спеклов), то фазовые сдвиги световых волн, рассеянных от отдельных элементов поверхности объекта в одну и ту же точку можно считать одинаковыми. Тогда комплексную амплитуду волны формирующую спекл-изображение деформированной поверхности объекта можно записать как

$$E_{r}(x,y) = A_{r}(x,y) \exp\left[j(\phi_{r}(x,y) + \Psi(x,y)\right].$$
(2.4)

Обозначив через  $\Psi(x,y)$  фазовый сдвиг в точке, вызванный нагружением объекта. Отсюда, интенсивность спекл-картины от деформированной поверхности объекта можно записать как

$$I_{l}(x,y) = A_{r}^{2} + A_{p}^{2} + 2A_{p}A_{r}\cos(\varphi_{r} - \varphi_{p} + \Psi(x,y)) \quad .$$
(2.5)

Размер спеклов зависит от выбранного размера апертуры. Сигналы с низкочастотными составляющими проходят без искажений, в то время как высокочастотные составляющие сигнала искажаются, при этом картина будет носить спеклообразный вид. На рис.2-1 приведен типичный график по строке спеклограммы диффузного объекта, на котором хорошо видна структура спеклов.

В цифровой спекл-интерферометрии распределение освещенностей I<sub>0</sub>(x,y) и I<sub>1</sub>(x,y) в спеклограммах исходной и деформированной поверхностей объекта регистрируют

телевизионной системой, преобразуют в цифровую форму и вводят в компьютер для дальнейшей обработки.



Рис.2-1. Спеклограмма (негатив) и график распределения яркости по строке и по столбцу.

Алгоритм состоит в корреляционном сравнении на компьютере двух интенсивностей в соответствии с выражением:

$$I_{s}(x,y) = [I_{0}(x,y) - I_{1}(x,y)]$$
(2.6)

Из (2.5) и (2.6) следует, что

$$I_s = N - N\cos(\Psi)$$
 , (2.7)

где

$$N = 8A_{p}^{2}A_{r}^{2}\sin(\phi_{r} - \phi_{p} + \Psi(x, y)/2) \quad .$$
 (2.8)

Как видно из (2.8), в тех областях плоскости объекта, где вызванный нагружением фазовый сдвиг  $\Psi$  равен

$$\Psi = \pm 2i\pi, \qquad i=0,1,2,..., \qquad (2.9)$$

выражение (2.6) равно 0, а области, где это условие не выполняется, будут спеклоподобны. Таким образом, в полости изображения объекта формируется спеклообразная картина корреляционных полос (рис.2-2).



Рис.2-2. Корреляционная спекл-интерферограмма и график по строке.

Как видно из рисунка проследить можно, да и то с трудом, только темные полосы.

Распределение яркости в картине корреляционных полос, описывается выражением (2.6), где N отвечает за распределение спеклов, амплитуда A<sub>r</sub> и фаза  $\varphi_r$  (в случае диффузной поверхности),

а также, возможно, A<sub>p</sub> и φ<sub>p</sub> (для диффузного опорного пучка) определяют форму и размер спеклов в плоскости изображения.

## 2.2. Расшифровка с выделением центров полос

Методы расшифровки спекл-интерферограмм в основных чертах основываются на методах расшифровки интерференционных картин обычной фазосдвигающей интерферометрии. Это возможно, В выражение (2.6)потому что сглаживая можно получить подобную косинусоидальную зависимость выражению при интерференции двух пучков.

Одним из основных способов расшифровки является выделение центров полос/8/. Этот метод основан на определении разности фаз волн, рассеянных точкой поверхности до и после смещения, равной:

$$\varphi = 2\pi (\mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_{\rm H}) \mathbf{u} / \lambda, \qquad (2.10)$$

В то же время яркость точки является периодической функцией разности фаз ф и может быть выражена через число интерфереционных полос N следующим образом:

$$\varphi = 2\pi N \tag{2.11}$$

Одной полосой считается период изменения яркости. Приравнивая (2.10) и (2.11), получим

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_{\rm H}) = N\lambda \tag{2.12}$$

является Уравнение (2.12)исходным при расшифровке интерферограмм. Очевидно, позволяет определить что оно проекцию вектора смещения **и** на биссектрису угла между направлениями освещения  $\mathbf{r}_0$  и наблюдения  $\mathbf{r}_{\rm H}$ . Поэтому при расшифровке важную роль играют априорные данные о характере смещений или деформаций объекта. Самым простым является случай, когда смещение **u** совпадает по направлению с  $\mathbf{r}_0$  и  $\mathbf{r}_{\mathbf{h}}$ . Тогда из (2.12) следует, что  $\mathbf{u} = (\lambda/2)\mathbf{N}$ . Подчеркнем, что  $\mathbf{N}$  - это число полос, пробежавших через точку при ее смещении на величину и. интерферометрию Практически, если исключить В реальном времени, имеется неподвижная интерференционная картина и судить о числе полос N можно только косвенным образом. Если на объекте известны неподвижные точки или так называемая нулевая полоса, то N можно определить, считая число полос между неподвижной точкой и сместившейся. Естественно, что N может быть и дробным числом.

Сопоставление выражений (2.10) и (2.6) приводит к выводу, что описываемые ими системы интерференционных полос совпадают по форме.

Однако, в отличие от интерференции, при получении полос методом корреляционной спекл-интерферометрии уверенно можно выделить только полосы с нулевой интенсивностью. Это видно из формулы (2.8).

Распределение яркости в картине корреляционных полос диффузной поверхности несет информацию о величине смещения или деформации объекта. При правильном выборе нагружения можно по аномальному поведению корреляционных полос производить дефектоскопию различных конструкций в реальном масштабе времени. Однако, для получения количественной информации необходимо определять фазовый сдвиг ψ, связанный со смещением или деформированием объекта. Метод, основанный на выделении центров полос и на интерполяции значений между ними, приводит к большим погрешностям, поскольку из-за спекл-шума возникает неопределенность в положении центров полос. Большую точность обеспечивают методы, основанные на анализе в частотной области. Эти методы используются в тех случаях, когда достаточно просто обеспечить внесение несущей пространственной частоты. В 4 главе рассмотрена такая система, позволившая автоматизировать определение смещения точек поверхности объектов /29/.

# 2.3. Расшифровка методом управляемого фазового сдвига

С целью минимизации погрешностей, связанных со спеклшумом, рядом авторов было предложено вносить дополнительные фазовые сдвиги между предметным и опорным пучками. По аналогии с обычной фазосдвигающей интерферометрией, фиксируется распределение интенсивности недеформированной поверхности объекта. Затем, после нагружения, последовательно вносят между предметным и опорным пучками дополнительные фазовые сдвиги равные 0,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi$ ,  $3\pi/4$  и вычисляют картины корреляционных полос.

$$I_{s,k}(x,y) = |I_{ref}(x,y) - I_{def,k}(x,y)|$$
, (2.13)

где индексы k=1,2,3,4 соответствуют внесенным фазовым сдвигам. Модуль берется для удаления отрицательных величин. Было

предложено определить фазовый сдвиг Ψ, вызванный нагружением объекта, из отношения /26/

$$tg\Psi = (I_{s,4} - I_{s,2}) / (I_{s,1} - I_{s,3}), \qquad (2.14)$$

где  $I_{s,k}$  - картины корреляционных полос, усредненные по столь малым областям  $\Omega(x,y)$ , в пределах которых фазовый сдвиг  $\Psi(x,y)$ , вызванный нагружением объекта, можно считать почти постоянным. Фильтрацию необходимо применять, т.к. алгоритм (2.14) применим только для косинусоидальных распределений, из выражения же (2.8) видно, что распределение корреляционных полос имеет сложный характер.

Рассмотрим метод расшифровки, основанный на использовании пошагового фазового сдвига. Если значения фазовых сдвигов известны, можно определить разность фаз между опорными объектными пучками. Существует два способа сдвига: дискретный сдвиг и непрерывный сдвиг. Дискретный сдвиг изменяет фазу светового пучка на некоторую величину. Затем осуществляется ввод интерференционной установившегося значения картины В компьютер. При непрерывном сдвиге фаза меняется линейно во времени. Значения интенсивности считываются С помощью интегрирующего детектора, который усредняет значения по мере изменения фазы.

Фазовый сдвиг может быть реализован различными путями. На рис. 2-2 показана принципиальная схема оптической установки, в которой фазовый сдвиг задается перемещением зеркала, закрепленного на пьезокерамике.


Рис.2-2. Схема интерферометра Тваймана - Грина с пошаговым сдвигом.

Световая волна от источника, попадая на делительный куб, разделяется на опорный и объектный пучки. В опорном плече находится зеркало, закрепленное на пьезокерамике, предназначенное для внесения эталонных фазовых сдвигов. В выходной плоскости располагается массив детекторов, который фиксирует значения интенсивности в каждой точке. При различных фазовых сдвигах интенсивность интерферограмм  $\delta_i(x,y)$  можно представить в виде

$$I_i(x,y)=I_0(x,y)\{1+\gamma(x,y)\sin(\Delta/2)\cos(\phi(x,y)+\delta_i)\}=$$

$$=I_{0}(x,y)\{1+V(x,y)\cos(\phi(x,y)+\delta_{i})\},$$
(2.15)

где j=1,2,..., m и  $\delta_1=0$ .  $\Delta=\delta_i$ -  $\delta_{i-1}$  - фазовая разность от одного измерения до другого при интегральном изменении интенсивности. Для измерений при дискретных сдвигах  $\Delta=0$  и выражение (2.15) можно переписать в виде

$$I_{i}(x,y)=I_{0}(x,y)+I_{0}(x,y)V(x,y)\cos\phi(x,y)\cos\delta_{i}-I_{0}(x,y)V(x,y)\sin\phi(x,y)\sin\delta_{i}$$

$$(2.16)$$

Если фазовые сдвиги одинаковы в интервале от 0 до  $\pi$ , т. е.  $\delta_i=2\pi(j)/m$ , то фаза  $\phi$  может быть определена как

$$\varphi = \arctan \frac{\sum_{i=1}^{m} li \sin \delta i}{\sum_{i=1}^{m} li \cos \delta i}$$
(2.17)

Используются формулы расшифровки с различным числом шагов. *Трехточечные:* 

$$(I_2-I_3)\sin\delta_1 + (I_3-I_1)\sin\delta_2 + (I_1-I_2)\sin\delta_3$$
  
 $\phi = \arctan - . (2.18)$ 

$$(I_3-I_2)\cos\delta_1 + (I_1-I_3)\cos\delta_2 + (I_2-I_1)\cos\delta_3$$

При  $\delta_1=0^o$  ,  $\delta_2=120^o$  ,  $\delta_3=240^o$ 

$$\phi = \arctan \sqrt{3} \frac{(I_3 - I_2)}{2I_1 - I_2 - I_3}$$
 (2.19)

Для  $\delta_1 = \pi/4$ ,  $\delta_2 = 3\pi/4$ ,  $\delta_3 = 5\pi/4$ 

$$\phi = \arctan \qquad (2.20)$$

I<sub>1</sub>-I<sub>2</sub>

I<sub>3</sub>-I<sub>2</sub>

Четырехточечные:

Для  $\delta_1$ = -3 $\alpha$ ,  $\delta_2$ = - $\alpha$ ,  $\delta_3$ = $\alpha$  и  $\delta_4$ =3 $\alpha$ 

Наиболее простое выражение получается при  $\delta_1=0$ ,  $\delta_2=\pi/2$ ,  $\delta_3=\pi$  и  $\delta_4=3\pi/2$ 

$$\phi = \arctan \frac{(I_4 - I_2)}{(I_1 - I_3)}$$
 (2.22)

Пятиточечные:

Сдвиг между экспозициями  $\pi/2$ , фазовые сдвиги, соответственно равны - $\pi$ , - $\pi/2$ , 0,  $\pi/2$ ,  $\pi$ .

$$\phi = \arctan \frac{2 (I_2 - I_4)}{2I_3 - I_1 - I_5}$$
(2.24)

$$3I_2 - 3I_3 - I_4 + I_5$$

$$\phi = \arctan (2.25)$$

 $-I_1+I_2+3I_3-3I_4$ 

Шеститочечные:

$$4(I_2 - I_3 - I_4 + I_5)$$
  

$$\phi = \arctan - (2.27)$$
  

$$-I_1 + I_2 + 6I_3 - 6I_4 - I_5 + I_6$$

При расшифровках с непрерывным фазовым сдвигом, интенсивность суммируется во время определенного периода. Усредненную за некоторый период Δ, интенсивность интерференционной картины можно представить в виде:

$$I_{j}(x, y) = I_{0}(x, y) \{1 + \gamma(x, y) \operatorname{sinc}(\Delta/2) \cos[\phi(x, y) + \delta_{j}]\}.$$
(2.28)

Разность фаз можно определить по исходным спеклограммам без формирования картины корреляционных полос. Для этого без нагружения объекта вносят фазовые сдвиги α<sub>k</sub> между опорным и объектными пучками

$$I_{\text{ref,k}} = A_s^2 + A_f^2 + 2A_s A_r \cos(\Phi_s - \Phi_f + \delta_k), \qquad (2.29)$$

для определения спеклообразной фазовой картины  $\Phi_s$ - $\Phi_r$  в каждой точке(x,y). Индексы k соответствуют внесенным фазовым сдвигам.

Затем объект нагружается, фиксируется еще ряд спеклограмм со сдвигом  $\beta$  /26/

$$I_{def,k} = A_s^2 + A_r^2 + 2 A_s A_r \cos(\Phi_s - \Phi_r + \Psi + \beta_k), \qquad (2.30)$$

и находится поле Ф<sub>S</sub>-Ф<sub>r</sub>+Ψ. Вычитанием одного поля из другого находим фазовые значения  $\Psi(x,y)$ , вызванные деформацией объекта. Таким образом требуется регистрация 6 спеклограмм (3 до и 3 после внесения деформации) для трехточечного метода расшифровки (2.18) или 8 для четырехточечного(2.21). Основной причиной погрешности такого способа вычислений является то, что при прохождении через ограничивающую апертуру Iref.k и Idef.k, описываемые выражениями (2.29)И (2.30),существенно искажаются. Для получения приближенных значений деформации поверхности  $\Psi(x,y)$  приходится использовать низкочастотную фильтрацию.

# 2.4. Методы расшифровки, ориентированные на природу образования спекл-структур

Сглаживание корреляционных спекл-интерферограмм допустимо, если средний уровень спекл-шума одинаков в соответствующих областях усреднения Ω корреляционных полос.

$$N_1(\Omega) = N_2(\Omega) = N_3(\Omega) = N_4(\Omega) = N$$
. (2.31)

Это допущение равносильно предположению, что средний размер спеклов много меньше среднего размера областей усреднения. Однако, низкое разрешение телевизионных систем

оптических изображений, требует увеличения размера ввода спеклов. В действительности, средний размер спеклов становится соизмеримым со средним размером области усреднения, поэтому использование сглаживания не позволяет эффективно устранить спекл-шума. Из-за высокого влияние уровня спекл-шума использование традиционных методов расшифровки, основанных на анализе пространственной структуры полос, приводит к значительной погрешности. Резко снижается точность измерений, т.к. используются алгоритмы, не учитывающие различий в природе формирования интерференционных и корреляционных полос.

Предложен алгоритм, основанный на проведении нескольких фазовых сдвигов до и после нагрузки, что позволяет производить измерения поверхностных перемещений с интерференционной точностью /52/.

Ниже рассмотрена группа алгоритмов, разработанных с учетом природы возникновения корреляционных полос. Однако, в отличие от методов, описанных в предыдущих разделах, расшифровка не предполагает пространственной фильтрации.

Предположим, что перед нагружением объекта регистрируют распределение интенсивности  $I_{ref}(\alpha)$  в спеклограмме исходной поверхности объекта, полученной при внесении контролируемого фазового сдвига α между предметным и опорным пучками в спеклинтерферометре. После объекта нагружения регистрируют спеклограмму  $I_{def}(\beta)$  деформированной поверхности объекта при фазовом сдвиге В. Предполагается, что уровень нагружения объекта выбран таким, что эффект декорреляции спеклов отсутствует. (2.7)Выражение после некоторых преобразований можно представить в следующем виде:

$$I_{ref}(a)-I_{def}(b)=4 A_s A_r \sin(\phi_r - \phi_p + \Psi/2 + (\alpha + \beta)/2) \sin(\Psi/2 + (\beta - \alpha)/2) (2.32)$$

Откуда 
$$\tan(\Psi/2) = \frac{I_{\text{ref}}(\pi/2) - I_{\text{def}}(\pi/2)}{I_{\text{ref}}(0) - I_{\text{def}}(\pi)} = \frac{N\sin(\Psi/2)}{N\cos(\Psi/2)}.$$
 (2.33)

Т.е., если взять четыре спеклограмы, 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  $\pi$ , то можно определить фазовый сдвиг, вызванный нагружением объекта, при этом составляющие, зависящие от спекл-структуры, сокращаются.

Выражение (2.33) определяет значение половинного фазового сдвига от нагружения. Поскольку это значение определяется по модулю  $2\pi$ , динамический диапазон уменьшается в два раза. Для определения полного фазового сдвига  $\Psi(x,y)$ , вызванного нагрузкой, получено следующее выражение:

$$\Psi = \arctan(2(K_1)^2 - (K_2)^2 - (K_3)^2) / (K_3)^2 - (K_2)^2, \qquad (2.34)$$

где

$$K_1(x,y) = I_{ref}(\pi/4) - I_{def}(3\pi/4)$$
, (2.35)

$$K_2(x,y) = I_{ref}(\pi/2) - I_{def}(\pi/2)$$
, (2.36)

$$K_3(x,y) = I_{ref}(0) - I_{def}(\pi)$$
. (2.37)

Выражение (2.34) требует регистрации 6 спеклограмм: 3-х до нагрузки и 3-х после деформации объекта. Более простое выражение, имеющее те же характеристики:

$$\Psi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \arctan \frac{2K_2K_3}{(K_3)^2 - (K_2)^2} .$$
 (2.38)

Анализ знаков числителя и знаменателя позволяет расширить область определения arctan в (2.33) от 0 до  $2\pi$ .

Выражения (2.34-2.38) получены таким образом, что интенсивности света от шумовых составляющих диффузной поверхности взаимно сокращаются, поэтому усреднение в окрестности точек не требуется.

Выражение (2.38) требует регистрации только 4 спеклограмм: 2х до нагрузки и 2-х после деформации объекта. При этом необходимо внести всего два фазовых сдвига. Схема регистрации спеклограмм следующая: сначала фиксируется спеклограмма исходного объекта, затем после фазового сдвига  $\pi/2$  регистрируется вторая, затем объект деформируется, фиксируется третья и после внесения фазового сдвига  $\pi$  четвертая спеклограмма.

На следующих рисунках представлены результаты математического моделирования выражений 2.35-2.37.



Рис.2.3. Значения выражений для  $(K_1)^2$ ,  $(K_2)^2$ ,  $(K_3)^2$ .



Рис.2.4 График фазовых значений, определенных с помощью

выражения (2.38).





Рис.2.6. График фазовых значений, определенных с помощью выражений (2-38) после прохождения волновых полей через вырезающую апертуру.

На графике фаз видны точки погрешность в которых намного превосходит среднюю. Это происходит в тех точках, в которых видность V(x,y) меньше некоторого предела. Для алгоритма (2.38)

$$V(x,y) = \sqrt{\left(2(K_1)^2 - (K_2)^2 - (K_3)^2\right)^2 + \left((K_2)^2 - (K_3)^2\right)^2} / I_0 \quad (2.39)$$

Точки, в которых видность меньше некоторой заданной величины отбрасывались. Величина предела выбиралась так, чтобы отсекалось не более 5% всего количества точек. На рис.2.7 показан график фазовых значений после отбрасывания сбойных точек.



Рис.2.7. График фазовых значений после удаления 5% точек с низкой видностью.

Следует (2.38)подчеркнуть, что соотношение 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. Предложенный метод расшифровки в принципе отличается от способа корреляционного сравнения спеклограмм, поскольку не производится пространственного сравнения спеклов. Его можно рассматривать как интерференционный способ с ограничением спектра сигнала в частотной области.

На рис.2.8 показан график максимальных отклонений фазовых значений от действительных после отбрасывания 200 гармоник.



Рис.2.8. График максимальных отклонений фазовых значений, определенных по формуле (2.38), от действительных значений.

Максимальная величина ошибки определяется величиной выбранной апертуры, и видом фазового сдвига от приложенной нагрузки. Чем больше пространственных частот отсекается, тем больше ошибки величина при определении Для фаз. рассматриваемого случая (отсекается 200 гармоник,  $\Psi(x,y)$ -линейная функция) максимальная ошибка составляет 10 %.

Приведенный метод позволяет проводить измерения поверхностных перемещений диффузных объектов с точностью близкой к интерференционной /17,23/.

Для уменьшения ошибки необходимо уменьшить размер спеклов. Однако, при использовании традиционных методов расшифровки, размер спекла ниже некоторого предела, заданного разрешением устройств регистрации, уменьшить нельзя. При этом необходимо выбирать размер спекла таким, чтобы на один спекл приходилось несколько точек разрешения.

Как показали проведенные эксперименты, наиболее рационально производить ввод спеклограмм с минимальным размером спекла. Это достигается оптической системой с максимальным размером апертуры и высокой разрешающей способностью. Фильтрация будет производиться на приемном элементе фотоприемника по многим спеклам.

В этом случае результирующая картина будет формироваться усреднением выбранного числа единичных спеклов. Такая методика позволяет, во-первых, снизить величину искажений исходного фазового фронта и, во-вторых, использовать в оптических установках больший размер апертуры. Применение апертуры больших размеров позволяет увеличить разрешение систем и упростить получение спеклограмм, поскольку больший процент пропускаемой энергии снижаются требования к чувствительности устройств регистрации /2/.

В интерференционных методах необходимо, чтобы размер элемента датчика был таким, чтобы не возникало эффекта перекрытия спектров при дискретизации сигнала. Это определяет динамический размер анализируемого волнового фронта. При измерениях широкополосных сигналов необходимо уменьшить

48

элементарной площадки приводит размер датчика, что к необходимости применять более устройства ввода сложные оптических изображений. С помощью предложенной методики на элементарную площадку датчика одну может приходиться несколько спеклов. При этом возможно использование обычных телевизионных устройств ДЛЯ анализа волновых фронтов, отраженных от диффузных объектов.

В главе 4 описана система для контроля вне плоскостных деформаций, расшифровка спекл-интерферограмм в которой производится с помощью предложенной методики. Экспериментальная проверка показала, что точность предложенного метода составляет λ/20 - λ/30. Эти значения близки к точности интерференционных измерений.

#### 2.5. Выводы

В данной главе представлен новый метод расшифровки спеклинтерферограмм, использующий свойства формирования спеклограмм. Регистрация производится в каждой точке исследуемой поверхности, поэтому метод по своей сути является локальным.

В отличие от известных методов расшифровки интерференционных картин используется ограничение в частотной области анализируемых широкополосных сигналов. Поэтому разработанный метод можно использовать при измерении разности волновых фронтов, отраженных от диффузных поверхностей. Предложен ряд алгоритмов расшифровки с различным числом шагов. Исследованы их характеристики. Разработан алгоритм устойчивый к линейным ошибкам при задании фазового сдвига.

Получен локальный алгоритм для практического использования. Стало возможным проводить измерения поверхностных перемещений диффузных объектов методом спекл-интерферометрии с точностью близкой к интерференционной.

Измерительные системы, созданные на основе данного способа, обеспечивают точность измерения поля смещений сравнимую с голографическими измерительными системами. Однако, спеклинтерференционные системы значительно проще и лучше приспособлены к условиям производства.

## 3.Разработка и экспериментальное исследование измерительных спеклинтерференционных систем

Рассмотрим когерентно-оптические системы для проведения исследований напряженно-деформированного состояния объектов методами голографической интерферометрии, корреляционного сравнения и спекл-фотографиии.

### 3.1. Спекл-интерференционная система для определения смещений с применением спектрального анализа

Для определения смещений точек методом спекл-фотографии разработан способ и устройство для определения смещения точек /29/. поверхности объекта Сущность измерения смещения заключается определении В шага И угла наклона интерференционных полос с помощью двухкоординатного Фурьеанализатора распределения яркости интерференционных полос и блока регистрации. Блок схема измерительной системы приведена на рис.3.1.



Рис. 3.1. Система для определения смещений точек поверхности.

Фурье-анализатор управляется перестраиваемым генератором частоты. Анализатор реализован в виде акустооптического дефлектора, производящего поочередное сканирование дифракционной картины по координате X и Y, при этом интенсивность дифрагированной волны описывается выражением:

$$I=I(\xi) \{1+\cos [2\pi v (\xi-vt)]\}, \qquad (3.1)$$

где  $I(\xi)$ -распределение интенсивности В интерференционной картине, v-пространственная частота модуляции дефлектора, vскорость распространения звука материале дефлектора. В Отклоненный дефлектором световой поток поступает на фотоприемник. Переменная составляющая выходного сигнала Y(v) представляет собой Фурье-спектр интерференционной картины.

$$\mathbf{Y}(t) = k \int \mathbf{I}(\boldsymbol{\xi}) \cos[2\pi v \left(\boldsymbol{\xi} - vt\right)] d\boldsymbol{\xi} \,. \tag{3.2}$$



Рис. 3.2. Разделение частот в спектре Фурье.

Распределение Фурье-спектра имеет вид трех спектральных максимумов (Рис. 3.2). Средний максимум соответствует постоянной составляющей в интерференционной картине, а два боковые - частоте интерференционных полос  $v(\xi)$  по выбранному или Ү. Х Спектральные направлению максимумы имеют симметричную форму, а их ширина  $\Delta v(\xi)$  определяется числом интерференционных полос. Шаг интерференционных полос a(ξ) и частота интерференционных полос v, по выбранному направлению связаны следующим соотношением

$$a=L/v(\xi) \tag{3.3}$$

Смещение точек объекта в соответствии с выражением (1.2) можно представить в виде

$$\Delta \xi = \lambda L v(\xi)/m \tag{3.4}$$

Таким образом, измерив частоты  $v(\xi)$  по двум ортогональным направлениям, определяем смещение в выбранной точке поверхности объекта. При практической реализации устройства производится модуляция частоты сигнала управления Фурьеанализатора с частотой  $\Omega$ , при этом частота пространственной модуляции v интерференционной картины связаны следующим соотношением:

$$v = \Omega/2\pi v , \qquad (3.5)$$

отсюда

$$\Delta \xi = \lambda L \Omega / 2\pi \nu m . \qquad (3.6)$$

Измеряя частоту модуляции в момент появления сигнала с фотоприемника, определяем величину смещения по координате Х, Ү в выбранной точке поверхности. Для определения смещения в другой оператор точке производит смещение спеклинтерферограммы, после чего цикл измерений повторяют. Т.к. метод основан на анализе спектральных составляющих, то не требуется предварительная фильтрация от шумов. Область применения ограничена пространственным разрешением спектров спеклинтерференционной картины. Реализация предложенного метода позволяет значительно повысить производительность процесса измерения смещений при исследовании напряженнодеформированного состояния объектов.

# 3.2. Голографическая измерительная система для исследования вибрационных характеристик изделий

В основе разработанной системы /27,33,34/ лежит использование метода голографической интерферометрии в реальном времени и телевизионных передающих устройств с различными временными окнами считывания входной информации. Именно такое сочетание позволило создать универсальную систему, обладающую высоким быстродействием и точностью.

При использовании интерферометрии в реальном времени (метод "живых" полос) волну, рассеянную исследуемым объектом в начальном состоянии, записывают на голограмму. Затем наблюдают картину интерференции волны, восстановленной с голограммы, с волной, рассеянной объектом, подвергнутым воздействию, например, вибрациям /35

Усреднение голограммой широко используется для получения форм колебаний объектов (картин узловых линий), но требует знаний резонансных большого частот И числа голограмм. Усреднение "живых " полос дает менее контрастные изображения, зато на экране TV-монитора в реальном времени, меняя частоту вибраций объекта, можно получить не только все формы колебаний в удобном для экспериментатора виде, но и наблюдать процесс зарождения и исчезновения этих форм. Кроме того, усредненная картина позволяет сделать обоснованный выбор точек, в которых необходимо измерить амплитуды вибросмещений.

Достоинства метода усреднения "живых " полос /36/ при создании универсальной измерительной системы настолько существенны, что делают выбор практически безальтернативным.

Основные усилия при разработке системы были направлены на решение проблемы низкого контраста усредненной интерференционной картины. Для повышения контраста использовалась обработка сигнала в электрическом канале с помощью нелинейных фильтров.

Усреднение "живых" полос может производится различными способами: при наблюдении за счет инерционности глаза, при фотографировании с достаточным временем экспозиции. Но в системе наиболее целесообразно использовать интегрирующие электронно-оптические преобразователи. К ним прежде всего относятся трубки с накоплением заряда - видиконы и приборы с зарядной связью - ПЗС- матрицы /38/.

В голографической виброизмерительной системе в реальном времени, для получения численных значений вибросмещений в заданных точках, был выбран вариант счета «живых» полос с использованием электронно-оптического преобразователя «мгновенного действия» /37/.

Специфика измерения вибросмещений облегчает решение задачи счета интерференционных полос в реальном времени. Прежде всего, не требуется высокого быстродействия при переходе из точки в точку, т. к. смещение каждой из них периодически повторяется, и преобразователь может задерживаться в исследуемой точке необходимый промежуток времени. Это позволяет получить высокую точность измерения.

Очевидно, что амплитуда вибросмещения определяется числом полос, прошедших через точку наблюдения за четверть периода вибраций - от момента перехода через нуль до максимального значения. Если число полос велико, то можно не учитывать, что в размах амплитуды колебаний не укладывается целое число длин полуволн, а модулированный по фазе электрический сигнал имеет довольно сложный вид, показанный на рис.3.9. В этом случае неучет долей интерференционных полос не приводит к существенной ошибке измерения.

Если же число полос, определяемых размахом вибраций, мало, то приходится учитывать доли полос и для повышения точности измерения вибросмещений получать усредненное значение числа полос за четверть периода по многим периодам вибраций.

Таким образом, сочетание голографического интерферометра в реальном времени с электронно-оптическими преобразователями интегрирующего и "мгновенного" действия позволяет создать измерительную систему для исследования вибрационных характеристик в полном объеме.

Блок - схема такой системы представлена на рис.3.3. Луч лазера светоделительной пластинкой делится на опорный и объектный пучки. 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.3.3. Универсальная система для измерения вибрационных характеристик.

Усредненная интерференционная картина, преобразованная в электрический сигнал, через блок синхронизации и обработки поступает на телевизионный монитор и визуалируется 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.

Через блок управления ЭВМ выводит диссектор в исследуемую точку, указанную на мониторе, и в течение заданного времени, обеспечивающего достаточную точность измерения, производится счет интерференционных полос. Результаты измерений поля вибросмещений в удобном для экспериментатора виде выводятся на регистрирующее устройство или графический дисплей.

Применение этой системы для измерения вибрационных характеристик методами спекл-интерферометрии существенно упрощает оптическую схему, т.к. отпадает необходимость в изготовлении голограммы невозмущенного состояния объекта, а соответственно и освещающего ее оптического пучка. Но при этом контраст изображения значительно падает. Необходимо принимать меры для его повышения.

При создании системы уделялось повышенное внимание к увеличению контраста интерференционных полос. Анализ методов повышения контраста изображений и экспериментальное исследование этих методов показали, что наилучшие результаты дает дифференцирование видеосигнала и его суммирование с полученной производной. Если эта операция повторяется дважды, то происходит существенно улучшение видности форм колебаний на мониторе в результате усреднения «живых» полос интегрирующим устройством ввода.

На рис.3.4-3.5 показаны соответственно формы колебаний на экране монитора без коррекции и с коррекцией. Очевидно не только повышение контраста, но еще и "рельефность" полученного в результате коррекции изображения /31/.



а) Формы колебаний люка без коррекции.



б) Формы колебаний люка с коррекцией.



в) Форма колебаний люка без
 обработки



г) Форма колебаний люка с обработкой

#### Рис.3.4-3.7 Формы колебаний люка.

На рис.3.6, 3.7 приведены те же формы колебаний, полученные обычным методом усреднения за счет времени экспозиции при голографировании. Несмотря высокий контраст на этих изображений, можно отметить, что форма колебаний с коррекцией имеет преимущества, если учитывать человеческий фактор восприятия изображений. Кажущаяся объемность изображения форм колебаний оказывает благоприятное эстетическое воздействие, что немаловажно при работе оператора с измерительной системой.

Для увеличения точности при измерении малых смещений предложена голографическая система, реализующая способ определения амплитуд вибраций по минимальному значению периода интерференционных полос /30/.

В интерференционной картине бегущих полос изменение во времени яркости точки изображения поверхности вибрирующего объекта выражается формулой:

60

$$I(t) = 2I_0 \{1 + \cos[2\pi/\lambda(\mathbf{r_0} + \mathbf{r_n})\mathbf{U}(t)]\} , \qquad (3.7)$$

где U(t)-вектор вибросмещения,  $\mathbf{r_0}$ ,  $\mathbf{r_n}$  - единичные вектора наблюдения и освещения,  $\lambda$ - длина волны. Изменение яркости I(t) преобразуется в соответствующее изменение электрического тока i(t) на выходе диссектора. Для синусоидальных вибраций точки объекта

$$\mathbf{U}(t) = \mathbf{U}_0 \sin 2\pi f t \quad , \tag{3.8}$$

где *f*-частота вибраций.

При совпадении направления наблюдения и освещения, что практически выполняется, выражение (3.7) упрощается

$$i(t) = i_0 \{1 + \cos[(4\pi/\lambda)U_0 \sin 2\pi f]\}$$
 (3.9)

График изменения тока i(t) за один период вибрации показан на рисунке 3.8. Амплитуда вибросмещения определяется числом интерференционных полос, прошедших через точку наблюдения за период наблюдения.

Количество прошедших интерференционных полос при больших амплитудах велико. В этом случае счет целого числа полос позволяет с достаточной точностью определить амплитуду вибраций, и нет необходимости учитывать долю полосы.

Количество интерференционных полос, прошедших через точку наблюдения, а следовательно, и количество электрических импульсов за время измерения t<sub>изм</sub> будет:

$$n=4U_0 f t_{\rm W3M}/(\lambda/2)$$
 (3.10)

Откуда:

$$U_0 = n\lambda/8f t_{\mu_{3M}}$$
 (3.11)

Очевидно, что, сделав произведение f×t<sub>изм</sub>=const, мы получим простое выражение для определения U. Так для длины лазерного излучения равного 0,6328 мкм, выбрав время измерения равное 791 периоду вибрационного процесса, т.е. сделав f×t<sub>изм</sub>=791, получим:

$$U=10^{-4} n \quad (MKM) \tag{3.12}$$

где n количество интерференционных полос, прошедшихх через точку наблюдения за время измерения.

При малых амплитудах вибраций (порядка нескольких длин волн лазера) число интерференционных полос мало, поэтому для получения приемлемой точности измерения амплитуды вибрации необходимо учитывать дробные части полос. Задача эта довольно сложная и удобного метода решения ее, насколько нам известно, нет. Предложен и реализован другой способ измерения амплитуд вибраций, в котором вместо счета числа интерференционных полос производится измерение периода их следования и выбирается минимальный период, равный  $\tau_{min}$  (см. рис.3.8), соответствующий начальному положению вибрирующей точки. Из (3.9) видно, что i(t)=0,когда

$$\cos[(4\pi/\lambda)U_0\sin 2\pi f t] = -1 \tag{3.13}$$

Условие (3.13) будет выполнено при некотором  $t_1 = \tau_{min}/2$ . Следовательно:

$$\cos[(4\pi/\lambda)U_0\sin 2\pi f \tau_{\min}/2] = -1$$
 (3.14)

и, так как рассматривается "первый" ноль получаем:

$$(4\pi/\lambda)U_0 \sin\pi f \tau_{\min} = \pi \qquad (3.15)$$

Откуда

$$U_0 = \lambda / 4 \sin \pi f \tau_{\min} \qquad (3.16)$$

Таким образом, можно определить амплитуду вибросмещения наблюдаемой точки, измеряя значение минимального периода или максимальной частоты следования интерференционных полос. Для повышения точности измерения,  $\tau_{min}$  следует определять путем усреднения результатов измерений за множество периодов вибраций.

На рис.3.8 показана форма видеосигнала при вибросмещении исследуемой точки поверхности. Зависимость получена ИЗ выражения величины мгновенной яркости. При смещении точки колеблющейся поверхности на величину  $\lambda/4$  фаза выходного сигнала фотоприемника меняется на 180 градусов, в случае, если укладывается целое число длин полуволн, то измерение амплитуды очень просто. Для учета доли полосы измеряется промежуток Как приведенных ниже времени  $t_1$ ,  $t_2$  -  $\tau_{\min}$ . видно ИЗ экспериментальных данных выделение этого интервала возможно, хотя выходной сигнал очень зашумлен.



Рис.3.8. Изменение фототока при вибросмещении U.



Рис.3.9. Выходной сигнал диссектора при измерении амплитуд вибраций в точке поверхности пластины.

Было замечено, что неопределенность в определении периода приходится на область максимальной величины смещения, а в

предлагаемом методе измерение производится в момент максимальной скорости, где величина шумов меньше (см. рис.3.9), что позволяет поднять точность измерений.

Было разработано устройство выделения минимального периода в выходном сигнале диссектора. На рис 3.10 приведена его блоксхема.



Рис.3.10 Блок-схема устройства для определения амплитуд вибраций.

Интерференционные полосы в реальном времени, полученные в голографическом интерферометре ОТ вибрирующего объекта, преобразуются фотоприемником электрический В сигнал. Периодометр измеряет периоды колебаний электрического сигнала, и преобразует их в цифровой код. После окончания измерения интервала времени периодометр вырабатывает сигнал "конец преобразования". Схема сравнения сравнивает значение интервала, поступившего с периодометра, со значением ранее записанным в регистре. Если значение интервала на выходе периодометра меньше значения интервала ,записанного в регистре, на вход разрешения V

поступает сигнал разрешения, и, с приходом сигнала "конец преобразования" на вход С регистра, происходит запись в регистр значения интервала, поступавшего в регистр с периодометра. Затем производится измерение следующего интервала, выполняются операции сравнения и записи (или хранения) ранее записанного минимального интервала. Последовательно измеряя и сравнивая все текущие значения интервалов интерференционных полос за весь устройство выбирает цикл вибрации, наименьшее значение интервала. Решающее устройство вычисляет в соответствии с выражением (3.22) амплитуду вибраций в данной точке объекта и результат выдает на индикатор. Отметим, ЧТО система работоспособна только при гармонических вибрациях.



Рис.3.11. Расчетные формы выходных видеосигналов

Рис.3.12. Экспериментальные выходные сигналы диссектора.

Были проведены эксперименты ПО моделированию предложенного алгоритма на ЭВМ при различных частотах и величинах амплитуд колебаний. Полученные расчетные формы выходных сигналов фотоприемника приведены на рис.3.11. На рис.3.12 показаны реальные выходные сигналы диссектора, причем, оказалось, что достаточно легко подобрать частоты колебаний и их амплитуду, чтобы формы реальных сигналов полностью соответствовали расчетным формам выходных сигналов. Таким образом, допущения, принятые при разработке голографической виброизмерительной системы, оказались верны.



Рис.3.13. Выходные сигналы диссектора обработанные методом усреднения по 32 и 64 реализациям.

Более полное описание процесса колебаний требует учета так называемых начальных паразитных сдвигов, проявляющихся в появлении ложных набегов фазы. Это приводит к искажениям формы выходных сигналов фотоприемника и, в худшем случае, вообще к невозможности расчета амплитуд вибраций. Зависимость сигнала диссектора с учетом дополнительных фазовых сдвигов выражается соотношением

$$i(t) = 2i_0[1 + \cos(U_0 \sin(2\pi f t + \varphi) 4\pi/\lambda + \psi)]$$
 (3.17)

в предположении, что направления освещения, наблюдения и вибросмещения совпадают. Параметр φ характеризует фазовый сдвиг между колебаниями генератора механических колебаний, возбуждающего объект, и вибрациями точек поверхности объекта. Фазовый сдвиг ψ учитывает начальные интерференционные полосы, которые возникают в интерферометре в реальном времени из-за малых паразитных смещений голограммы относительно объекта.

Как видно из графиков, реальные сигналы имеют высокий уровень шума. Для увеличения отношения сигнал/шум использовались известные методы усреднения и цифровой фильтрации рис 3.12, 3.13.

Общий вид системы показан на рис.3.14.



Рис 3.14 Экспериментальная спекл-интерференционная система

Перспективным является использование в голографических измерительных системах целочисленных принципов обработки фазовых величин. Как следует из описания целочисленного интерферометра, для определения максимального вибросмещения достаточно определить фазу в пределах одной полосы в момент прохождения исследуемой точки через максимум. Для этого можно использовать управляемый фазовый сдвиг, и по нескольким измеренным значениям яркости в момент равенства вибросмещения максимальной амплитуде, найти значение фазы, не превышающее 2 $\pi$ /8/.

Экспериментальные результаты, полученные на предложенных системах, хорошо согласуются с модельными оценками. Дальнейшее развитие предложенных методик позволит расширить диапазон измерений и повысить их точность.

### 3.3. Спекл-интерференционная система для измерения смещений точек поверхности

В качестве измеряемого объекта использовалась пластина, один из концов которой был жестко закреплен, другой подвергался нагрузке. Нагрузка осуществлялась с помощью нихромовой нити, нагреваемой определенным значением тока. 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 /24-26,51,52/ Схема спекл-интерферометра для измерения смещений поверхности объекта показана на рис.3.15, а на рис 3.16 приведена фотография экспериментальной спекл-интерференционной установки.



Рис. 3.15 Схема спекл-интерферометра для определения смещений точек поверхности объекта

Свет от лазера расширялся линзами L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> и поступал на интерферометр Тваймана-Грина в одном плече которого, находилась диффузная поверхность, близкая по отражению к исследуемому объекту, закрепленная на пьезокерамике, в другом исследуемый объект. С помощью апертуры, находящейся перед формирующей изображение линзой L<sub>3</sub>, регулировался размер спеклов. Для перемещения опорной диффузной поверхности на пьезокерамику подавалось напряжение от цифро-аналогового преобразователя, управляемого от компьютера. Тарированная деформация объекта производилось устройством нагружения, величина нагрузки задавалась от ЭВМ.

Перед деформацией опорная поверхность сдвигалась на расстояния, соответствующие фазовым перемещениям 0,  $\pi/4$ ,  $3\pi/2$ . Запоминались изображения, соответствующие сдвигам. Затем объект нагружался, и вносился сдвиг, соответствующий  $\pi/2$ ,  $3\pi/4$ ,  $\pi$ . Таким образом, фиксировалось шесть кадров. Вычисление арктангенса (2.34) дает значение фаз пропорциональное смещению поверхности объекта от нагрузки.



Рис. 3.16 Общий вид экспериментальной установки.

На рис.3.17 а,б показаны картины корреляционных полос при фазовых сдвигах между опорными пучками 0,  $\pi/2$ , используемые для расшифровки по формуле (2.34). Картины интерференционных полос при сдвигах  $3\pi/2$  и  $3\pi/4$  аналогичны приведенным.



Рис.3.17. Корреляционные полосы при фазовых сдвигах между опорными пучками 0, π/2.

На рис.3.18 показано результирующее значение поля фаз, соответствующих смещению объекта.



Рис.3.18. Результирующее поле фаз.

Видно, что полностью преодолеть влияние спекл-шума не удалось. Это связано с эффектом декорреляции спеклов до и после нагрузки. Поэтому приходилось все же использовать некоторую фильтрацию исходных спеклограмм. Однако размер окна
фильтрации был на порядок меньше чем в случае обработки кореляционных картин при традиционных методах расшифровки. На рис.3.19 показаны поле фаз после низкочастотной фильрации с окном размером 5 элементов разрешения по координатам Х, У и трехмерный график этого поля. Если проводить расшифровку используя трехточечный или четырехточечный традиционный алгоритм необходимо провести сглаживание спекл-картины с окном 50 элементов разрешения, менее при ЭТОМ естественно не произойдет значительная потеря информации о поле смещения поверхности объекта.



Рис.3.19. Поле фаз после низкочастотной фильтрации исходных спеклограмм.



Рис.3.20. Трехмерный график смещения проской пластины.

Эксперименты фазового сдвига показали, что метод С использованием опорного фазового поля недеформированной поверхности объекта позволяет проводить измерения без сглаживания исходных спеклограмм. У исследователя появляется больше возможностей для выбора необходимого количества зависимости от параметров СДВИГОВ, В И вида измерений, подлежащих определению. Появилась возможность варьировать величины сдвигов, что расширяет возможности по определению смещений и деформаций поверхности. Точность определения смещений без обработки результатов составляет λ/10-λ/20 /17/.

#### 3.4. Выводы

Исследована система для измерения перемещений точек поверхности с использованием спекл-фотографии и анализа сигнала в частотной области. Применение аккусто-оптического дефлектора с блоком олределения смещений точек поверхности исследуемого объекта позволило отказаться от прецизионных оптикомеханических элементов, увеличить производительность и расширить динамический диапазон измерений перемещений без перестройки оптической схемы интерферометра.

Созданная универсальная голографическая система позволяет проводить измерения вибрационных характеристик изделий как с применением традиционных методик (метод усреднения во времени и метод "живых полос"), так и разработанным методом определения амплитуды вибраций по минимальному периоду в выходном сигнале фотоприемника, увеличивающим точность определения вибросмещений в несколько раз. Экспериментальная проверка методов позволяет заключить, что полученные предложенных теоретические зависимости хорошо согласуются c экспериментальными данными.

Проверены метрологические характеристики новых методик расшифровки корреляционных картин для спекл-интерферометров с управляемым фазовым сдвигом. Погрешность измерения смещений точек поверхности составила двадцатую часть используемой для освещения объекта длины волны. Это позволяет приблизить точность спекл-интерференционных измерительных систем к классическим интерференционным системам.

75

### 4. Технические средства обеспечения экспериментов

Для экспериментальной проверки предложенных алгоритмов и методов была разработана универсальная когерентно-оптическая установка, состоящая из:

- оптического квантового генератора;

- оптической установки;

- устройства ввода оптической информации для когерентнооптических систем

- устройства для обеспечения управляемого фазового сдвига.

В когерентного излучения качестве источника ДЛЯ гелий-неоновый ЛГ-38 экспериментов использовался лазер мощностью 50 мВт. В настоящее время появился новый вид когерентных источников – полупроводниковые лазеры, обладающие большой мощностью излучения И достаточной длиной когерентности для исследования объектов размером в несколько квадратных дециметров. Эти лазеры наиболее приспособлены для работ в промышленных условиях и для создания малогабаритных измерительных систем.

Оптическая установка выполнена на виброизолированном массивном металлическом столе с набором подставок и креплений собственной разработки с частичным использованием элементов из комплекта СИН (стол интерференционный)

# 4.1. Устройства ввода оптической информации для когерентно-оптических систем

#### 4.1.1. Критерии выбора устройств ввода.

Одним важнейших ИЗ элементов универсальной голографической системы являются устройства ввода оптической информации. Устройства ввода - это системы, предназначенные для преобразования оптического сигнала в аналоговый электрический сигнал, его оцифровку и ввод в ЭВМ. Обычно, они включают в себя: фотоприемник, т.е. преобразователь оптического (аналогового) сигнала в соответствующий электрический сигнал, устройства усиления И коррекции ЭТОГО сигнала. аналого-цифровой преобразователь, интерфейс связи и согласования с ЭВМ. С некоторыми допущениями можно представить, что в электронных спекл-интерференционных системах фотоприемники, согласованные с устройствами отображения, являются, своего рода, устройствами ввода.

Оптический сигнал является выходным для голографического интерферометра и несет информацию о волновых фронтах, рассеянных исследуемыми поверхностями. Эта информация является исходной для всех дальнейших расчетов и определения смещений, деформаций и т.д. Следовательно, достоверное преобразование информации определяет точностные характеристики системы в целом.

Рассмотрим используемые устройства. При исследовании вибраций методом живых полос (см. гл.3.2) необходимо следить за изменениями яркости в выбранных точках поверхности для вычисления величин амплитуд вибраций. После отстройки от помех и шумов выходной сигнал содержит информацию о количестве интерференционных полос, пробежавших через считывающую апертуру за единицу времени. Следовательно, для измерений высокочастотных составляющих колебаний объекта с большой амплитудой, необходимо применение устройств с высокими скоростями обработки сигналов. Например, при частоте 10 кГц и амплитуде колебаний 5мкм число пробежавших полос будет более 30, следовательно, полоса пропускания системы должна быть более 3мГц. Поэтому, необходимо быстродействующее устройство ввода /37,38/.

Важно отметить, что в виброизмерительной системе для определения вида форм колебаний объекта необходимо производить усреднение картины распределения яркости по всей плоскости наблюдения за отрезки времени, много большие периода колебаний поверхности. Это производится с применением фотоприемников, в которых выходной сигнал формируется с использованием эффекта ПЗС). накопления (видиконы, матрицы Следовательно, для виброизмерительной системы необходимо два различных ПО функциональным возможностям устройства ввода.

При исследовании смещений точек поверхности методом счета числа интерференционных полос требуется точное определения центра полосы. Точно также в методе спекл-интерферометрии необходимо производить измерение распределения яркости по всей плоскости наблюдения с высокой точностью и высоким разрешением. Остановимся несколько подробнее на специфике требований к устройству ввода для спекл-интерференционных исследований.

Разрешающая способность современных телевизионных видеосистем ограничена величиной тысячи телевизионных линий на фотокатод. Предел пространственного разрешения стандартных телевизионных систем равняется 625 элементам разложения по строкам и столбцам. При размере фотокатода 10 MM ЭТО соответствует разрешению ≈20 МКМ. Наиболее высокая пространственная частота  $f_{max}$  в спектре  $\psi_{s1}$  и  $\psi_{s2}$  определяется диаметром а апертуры линзы системы наблюдения; согласно выражению 1/fmax= $\lambda v/a$ . Если расстояние от линзы до предмета значительно больше расстояния от линзы до изображения, то величина *v* практически равна фокусному расстоянию линзы f, т.е. *v* ≈ f. Следовательно, минимальные размеры g спеклов в пространстве изображений равна g=1/f<sub>max</sub> ≈  $\lambda$ (f/a)= $\lambda$ NA, где NA -числовая апертура линзы.

Таким образом, чтобы спеклы имели достаточно большие размеры и могли быть разрешены видеосистемой, следует применять линзы с очень малой апертурой. В случае интерферометров с пучком, интенсивность гладким опорным спеклов является случайной величиной, а интенсивность опорного пучка слабо меняется в плоскости изображения. Необходимо добиться, чтобы боковое отклонение источника опорной волны из сопряженной точки было малым по сравнению  $\Delta x < l\lambda/x$ , где 1 - расстояние от линзы до изображения, а х -разрешение видеокамеры (обычно 15-20мкм). Продольное отклонение  $\Delta l$  источника из сопряженной точки должно быть  $\Delta l \ll \lambda l^2$  / ах. Чтобы видность коррекционных полос была максимальной, необходимо добиваться как можно меньше значений  $\Delta l$  и  $\Delta x$ . Боковое смешение приводит к более быстрому изменению фазы, чем продольное. Поэтому необходимо минимизировать боковое отклонение Δх.

Корреляционные полосы при сложении или вычитании сигналов возникают благодаря тому, что среднеквадратичное отклонение зависит от Δφ. При уменьшении контраста уменьшаются среднеквадратичные отклонения суммарного и разностного сигналов, поэтому уменьшается и видность полос. Пусть выходной сигнал с фотоприемника равен

$$V_{1,2} = V_0 + (V_{\text{kop}})_{1,2}, \qquad (4.1)$$

где V<sub>0</sub> соответствует I<sub>1</sub>+I<sub>2</sub> в выражении для интенсивности, (V<sub>кор</sub>)<sub>1,2</sub> -слагаемым  $2(I_1I_2)^{1/2}\cos\phi$  и  $2(I_1I_2)^{1/2}\cos(\phi+\Delta\phi)$ . Так как при смещении объекта V<sub>0</sub> не изменяется, то это слагаемое соответствует фоновому шуму. Следовательно, видность корреляционных полос будет максимальной при максимальном среднеквадратичном отклонении V<sub>кор</sub>. Величину V<sub>кор</sub> в заданной точке изображения г можно записать в виде

$$V_{\kappa op}(r)_{1,2} = k[I_1I_2)^{1/2} \cos(\phi + \Delta \phi)] \Delta A$$
 (4.2)

где  $\Delta$ А-площадь разрешаемого телекамерой участка изображения, kпостоянная. Если изменение  $\phi$  в пределах разрешаемой площадки  $\Delta$ А мало по сравнению с  $2\pi$ , то V<sub>кор</sub> при постоянном  $\Delta \phi$  изменяется в пределах  $\pm [k(I_1I_2)^{1/2}cos(\Delta \phi)]_{max.}$ . Данная величина связана со средними значениями I<sub>1</sub>, J<sub>2</sub>. Когда изменение  $\phi$  в пределах площадки разрешения составляет  $2\pi$  и выше, то значение V<sub>кор</sub> всюду приближенно равно нулю. Это значит, что в этом случае корреляционные полосы не наблюдаются.

Таким образом, для наблюдения полос видеосистема должна хотя бы частично разрешать присутствующие в разложении соѕф пространственные частоты. Это условие налагает ограничения на применяемые спекл-интерферометры с двумя пучками, имеющими выраженную спекл-структуру, а также на интерферометры, с гладким опорным пучком, а также и на выбор видеосистемы.

Для каждого типа видеоприемника существует оптимальное соотношение минимального И максимального видеосигналов. Отношение максимального светового сигнала к минимальному составляет 10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup>. Чтобы информация в спекл-структуре не терялась, необходимо максимально использовать динамический диапазон видеокамеры по интенсивности сигнала во всех точках спекл-картины/14/. В зависимости OT метода формирования интерференционной картины оптимальные соотношения между двумя пучками должны быть различными. Яркость спеклов в пределах изображения меняется случайным образом, пусть средняя яркость спеклов  $\langle I_{\rm T} \rangle$  а  $\sigma_{\rm T}$  - ее среднеквадратичное отклонение. Тогда при выполнении условия  $\langle I_{\scriptscriptstyle T} \rangle$ +2 $\sigma_{\scriptscriptstyle T}$  <  $I_{\scriptscriptstyle Hac}$  яркость спеклов в изображении будет ниже уровня насыщения в 95% точек. Так как,

$$I_{\rm T} = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos\phi, \ a \ \langle I_{\rm T} \rangle = \langle I_1 \rangle + \langle I_2 \rangle,$$
  

$$\sigma^2_{\rm T} = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle, \ \langle I_2 \rangle = k \langle I_1 \rangle, \ \gamma_{1,2} = \sigma_{12} / \langle I_{1,2} \rangle,$$
  
получим  $\langle I_1 \rangle [1 + k + 2(\gamma^2_1 + k^2 \gamma^2 + 2k)^{1/2}] < I_{\rm Hac}$ 
(4.3)

Наилучший контраст интерференционных полос достигается при различных значениях k. Так в методе вычитания видеосигналов, когда оба интерферирующих пучка обладают спекл-структурой,

81

оптимальное отношение сигнал/шум достигается при максимальном значении величины  $k^{0.5}\langle I_1 \rangle$ , которое является ограниченным в силу выражения (4.3). Полагая,

$$\langle I_1 \rangle [1 + k + 2(\gamma^2_1 + k^2 \gamma^2 + 2k)^{1/2}] = \rho I_{\text{Hac}}$$
, (4.4)

получаем отношение

$$S/N = qk^{0.5}\rho I_{\text{Hac}} / [1 + k + 2(\gamma^2_1 + k^2\gamma^2 + 2k)^{1/2}]$$
(4.5)

Так как оба пучка имеют спекл-структуру, то  $\sigma_{12} = \langle I_{1,2} \rangle$  и  $\gamma_{1=} \gamma_2$ . Следовательно:

$$S/N = q\rho k^{0.5} I_{\text{Hac}}/[3(1+k)]$$
 (4.6)

Это отношение максимально при k=1,ρ=1. Таким образом, необходимо, чтобы средние интенсивности световых пучков были одинаковы. В методе вычитания с применением гладкого опорного пучка обычно интенсивность гладкого пучка составляет 1/50 от максимальной интенсивности спекл пучка. Для получения максимального отношения сигнал/шум необходимо обеспечить работу фотоприемника вблизи уровня насыщения /64/.

Универсальная голографическая быть система должна укомплектована различными устройств видами ввода, хотя представляется возможным при некотором ухудшении использование универсального метрологических характеристик устройства. Использовались два устройства ввода, управляемые от одной вычислительной машины. Одно устройство производит медленный ввод оптической информации о поверхности объекта с

высоким разрешением и служит при исследованиях статических деформаций, а также для определения форм колебаний поверхности объекта методом усреднения во времени. Второе устройство позволяет осуществлять быстрое определение величины яркости в выбранной точке поверхности одной заранее объекта. Оба устройства совместно могут практически одновременно определять форму колебаний и величину амплитуды колебаний в каждой точке поверхности объекта при исследованиях вибрационных характеристик /37,38/.

Рассмотрим пути реализации различных устройств.

#### 4.1.2. Быстродействующие устройства ввода

Быстродействующие устройства ввода требуют применения фотоприемников с малыми временами преобразования свет-ток, а шумами. Фотоприемник, удовлетворяющий также С малыми большинству применений, должен обладать очень низкой пороговой чувствительностью, линейной передаточной характеристикой и иметь динамический диапазон не менее 10000. Лучше всего всем требованиям удовлетворяют фотоэлектронные поставленным умножители (ФЭУ). При специальном подборе и стабилизированном питании ФЭУ позволяют улавливать отдельные фотоэлектроны, а насыщение наступает при сигналах, превышающих нижний порог чувствительности более чем в миллион раз. Недостатки ФЭУ - это одноканальный прибор, требующий высокостабильного источника питания. Низкая скорость ввода информации, т.к. производится последовательный обход всех точек вводимого изображения. Передающие трубки типа диссектор, а также полупроводниковые фотодиоды уступают по приведенным параметрам ФЭУ, но для решения многих задач их применение предпочтительно /39,40/.

Быстродействующее устройство ввода на основе передающей телевизионной трубки типа диссектор приведено на Рис 4-1.

Достоинство использования диссектора: простота в управлении, быстрый съем оптической информации в выбранных точках поверхности, большой диапазон измеряемых амплитуд. Недостатки прибора: повышенный высокочастотный шум, неравномерность чувствительности по полю фотокатода, сложная отклоняющая система, наличие высоковольтного питания.



Рис. 4-1. Быстродействующее устройство ввода на основе диссектора.

#### 4.1.3. Устройства ввода кадра изображения

При исследовании нагруженно-деформированного состояния объекта методом спекл-интерферометрии необходимо обеспечить ввод изображения всей поверхности объекта с минимальными искажениями. В настоящее время наилучшими метрологическими характеристиками обладают устройства ввода на основе фотоприемников типа ФЭУ, перемещаемых по полю изображения прецизионным электромеханическим приводом. Эти устройства позволяют производить сканирование изображения размером в несколько квадратных дециметров с точностью позиционирования до 1мкм. Время ввода всего кадра с максимальным разрешением несколько часов /1,32/. Недостаток таких устройств: малая скорость ввода, сложность в изготовлении и эксплуатации, значительная стоимость.

Желательно использовать в устройствах ввода оптических изображений стандартные промышленные телевизионные камеры, использующие матричные фотоприемники, а также вакуумные передающие трубки (Рис. 4-2).

Были исследованы основные метрологические характеристики фотоприемников: реальная разрешающая способность, динамический диапазон передачи света, линейность передаточной характеристики, временная стабильность.

При внесении небольших доработок высококачественные передающие ТВ камеры могут быть использованы в устройствах ввода. Рассмотрим основные вопросы, которые необходимо учесть при разработке таких систем.

Структурная схема устройства ввода на основе стандартной телевизионной камеры приведена на Рис.4.2. Устройство состоит из быстродействующего аналого-цифрового преобразователя (ADC), блока синхронизации и коммутации, блоков динамической и буферной памяти, блоков для их управления и блока сопряжения с помощью ЭBМ. С быстродействующего аналого цифрового преобразователя аналоговый видеосигнал преобразуется В

выборок дискретизации последовательность С частотой И определяемой качественными разрядностью показателями устройства ввода. В настоящее время может быть достигнута точность до 14 двоичных разрядов при частоте до 100 мГц. Такие трудно обеспечить высокие параметры самим источником информации. Телевизионный сигнал из-за ограниченной полосы пропускания предварительных усилителей и качества передающих трубок не позволяет получить точность передачи более 8 двоичных разрядов при частоте дискретизации 20 мГц. Информация о всем поле изображения записывается и хранится в динамической памяти, фрагментами через буферную память и устройство a затем сопряжения с ЭВМ переписывается непосредственно в оперативную память вычислительной машины. Блок синхронизациии коммутации важнейшим устройства, обеспечиват является элементом OH считывание поступающей синхронную запись И на ВХОД информации, а также ее выдачу в ЭВМ.



Рис.4-2. Схема устройства ввода стандартных телевизионных

сигналов.

Наибольшее влияние на точность измерений при расшифровке спеклограмм методом корреляционного сравнения оказывает стабильность работы систем разверток камер по строкам и кадрам. Важность этого замечания следует из того факта, что при работе методом многоточечных алгоритмов, съем оптической информации производится за несколько циклов. В каждом цикле производится определенное изменение фазы в опорном пучке. Для обеспечения нормального ввода информации уход начала строки или кадра за время ввода не должен превышать 0.25 элемента разложения по строке или кадру. Это связано с природой образования спеклкартины. Расположение спеклов по координатам Х, У представляет случайную картину, зависящую как от формы самой поверхности, ее диффузности и характера освещения. При сканировании ПО координате Х или Ү спекл-картины, величина выходного сигнала изменяется значения фотоприемника ОТ минимального ДО максимального, при перемещении всего на ОДИН элемент разрешения. Хотя размер спеклов выбирается в несколько раз больше, чем считывающая апертура, сдвиг по координате даже на долю апертуры вызывает прыжок в изменении яркости, из-за нелинейной зависимости величины яркости по сечению спекла. Это приводит к значительному искажению величин смещений при расшифровке. Для первых, устранения этого явления: BO производилась принудительная (без автоподстройки) синхронизация работы передающей камеры и системы оцифровки изображения в ЭВМ и, во вторых, выбирался оптимальный размер спеклов. Это достигалось подбором размера вырезывающей диафрагмы. Проверка качества синхронизации и шума тракта оцифровки производились корреляционным сравнением двух спеклограмм одного и того же объекта. При хорошем качестве синхронизации и малых шумах тракта преобразования видеосигнала, шум в разностном сигнале должен не превышать двух-трех младших разрядов.

Геометрические искажения не столь важны, так как их всегда можно учесть при дальнейшей обработке. В настоящее время с появлением высокоразрешающих твердотельных матриц вопрос геометрических искажениях, связанный с нелинейностью отклоняющих систем фотоприемников, практически снят, так как они выполнены с высокой точностью.

Матричные фотоприемники имеют недостатки, связанные с зависимостью выходного сигнала от координаты точки считывания. Кроме того, они имеют небольшой диапазон передачи яркости /77,78,106/.

Для обеспечения высокого разрешения можно применять в устройствах ввода линейные приемники оптического излучения, позволяющие достичь разрешения 10000 элементов по строке. Обычно эти фотоприемники сопрягаются с электромеханическим приводом для сканирования по ортогональной координате, при этом, используя специальные методы, можно добиться разрешения до 12 разрядов по яркости.

Для разработки компактных устройств было исследовано несколько типов кремниевых фотоприемников: единичных фотодиодов, матричных и линейных фотодиодных приемников. Эти устройства позволяют отслеживать мгновенные изменения интенсивности по полю изображения.

Было предложено использовать устройство для измерения яркостей в большом динамическом диапазоне с компенсацией темновых токов на основе фотодиодов /41/. 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.

#### 4.1.4. Устройство ввода оптических изображений на основе телевизионных камер со стандартным телевизионным сигналом.

Для обработки и расшифровки изображений в лаборатории была разработано и изготовлено универсальное электромеханическое устройство ввода, позволяющее использовать В качестве ΤV фотоприемников стандартные камеры (a также другие фотоприемники). Размер сканирования изображения 100x100 мм. Вывод в точку сканирования осуществляется электромеханическим приводом на основе шаговых двигателей. Абсолютное значение линейным координаты точки ввода измерялось датчиком перемещений с использованием целочисленного кодирования для увеличения точности ввода координат /11,21,23,28/.

В действующей установке применялась измерительная телевизионная камера типа КТМ с приемной трубкой типа видикон. Существующие геометрические искажения тестировались для каждой камеры и удалялись программным способом.

Устройство предназначено для ввода кадра изображения в телевизионном стандарте в формате 625х625 точек по полю изображения, число уровней квантования видеосигнала 8 бит. Ввод производится в темпе телевизионной развертки с отображением оцифрованной информации на мониторе. На Рис.4-3 показан общий вид устройства.



Рис.4-3. Устройство ввода оптической информации на основе TVкамеры и электромеханического привода.

На рис.4-4 показана схема устройства.



Рис.4-4. Блок схема электромеханического устройства ввода.

Устройство состоит из перемещаемого с помощью ходовых винтов предметного стола. Ходовые винты вращают приводы по X, Y, выполненые на шаговых двигателях. Точный контроль координат считывания производится датчиками абсолютных перемещений. Ввод исследуемого изображения в ЭВМ производится с помощью стандартной телекамеры. Телекамера сопряжена с ЭВМ через устройство ввода. С помощью блоков сопряжения с ЭВМ и управления приводами осуществляется перемещение предметного стола в точку съёма информации. После оцифровки фрагмента изображения производится перемещение камеры с помощью механического привода. С целью уменьшения геометрических искажений, измерение координат осуществлялось с помощью целочисленного измерителя перемещений /11,50/, а при обработке применялись программы сшивки фрагментов.

Изображение сканируется, управляемыми от компьютера шаговыми двигателями, с дискретностью 6.25 мкм. Оптическая система проецирует его на фотокатод телекамеры, где производится оцифровка изображения. Размер элемента разрешения меняется от 22 мкм до 400 мкм и определяется штатным объективом.

Рассмотрим геометрические погрешности, определяемые типом фотоприемника и пути их уменьшения. В разработанном устройстве производится как чисто механическое сканирование плоскости изображения шаговыми двигателями, так И электронное сканирование проектируемого фотокатод фрагмента на изображения. При использовании высококачественной оптики погрешности от аберраций оптической системы много меньше, чем искажения от отклоняющих систем фотоприемника. Погрешность координат обусловлена преобразования будет как качеством электромеханического привода, так и нелинейными искажениями растра телевизионной камеры /12/.

Механическое перемещение телекамеры обеспечивается шаговыми двигателями, с дискретностью 6.25 мкм и контролируется датчиками абсолютных перемещений, следовательно, точность

91

вывода считывающей апертуры будет определяться датчиком перемещений и качеством камер.

Вырабатываемый TV сигнал содержит информацию и яркости по конец строкам, причем начало И строк и кадра задается соответствующими сигналами врезок синхроимпульсов. Таким образом, очень важно, при кодировании видеосигнала обеспечить точную привязку точки считывания ПО строке и кадру К синхроимпульсам. Генератор частоты квантования подстраивается к частоте строк. Поскольку частота квантования больше частоты строк в 512-1000 раз, то фаза генератора квантования будет иметь разброс к моменту прихода начала строк и возникает неопределенность в положении начала дискретизации точек по строке. В худшем случае, от строки к строке погрешность определения координат точки может превышать шаг дискретизации. Были предприняты меры ПО генератора стабилизации фазы квантования, что позволило обеспечить неопределенность положения точки, не более 1/4 элемента дискретизации.

Параметры стандартной TV камеры не позволяют использовать камеру непосредственно в качестве устройства ввода. Для проведения юстировки и измерения геометрических погрешностей на фотокатод телекамеры проецировалась система равноотстоящих полос, сформированных с помощью лазерного интерферометра. Это позволило не только отъюстировать телекамеру, но и определить поправочные коэффициенты для корректировки геометрических и нелинейных искажений.

Для улучшения характеристик были изменены характеристики системы отклонения. Нелинейность была уменьшена до 0,5%, а геометрические искажения до 1%. Камера позволяет вводить изображение с разрешением до 400 линий на экран. После

92

определения поправочных коэффициентов с помощью матрицы пересчета координат точность увеличивается до 600 линий на экран/49/.

При размере изображения 100х100 мм и при размере фотокатода 9х9мм число отчетов составит 5000х5000. Характеристики, оцифрованного таким образом кадра, будут определяться возможностью идентификации границ кадров, или сшивкой соседних изображений.

Геометрические погрешности сшивки ΜΟΓΥΤ быть кадров сведены К МИНИМУМУ только при применении измерителя Определим абсолютных перемещений. требования К такому Размер одного элемента измерителю. считывания видиконом составляет 9мм/500 = 18мкм. Шаровинтовая пара позволяет обеспечить точность позиционирования около 5мкм, поэтому для определения границ необходимо определять достоверного абсолютное положение с точностью не хуже 2,5 мкм /23/.

линейных Был применен И исследован измеритель работающий перемещений, на принципе фотоэлектрического считывания оптической плотности периодической растровой структуры. Для измерения точного значения положения точки считывания проводилось сравнение информационных сигналов с выхода датчика и интерференционного измерителя перемещений. Интерференционная картина вводилась в компьютер для контроля координаты точки сканирования. Расстояние между полосами определялось после пространственного усреднения по нескольким полосам. Экспериментальная установка обеспечивала измерения амплитуды информационных сигналов синуса и косинуса с разрешением 4096 точек. При этом линейная точность измерения

перемещений составляла около 0.1 мкм. Для устранений влияний внешних факторов на повторяемость результатов измерений были приняты специальные меры по температурной стабилизации установки, исключению турбулентности воздушной среды и защите от вибраций.

В результате установлено, что точность определения абсолютного положения лучше, чем 2,5мкм при перемещении в пределах 100мм.

Устройства ввода с использованием стандартных TV камер на матрицах ПЗС или видиконах позволяют передавать не более 256 градаций яркости при работе в стандартном телевизионном режиме, при 625 строках разложения. Чувствительность камер колеблется от долей люкса до нескольких люкс на мишени фотоприемника, зависимость преобразования свет-код линейна только в узком диапазоне изменения яркости. Для линеаризации передаточных характеристик необходимо применение корректирующих элементов или специальной корректирующей программы. Достоинство применения фотоприемников для ввода всего кадра - это быстрый ввод изображения /62,63/.

Для достижения высоких измерительных параметров перспективным является использование фотодиодных линеек и фотодиодных матриц, обеспечивающих как высокое разрешение, так и большой динамический диапазон передачи яркости при кодировке изображений. Применение полутоновых подобных устройств позволяет на несколько порядков увеличить скорость ввода по сравнению с одноканальными фотоприемниками при обеспечении точности определения координат считывающей апертуры, как и в механическом устройстве сканирования.

94

Подобные устройства могут найти применение для оцифровки практически любой оптической информации, например, аэрофотоснимков, карт /64/ и т.д.

## 4.2.Устройства для обеспечения управляемого фазового сдвига

Для обеспечения пошагового фазового сдвига можно использовать различные устройства. Сдвиг фаз производится оптического пути луча. Это изменение обычно изменением осуществляется либо изменением показателя преломления среды или просто изменением длины пути одного из формирующих интерференционную картину пучков Использовалось света. устройство, изменяющее длину пути пучка помощью с пьезопреобразователя /49/. Оно обеспечивает сдвиг фазы до 4π с точностью до 0,5 градуса. Управление осуществляется с помощью 12-ти высоковольтного разрядного цифро-аналогового (ЦАП), сопряженного с управляющей ЭВМ. преобразователя Структурная схема устройства приведена на рис.4.5.



Рис. 4.5 Устройство управления пьезокерамикой.

Перед проведением исследований проводилось тестирование устройства с целью лианеризации его передаточной характеристики и определения гистерезиса. Точность задания фазового сдвига в наибольшей степени определяет точность измерения фазы при определении смещений и деформаций исследуемой поверхности, поэтому тестирование должно производиться очень тщательно.

Для уменьшения погрешностей сдвига фазы, связанных с гистерезисом, производится обнуление регистров сдвига перед каждым заданием сдвига фазы. Производить предварительное тестирование пьезокерамики необходимо только для аттестации и при изменении в интерферометре. Текущие нестабильности в задании управляющих фазовых сдвигов вызванных изменением температуры и напряжений питания могут быть скорректированы. Коррекция производится расчетом сдвига фаз по формуле 2.17. Это решение обратной задачи по отношению к определению сдвига фаз вызванных нагружением исследуемого объекта. В этом случае без приложения нагрузки к исследуемому объекту определяем сдвиг фаз, вызванных как бы приложением нагрузки к пьезокерамике. Определив истинный сдвиг фаз в опорном пучке, можно произвести коррекцию напряжения, подаваемого на пьезокерамику для задания необходимого по расчетам угла сдвига, тем самым можно в несколько раз уменьшить погрешности от ошибок в его установке. Кроме предложенная упрощает того методика техническое исполнение системы для задания фазового сдвига без потери точности.

96

#### 4.3 Выводы.

В главе рассмотрены технические устройства и системы, необходимые для проведения исследований методами спеклинтерферометрии.

Определены критерии выбора приемных устройств для обеспечения высоких метрологических характеристик устройства ввода оптической информации при исследовании смещений или деформаций корреляционными методами.

Показана необходимость применения устройств ввода оптической информации с различными временными окнами считывания. Рассмотрены интегрирующие устройства, выполненные ПЗС-матрицы, фотоприемниках типа видикон И на быстродействующие устройства на передающих телевизионных трубках типа диссектор и полупроводниковых фотодиодных приемниках. Оценены их метрологические характеристики.

Предложена методика определения истинного угла сдвига фаз, устанавливаемого с помощью устройств задания управляемого фазового сдвига.

Приведены рекомендации для практического использования предложенных устройств.

#### Заключение

1. Получены и экспериментально подтверждены 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 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 некратностью 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.

#### Список использованной литературы

- Ахмаметьев М. А., Гурьев Л.П., Нечаев В.Г. Система технического зрения на основе Д В К Электроники ВУЗ с цветным графическим дисплеем.// Тезисы доклада на семинаре по применению оптико-электронных и волоконно-оптических приборов в народном хозяйстве. Москва 1989 г.
- Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем.// -Л.,"Машиностроение ", 1986, 223с.
- Проблемы оптического контроля /Витриченко Э.А., Лукин В.П., Пушной Л.А., Тартаковский В.А./ Новосибирск: Наука. Сиб. отдние, 1990.-351 с.
- Власов Н.Г., Смирнова С.Н.,Пресняков Ю. П., Выделение отдельных компонентов вектора деформации в интерференционных измерениях // Журналтехн.физики.-1973.-Т. 43, №5.1104-1106.
- 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.
- Герасимов С.И. Накладная голографическая интерферометрия для исследования полей деформаций и напряжений в элементах конструкций.// Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук.- Новосибирск, 1997.- 34с.
- Гужов В.И., Дружинин А.И. Программно-аппаратный комплекс сопряжения устройства микрофильмирования "КАРАТ" с ЭВМ в голографической измерительной системе// Голографические измерительные системы. Вып.3 Новосибирск.- 1980.- С.93-100.

- Гужов В.И., Дружинин А.И., Козачок А.Г. Нечаев В.Г. и др. Некоторые вопросы использования мини и микро-ЭВМ в системах автоматизации обработки когерентно-оптической информации// Автоматизация научных исследований/ Материалы 16 Всесоюзной школы по автоматизации научных исследований.-Горький.-1982.-С.43-46.
- Гужов В.И., Кузнецова И.В., Тимшин А.В., Солодкин Ю.Н., и др. Разработка и изготовление цеховой системы для контроля плоскостных оптических элементов// Отчет о о научно-исследов. работе.- Гос.рег. № У53123.-Новосибирск.-1990.-80с.
- 10.Гужов В.И. Разработка и исследование когерентно-оптических измерительных систем для определения фазовых характеристик волновых полей.// Диссертация на соискание ученой ст. к.т.н.-Новосибирск.- 1987.- 160с.
- 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.-1995.-№1.-С.77-81.
- 12.Гужов В.И. Нечаев В.Г. Измеритель абсолютных перемещений.// Патент НГТУ МПК 6G 01 В11/00 № 96109642/28 (15294) .Приор. 08.1 97.
- 13.Гужов В.И., Лопарев Е.Г., Солодкин Ю.Н. Автоматизация получения, обработки и расшифровки спекл-интерферограмм// Интерференционно-оптические методы механики твердого тела и механики горных пород/ Тезисы докладов Всесоюзного семинара.- Новосибирск: ИГД СО АН СССР.-1985.-С.142.
- 14. Гужов В.И., Котарский Б.С. Влияние разрядности при квантовании интенсивности на погрешность определения фазы в

системах с управляемым фазовым сдвигом// Автометрия.-1990.-№2.-С.70-72.

- 15.Гужов В.И., Козачок А.Г., Лопарев Е.Г., Орлов М.Г., Чернобровин В.В. Голографическая измерительная система для определения поля разности фаз методом контролируемого фазового сдвига// Автометрия.-1986.- №2.- С.116-118.
- 16.Гужов В.И., Кузнецова И.В., Тимшин А.В., Солодкин Ю.Н., и др. Разработка и изготовление цеховой системы для контроля плоскостных оптических элементов// Отчет о о научно-исследов. работе.- Гос.рег. № У53123.- Новосибирск.- 1990.- 80с.
- 17.Гужов В.И., Нечаев В.Г., Мишина Е.М. Корекция нелинейных ошибок задания начальной фазы при расшифровке интерферограмм методом пошагового сдвига// Автометрия.-1997.-№4.-С.35-42.
- 18.Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах.//-Автометрия.-1992.-6.-стр.24-30
- 19.Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Способ определения разности фаз.//-Заявка 4087285. А.с. № 1357712, 1986,- БИ.- №45.- 1987.
- 20.Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Способ определения разности фаз световых волн//- А.с. № 1619033. 1990.Б.И.-№1-1991г.
- 21.Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Оценка точности целочисленного интерферометра// Оптика и спектроскопия.-1988.-т.65.-вып.6.-С.1313-1316.
- 22.Гужов В.И., Солодкин Ю.Н., Тимшин А.В., Чернобровин В.В., Ягнокова Т.В. Разработка и исследование когерентной измерительной системы с управляемым фазовым сдвигом для автоматизированного контроля формы высокоточных оптических

поверхностей// Отчет о НИР о научно-исследов. работе.- Гос.рег. №У28465.-Новосибирск.-1988.-97с.

- 23.Гужов В.И., Козачок А.Г., Нечаев В.Г. Разработка и исследование абсолютных преобразований линейных перемещений с кодированием на основе целочисленной теоремы об остатках // Тезисы докладов Международной конференции "Измерительные информационные системы". М., 1994 г.
- 24.Гужов В.И., Кузнецова И.В., Солодкин Ю.Н. Интерференционное устройство для измерения перемещений объектов// А.с. № 1663416, 1991.- №26.-1991.
- 25.Гужов В.И., Козачок А.Г., Цигуткин В.И. Автоматизация обработки интерферограмм в когерентно-оптических измерительных системах// Проблемы электротехники. Автоматика/ Тезисы докладов конференции с международным участием.- Новосибирск.-НГТУ.-1993.-С.59-61.
- 26.Гужов В.И., Козачок А. Г., Нечаев В.Г. Измерение деформаций диффузных поверхностей методом цифровой спеклинтерферометрии.// Оптический журнал. -1996г. №10.-С73-76.
- 27.Гурьев Л.П., Гужов В.И., Дружинин А.И., Козачок А.Г., Логинов А.В., Натальченко В.И., Нечаев В.Г., Сарнадский В.Н. Принципы построения систем автоматизации получения и обработки когерентно- оптической информации на базе мини- и микро-ЭВМ. // Тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции по теории кодирования и передачи информации. - Москва- Куйбышев: 1981 Г.
- 28.Гурьев Л.П., Гужов В.И., Де С.Т., Дружинин А.И., Ким В.Ф., Козачок А.Г., Логинов А.В., Нечаев В.Г., Павликов А.И., Солодкин Ю.Н и др. Универсальная измерительновычислительная система для обработки голографических

изображений// Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ/ Материалы 6 Всесоюзной конференции.-Новосибирск: ИАЭ СО АН СССР.-1981.-С.122-123.

- 29.Гурьев Л.П., Евсеенко Н.И., Нечаев В.Г., Солодкин Ю.Н. Устройство для определения смещений точек поверхности объекта. А.с. № 1165885. // Опубл. 07.07.85. Бюл. № 25. Приоритет от 16.01.84.
- 30.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 от 30.12.86.
- 31.Гурьев Л.П., Козачок А.Г., Нечаев В.Г. Устройство для оконтуривания изображений интерферограмм//. Заявка № 41339093 от 27.10.86
- 32.Гурьев Л.П., Козачок А.Г., Нечаев В.Г. Исследование светотехнических характеристик фотоприемника "Эльбрус". Научный отчет по теме "Разработка и исследование комплекта аппаратуры для получения и обработки оптической информации. УДК 681.3.01.535 . № гос.рег. 81044795. ИНВ. № 0282.3.031008.
- 33.Гурьев Л.П., Козачок А.Г., Нечаев В.Г. Разработка и исследование голографической измерительной системы для анализа вибрационных характеристик изделий. Научный отчет по теме ЛГС- 3-84/А. УДК 620.178.5: 778.38:621.397. № гос. рег. 01840035541.
- 34. Гурьев Л.П., Козачок А.Г., Нечаев В.Г. Разработка и исследование голографической измерительной системы для диагностики изделий при циклических испытаниях. Научный отчет по теме ГВС- 1-85/А. УДК 620.178.5,38: 621.397. № гос.рег. V 17700.

- 35.Гурьев Л.П., Карпюк Б.В., Нечаев В.Г., Поткин А.С., Солодкин Ю.Н. Голографическая система для исследования вибрационных характеристик изделий. Доклад на 6-ом Всесоюзном симпозиуме. Новосибирск, 1986 г.
- 36.Гурьев Л.П., Козачок А.Г., Нечаев В.Г., Солодкин Ю.Н. Об исследовании вибрационных характеристик голографическими методами в реальном времени//. Доклад на II Всесоюзной научнотехнической конференции " Применение лазеров в технологии и системах передачи и обработки информации ".- Ленинград: 1984 г.
- 37.Гурьев Л.П., Кунов В.М., Нечаев В.Г. Устройство ввода голографических интерферограмм в ЭВМ // В сб.: "Голографические измерительные системы".- Новосибирск: НЭТИ, 1976 г.
- 38.Гурьев Л.П., Козачок А.Г., Кунов В.М., Нечаев В.Г. Исследование двух типов устройств ввода в ЭВМ голографических изображений // Тезисы докладов Второй Всесоюзной научно-технической конференции "Фотометрия и ее метрологическое обеспечение". М.: 1976 г.
- 39.Гурьев Л.П., Нечаев В.Г. Об использовании диссекторов и ПЗСматриц в устройствах ввода изображений в ЭВМ. // В сб.: "Голографические измерительные системы".- Новосибирск: НГУ-НЭТИ, 1978 г.
- 40. Гурьев Л.П., Нечаев В.Γ. Устройство восстановления полутоновых изображений с перфоленты. В сб.: "Голографические системы".-Новосибирск: измерительные НЭТИ, 1980 г.

- 41.Гурьев Л.П., Козачок А.Г., Нечаев В.Г. Фотометр. А.с. № 1116325. // Опубл. 30.09.84. Бюл. № 36. Приоритет от 15.07.83. ".- Новосибирск: НЭТИ, 1980 г.
- 42.Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интеферометрия. -М.; Мир, 1986.
- 43.Козачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике.-М.."Машиностроение", 1984, 175с
- 44.Козачок А.Г. Голографические измерительные системы. -Диссертация на соискание уч.ст. д.т.н.-Киев.-1989.-36с.
- 45.Голографические измерительные системы. Вып.1 /Под ред. Козачка А.Г.- Новосибирск.-1976.- 100с.
- 46.Голографические измерительные системы. Вып.2 /Под ред. Козачка А.Г.- Новосибирск.-1978.- 160с.
- 47.Голографические измерительные системы. Вып.3 /Под ред. Козачка А.Г.- Новосибирск.-1980.- 126с.
- 48.Козачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике// - М.: Машиностроение.- 1984.-176с.
- 49.Козачок А.Г., Гужов В.И., Нечаев В.Г., Котарский Б.С., Тарновский А.В. Разработка и исследование когерентнооптических методов измерения и контроля деформаций, вибраций и формы поверхности объектов больших размеров сложной формы// Отчет о о научно-исследов. работе.- Гос.рег. №02.9.50 000181.-Новосибирск.-1994.-92с.
- 50.Козачок А.Г., Гужов В.И., Нечаев В.Г. Разработка и исследование абсолютных преобразователей линейных перемещений с кодированием на основе целочисленной теоремы об остатках// Измерительные информационные системы / Тезисы докладов Международной конференции.-Москва: Международное научно-

техническое общество приборостроителей и метрологов.-1994.-С.40-42.

- 51.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 полутоновых изображений в информационных картографических системах// Отчет по НИР ГОС.рег. № г.р. 02.9.40 004672.-Новосибирск.-1994.-44с.
- 52.Козачок А.Г., Гужов В.И., Нечаев В.Г., Котарский Б.С., Мишина Е.М. Разработка и исследование автоматизированных систем определения полей смещений и деформаций на поверхности деформируемых диффузно-отражающих объектов средствами цифровой спекл-интерферометрии// Отчет о научно-исследов. работе.- Гос.рег. № 01.9.40 009101.-Новосибирск.-1996.-51с.
- 53.Корнев В.М., Гужов В.И., Солодкин Ю.Н., Штейнгольц З.И. Использование управляемого фазового сдвига для определения рельефа поверхности// Методы контроля формы оптических поверхностей/ Тезисы докладов Всесоюзного семинара.-М.:МДНТП.-1989.
- 54.Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия.- М.:Наука.- 1979.- 136с.
- 55.Кольер Р. Дж., Беркхард С.Б., Лин Л.Х. Оптическая голография/ М.: Мир.- 1973.- 688с.
- 56.Оптическая голография/ Под.ред. Г.Колфилда: Пер. с англ.-М.:Машиностроение.- 1985.- 400с.
- 57.Островский Ю.И. Голография и ее применение// Л.: Наука.-1973.-180с.
- 58.Островский Ю. И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия.-М.: Наука.-1977.-339.

- 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., Шепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций.- М.:Наука.-1988.-248с.
- 61.Применение спекл-интерферометрии для контроля качества промышленных изделий: Методические указания.- Горький: ВНИИНМАШ Гф.- 1980.- 137с.
- 62.Системы автоматизированной обработки изображений/ Под ред. Козачка А.Г.- Новосибирск.- 1984.- 177с.
- 63.Преснухин Л.Н., Шаньгин В.Ф., Майоров С.А., Меськин И.В.
   Фотоэлектрические преобразователи информации М., "Машиностроение", 1974, 375
- 64.Разработка и исследование алгоритмов, методов и технических средств цифрового представления, сжатия и организации полутоновых изображений в информационных картографических системах. Отчет о научных исследовательской работе. УДК 528.93.516 № гос. рег.019.40 010035.
- 65.Солодкин Ю.Н. "Разработка и исследование когерентнооптических из мерительных систем"- диссертация на соискание уч.ст. д.т.н.- НГТУ,1992г.
- 66.Голографические неразрушающие исследования: Пер.с англ. Эрф Р.К.-М.:Машиностроение,1979.-448с.
- 67. Франсон М., Оптика спеклов-М.: Мир, 1980.
- 68.Aleksoff C. C. Temporally modulated holography// Appl. Opt. 1971.
   Vol 10, № 6. P. 1329 1341.
- 69.Archbold E,, Burch J. M., Ennos A. E.// Optica Acta, 17, 883-898, (1971).

- 70.Archbold E., Ennos A. E. Displacement measurement from doubleexposure laser photographs// Opt. Acta. - 1972. - Vol. 19, № 4. - P. 253-271.
- 71.Burch J. M., Tokarski J. N. J Production of multiple beam fringes from photographic scatterd.// Opt. Acta,-1968.-Vol. 15, №2,-P. 101-111.
- 72.Butters J. N., Leendertz J. A.// J. Phys. E: Scientific Instruments, 4, 1-4,1971
- 73.Brooks R. E., Hefinger L. O., Wuerker R. F., Briones R. A. Holographic photoaphy of high speed phenomena with convetional and Q-switched ruby lasers// Appl. Phys. Lett. Vol. 7, № 4. P. 92-94.
- 74.Creath K. Phase-shifting speckle interferometry. // Applied Optics.-1985.-V.24.-No.18.-pp.3053-3058.
- 75.Collier P. J., Doherty E. T., Pennington K. S. Application of moire techniqes to ho lography// Appl. Phys. Lett. 1965. Vol. 7, № 18. P. 223-225
- 76.Cloud. G. L. Optical methods in engineering analysis.- London. Cambridge. Univ. Pres. -1994.
- 77.CCD camera.// Lasers and Optron.-1995,-C.8.
- 78.CCD monitoring.// Photonics Spectra.-29 №6.-C.172.
- 79.Dandliker R., Thalmann R., Willemin J.F. Fringe interpolation by tworeference-beam holographic interferometry: reducing sensitivity to hologram misalignment.-Optics Communications.-1982.-V.42.-No.5.pp.301-306
- 80.Dorband B., Tiziani H.J. Testing aspheric surfaces with computergenerated holograms: analisis of adjustment and shape errors// Applied Optics.-1985.-V.24.-No.16.-P.2604-2611.
- 81.Erf R. K. (ed), Speckle Metrology, Academic Press, New York, 1878.
- 82.Gushov V.I., Nechaev V.G. In-plane deformation measurement by digital phase-shifting specle-interferometry. Тезисы к докладу на международной конференции " Photomechanics' 95 ". 1995 г.
- 83.Gushov V.I., Nechaev V.G. In-plane deformation measurement by digital phase-shifting speckle-interferometry// Proc.SPIE.-1996.-Vol.2791.-P.165-169.
- 84.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.
- 85.M.Halioua, R.S.Krisnamurthy, H.-C. Liu, Fu-Pen ChiangAutomated 360<sup>o</sup> profilometry of 3-D diffuse object. Applied Optics.-1985.-V.24.-No.14.-pp.2193-2196
- 86.Hariharan P., Oreb B.F., Brown N. Digital phase-measurement system for real-time holografic interferometry.-Optics Communication.-1982.-V.41.-No.6.-pp.393
- 87.Ichioka Y., Inuica M. Direct phase detecting system// Applied Optics.-1972.- V.11.- No.7.- P.1507-1514.
- 88.Macy W.W, JR. Two-dimensional fringe-pattern analysis// Applied Optics.- 1983.- V.22.- No.3.- P.3898-3901
- 89.Mohan N.K., Saldner H., Molin N.-E. Electronic speckle pattern interferometry for simultaneous measurement of out-of-plane displacement and slope// Optics Letters.- 1993.- V.18.- No.21.-P.1861-1862.
- 90.Mohanty R.K., Joenathan C., Sirohi S. Speckle and speckle-shearing interferometers combined for the simultaneous determination of outof-plane displacement and slope// Applied Optics.- 1985.- V.24.-No.18.- P.3106-3109

- 91.Moore A.J., Tyrer R., Santoyo F.M. Phase extraction from electronic speckle interferometry addition frange.// Applied Optics.-1994.-V.33.-No.31.-pp.7312-7320.
- 92.Nakadate S., Saito H. Frange scanning specie-patern interferometry.//Applied Optics.- 1985.- v.24.- No.14.- pp.2172-2180.
- 93.Nakadate S., Yatagai T., Saito H. Computer-aided speckle-patern interferometry // Applied Optics.- 1983.- V.22.- No.2.-pp.237-243.
- 94.Pedrini G., Tiziani H.J.Double-pulse electronic speckle interferometry for vibration analysis.// Applied Optics.-Vol.33.-No.34.-1994.pp.7857-786355.. Opt. 1971. Vol 10, № 6.
- 95.Powell R., Stetson K. Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction. // J.Opt.Soc.Am.-55.-P. 1593 –1998
- 96.Pryputneiwicz R. J. Ststic and dinamic measurements using electrooptic hologrphy // Proc. SPIE. - 1991. - Vol 1554B. - P. 790-798.
- 97.Reid G.T., 1984, Opt.&Las. in Eng., 5,63
- 98.Robinson D.W.,Williams D.C. Digital phase stepping speckle interferometry.// Optics Communications.-1986.-V.57.-No.1.-pp.26-30.
- 99.Roddier C., Roddier F. Interferogram analysis using Fourier transform techniques// Appl.Opt.- 1987.- V.26.- No.9.- P.1668-1673.
- 100. Takasaki H.// 1982, Opt.&Las. Eng.,3,3
- 101. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interfermetry// J.Opt.Soc.Am.- 1982.- V.72.- No.1.- P.156-160.
- 102. Takeda M., Tung Z. Subfringe holographic interferometry by computer-based spatial-carrier fringe-pattern analysis// J.Optics(Paris).- 1985.- V.16.- No.3.- P.127-131.
- 103. Tiziani H. J.// Oht. Commun., 5, 271-276 (1972).

- 104. Wyant J.C., Creath K. Recent advances in interferometric optical testing.// Laser Focus.-1985.-v.21.-No.11.-pp.118-132.
- 105. Wyant J.C. Interferometric optical metrology: basic system and principles.// Laser Focus 65-67(1982)
- 106. 2048×2048 Pixel Voldbild.. //Fotografic Electron Ind.-1995.-26, №11,-c.10

107. Гужов В.И., Нечаев В.Г. Расшифровка спеклограмм методом

управляемого фазового сдвига. // Автометрия.-1998.- №6.

Приложение

Приложение 1

П.1. Материалы, подтверждающие внедрение и использование результатов диссертации.

.УТВЕРЖДАЮ\*. "УТВЕРЖДАЮ" юволитель редрриятия, организации института по научной работе. Проректой А. Г. Козачок 197/11. SCKH о внедрении НИР DORES 197 r. нжеподписавшиеся представители \_ предприятия n/я P-6324 начальника СБ Кузнецов D.H., начальник сектора Баринов В.В. ой стороны, и представители Новосибирского электротехничеткого института лаб. Логинов А.В., рук. группы Гурьев Л.П., м.н.с. Нечаев В.Г. той стороны, составили настоящий акт о внедрении результатов научно-исследовательской Резработна сопряжения и программного обеспечения работы устройство ЕК" с ЭРМ СМ-З (дополниельное соглешение 2 в договору А-80-76). шифр и ее наименование • недрения Эхоплунтация устройства при обработне изобратений в эхоле COMMONTE. етные результаты внедрения повышение производстительности труде вноненентаторов: повышение достоверностя розультатов онспериинита. похность решения ноных залач. недрении указанной разработки на предприятия п/я Р-63:4 наименование предприятия, организации и т. д. Условный фактический эффект в размере <u>Четыреста девяноста</u>т. р. нительные показатели от внедрения НИР (указываются научные публикации, экспонаты, ные для показа на выстовках, количество исполнителей, работавших над диссертациями ство дипломных и курсовых проектов по материалам НИР) по данной теме реботсот дассертоциями Л.П.Турьев и В.Г. Нечесв. алнен цанломный проект. Результаты работы опубликованы в сб. "Гологравские измерительные системы" нод ред. А.Г.Козачко. предприятия, организации От НЭТИ

114

ТВЕРЖДАЮ\* тобрждаю" оводитель предрриятия, организации Проректор внститу научной работе А. Г. Козачок 197  $\mathbf{\Gamma}$ 197 г. АКТ о внедрении НИР 197 г. LICOICBA нижеподписавшиеся представители предприятия п/я Р-6324 нанменование предприятия, организации, КБ, НИИ, вуза, фамплия, имя, отчество должи. ной стороны, и представители Новосибирского электротехнического института завелено. HOB A.B., DYR. TOYININ TYDEB J. H. CT. H.C. HOUMED B.F. угой стороны, составили настоящий акт о внедрении результатов научно-исследовательской лы ЛІМ-І-61/А "Разработка и исследование комплекта аппаратуры получения и обработки оптической информации" шифр и ее наименование внедрения Эконлуатация устройства при получении и обработке тической лиформации в ходе эксперимента кретные результаты внедрения Позначение прокаводительности труда экспеентаторов, ловышение достоверности результатов эксперимента. DEHOCTS DEMONIA HOBIN SALAY внедрении указанной разработки на \_ HPOREDMATEN IN A P-GOAA наименование предприятия, организации и т. д. чет фахтицеский экономический эффект в размере цестьсот сорок т. руб. лет. и использования результатов лнительные показатели от внедрения НИР (указываются научные публикации, экспонаты, атые для показа на выставках, количество исполнителей, работавших над диссертациями нество дипломных и курсовых проектов по материалам НИР) По данной теме рабоная диссертациями Л.П.Гурьев и В.Г.Нечаев. Выполнено 2 липломных кта. Результати работи доложени на конференции по автоматизации ных исследования на основе приленения ЗНИ (г. Нопосибирок. 1981). От предприятия, организации

.УТВЕРЖДАЮ\* УТВЕРЖДАЮ" проректор института по научной работе оводителы предприятия, организации ATTEST А. Г. Козачок 197 г. АКТ о внедрении НИР Москва HHBRUH 19Ю г. нижеподписавшиеся представители предприятия п/я Р-6324 .начельныка СГБ Данов H.A., начельнии сектора Геринов В.В. наименование предприятия, организации, КБ, НИИ, пуза, фамплия, имя, отчество должи. вной стороны, и представители Новосибирского электротехнического института\_ с.н.с. Гурьев Л.П., м.н.с. Нечаев В.Г. фамилия, имя, отчество и должность ругой стороны, составили настоящий акт, о внедрении результатов научно-исследовательской ны Разработка и исследование устройства преобразования цифроворо на в изображение (доп. согладение и к договору 4-80-75) шифр и ее наименование внедрения Эксплуатация устройства при обработке экспериментальных HUX . претные результаты внедрения ПОЕМЛЕНИЕ ПООИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТОУДА ЭКСПЕривитаторов, примение наде ности и точности, нозможность решения ноих зацач. внедрении указанной разработки на предприятии п/я Р-324 наименование предприятия, организации и т. д. чен жахиххххх экономический эффект в размере Двжти т. руб. использования результатов . Пять лет. алнительные показатели от внедрения НИР (указываются научные публикации, экспонаты, тые для показа на выставках, количество исполнителей, работавших над диссертациями нество дипломных п'курсовых проектов по материалам НИР)ЦЭ ДАННОЙ ТЕМЕ РАбоТАЮТ ИИССЕртациями Л.П.Гурьев и В.Г.Нечаев. Быподнен дипломям проект и два оных. Результаты лубликованы в сб. "Гологра, ические измерительные выя" под ред. А.Г.Козачка От предприятия, организации И Стотов 10, 1 22 Ли. 2506 от нэтн 🧷

Утверждаю Начальник, научно-исследовательского отделения предприятия OB

## ART

## внедрения НИР

Мы, нижеподписавшиеся представители продприятия п/я В-2962 начальних сектора Бутнинг А.Ш., велущий инженер Зуприянов Н.А. с одной стороны и представители НЭТИ ответственные исполнители Гурьев Л.П. и Солодкин D.H\_ с другой стороны составили настоящий акт о вмедрении результатов НИР "Разработка и исследование голографической изверительной системы для анализа вибрационных характеристик изделий", принятоя заказчиком к внедрению в НИР, голографической стандартизаци

<sup>•</sup> результате внодрения в научные исследования предприятия п/я В-2962 разработанной по договору ЛГС-3-84/А системы с истодикаим гасота повышена достоверность получаемой инпормеции при вибраимонно-метрических исследованиях изделий. В силу специники работы предприятия п/я в-2962 оценить экономический эбрект от внедрения разра о стки не представляется возможным. Проведенная царста позволяет расширить круг решаемых задач, что имеет важное научно-техническое значение.

От предприятия п/я В-2962

7. I. I y THANT Н.А. УПриянов

GT HOTH

л.П.Гурьев 

**YTBLPKIAD** 

Зам. руководителя

предприятия л/я 1-4736 A.H. Серьезнов

## PACYET

годового экономического эффекта от внедрения оптоволоконной телевизионной системы для диагностики конструкций

(шифр ГВС-I-87/А)

Оптоволоконная телевизионная система применяется для неразрушающего контроля целостности труднодоступных элементов натурных конструкций при проведении их прочностных испытаний.

Расчет годового экономического эффекта производится исходя из сравнения нового метода с визуальными способами дефектоскопии.

Экономическая эффективность от разработки и внедрения методов и средств дефектоскопии нового типа [I] образуется в результате предотвращения непредусмотренных разрушений испытываемых конструкций и остановок работы стендов, сокращения затрат времени на осмотр и анализ дефектов, повышения надежности контроля, в результате увеличения межремонтного цикла и более эффективного использования мощностей зала статических испытаний, за счет сокращения персонала, осуществляющего осмотр, т.е. повышения производительности общественного труда.

16 -	Показатели	слов. бозн.	Ед. изм.	Варианты	
Mº 11				базовый	новый
1.	Количество прочностных ис- пытаний в год	пи	цикл	4	4
2.	Затраты на одни прочност- ные испытания	350	н/ч	1765	420
3.	Удельные капитальные вложе- ния в производственные фонды	Rn	тыс.р	yo 60°,0	60,0
4.	Стоимость дефектоскопического контроля при прочностном испытании	Ск	тыс.р	уб I8,0	6,0
5.	Затраты на исследования по разработке диагностичес- кой системы	Зр	тыс.р	yo 40,0	95,0
6.	Нормативный коэффициент эффективности	Ен		0,15	0,15
7.	Коэффициент отчислений от балансовой стоимости на ре- новацию средства труда(соглас но приказу MAII № 55)	- -		0,2	0,2

исходные данные для расчет	Исходные	данные	для	расчета
----------------------------	----------	--------	-----	---------

Экономический эффект от использования разработанной по договору системы определяется по формуле 4 из [2]:

$$\mathcal{J} = \left(\mathcal{J}_{1} \cdot \frac{B_{2}}{B_{1}} \cdot \frac{P_{1} + E_{H}}{P_{2} + E_{H}} + \frac{\left(\mathcal{U}_{1} - \mathcal{U}_{2}\right) - E_{H}\left(\mathcal{K}_{2} - \mathcal{K}_{1}\right)}{P_{2} + E_{H}} - \mathcal{J}_{2}\right) \cdot \mathcal{A}_{2}$$

где 3, и 3<sub>2</sub> - приведенные затраты на единицу базового и нового средства труда, определяемые по формуле I в [2];

В, и В2 - коэфрициенты производительности труда;

U, и U<sub>2</sub> - годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании им базового и нового средства труда в расчете на объем работы, производимой с помощью нового средства труда, без учета средств на их реновацию:

K, и K2 - сопутствующие капитальные затраты потребителя;

A<sub>2</sub> - годовой объем производства новых средств труда в натурных единицах в расчетном году.

В принятом для расчета соотношении кроме коэффициента роста производительности труда  $\frac{\beta_1}{\beta_2}$  учитывается изменение срока службы нового средства труда по сравнению с базовым :  $\frac{p_1 + E_H}{p_2 + E_H}$ 

Отношение  $\frac{(M_1 - H_2) - E_H(k_2 - k_1)}{P_2 + E_H}$  - это экономия

потребителя на текущих издержках эксплуатации и отчислений от сопутствующих капитальных вложений за весь срок службы нового средства труда по сравнению с базовым.

2. Рассчитаем приведенные затраты на единицу базового и нового средства труда, 3, и 3, соответственно:

$$\begin{aligned} 3_{4} &= C_{K1} + E_{H} \cdot k_{R} + 3_{P1} \\ 3_{4} &= 18 + 0.15 \cdot 60 + 40 = 67 \ rake, py \delta. \\ 3_{2} &= C_{K2} + E_{H} \cdot k_{R} + 3_{P2} \\ 3_{3} &= 6 + 0.15 \cdot 60 + 95 = 110 \ rake, py \delta. \end{aligned}$$

3. Коэффициент роста производительности труда:

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{3_{TP.1}}{3_{TP2}} = \frac{1765}{420} = 4,2$$

4. Коэффициент изменения срока службы средств труда:

$$\frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} = 1$$

5. Годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании базового средства труда :  $M_1 = n_H \cdot M_{eg.1}$ где  $M_{eg.1}$  - эксплуатационные затраты потребителя на один цикл

испытаний при базовом варианте.

На предприятии заказчика Цед.1 следующие:		
Стс::мость трудозатрат	400	руб
Дополнительная заработная плата	72	руб
Отчисления на соцстрах	68	руб
Затраты на материалы	84	руб
Затраты на спецоборудование	55	руб
Услуги других подразделений	40	руб
Прочие затраты	50	руб
Цеховые накладные расходы	538	руб
Институтские накладные расходы	131	руб
Итого:	I438	руб

Следовательно Ц, = 4 · 1438 = 5752 руб.

Эксплуатационные затраты потребителя на один цикл испытаний с новыми средствами труда Цед. 2 составляют: Стоимость трудозатрат 200 руб Дополнительная заработная плата 36 py6 Отчисления на соцстрах 34 pyo Затраты на материалы 40 руб Затраты на спецоборудование 45 руб Услуги других подразделений 40 руб Прочие затраты 50 руб Цеховые накладные расходы ЗІІ руб Институтские накладные расходы 76 pyő MTOPO: 832 pyő

Следовательно L/2 = 4 · 832 = 3328 руб.

6. Сопутствующие капитальные затраты заказчика на использование площади за время эксперимента (  $\mathcal{K}_i$ ) при базовом варианте составляли II76 руб; а при новом:

7. Годовой обжем производства новых средств труда в расчетном году

При этих условиях годовой экономический эффект составляет:

∂ = (67. 103. 4,2. 1 + (5752 - 3328) - 0, 15 (280-1176) - 110. 103). 1= 178 710 pg δ.

Из них доля НЭТИ составляет 80%, т.е. 142968 рублей.

Литература:

I. И.Н. Ермолов, А.С. Матвеев, Е.Х. Випп, В.С. Чернова. Расчет экономической эффективности дефектоскопического контроля. Дефектоскопия, № I, 1968,

 2. Методика определения эффеттивности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений.-М., 1977.

Начальник ШЮ предприятия

в.Ф. Солуданов

Отв.исполнитель темы ГВС-I-87/А

Плр Л.П.Гурьев

Руководитель группы эффективности НЭТИ

воду И.М. Розакова

Утверждаю венный оректор по учебной работе Совостбирского государственного нического университета, проф. ИАранасьев Ю.А. 1998 г.

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы НЕЧАЕВА Виктора Георгиевича «Разработка методов цифровой спекл-интерферометрии с расширенным динамическим диапазоном»

На кафедре «Оптические информационные технологии» Новосибирского государственного технического университета в учебном процессе внедрены результаты диссертации Нечаева В.Г. «Разработка методов цифровой спеклинтерферометрии с расширенным динамическим диапазоном». Результаты работы используются при выполнении лабораторных работ по курсу «Колебания и волны» и в курсах лекций ««Голография и голографические измерения». Студенты знакомятся с основными методами определения полей разности фаз интерферирующих волновых фронтов и методами автоматизации при получении и расшифровке классических, голографических интерферограмм и цифровых спекл-интерферограмм.

Зав.кафедрой ОИТ Д.Т.Н.

Ученый секретарь каф. ОИТ K.T.H.

MM

Ю.Н.Дубнищев

Е.Н.Денежкин