

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.518.3

А. Г. Козачок

*(Новосибирск)*ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
(КРАТКИЙ ОБЗОР РАБОТ ОТДЕЛА ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ИЗМЕРЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НОВОСИБИРСКОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА)

Представлен обзор научных работ по исследованию принципов построения, созданию методов анализа голографических измерительных систем как систем комплексных, автоматизированных и многофункциональных, сочетающих использование когерентно-оптических методов и устройств получения информации и электронных методов и средств ее измерения и обработки. Дан анализ современного состояния этих систем и намечены пути их дальнейшего развития и совершенствования.

После изобретения лазеров и голографии стало очевидно, что значительно повышается роль когерентно-оптических методов для получения, передачи, обработки и представления измерительной информации. Это объясняется тем, что данные методы сочетают в себе такие достоинства, как бесконтактное и одновременное получение информации по всему полю измеряемых величин, низкий порог чувствительности, определяемый долями длины световой волны, практически отсутствие принципиальных ограничений на исследуемый объект, использование в качестве меры длины световой волны, возможность решения многофункциональных и комплексных задач, связанных с измерением разнообразных параметров исследуемого поля. Совокупностью перечисленных достоинств не обладает ни один из известных методов экспериментальных исследований.

Особенно перспективным виделось применение этих методов для решения ряда задач экспериментальной механики. Это заложено в самой природе голографических методов, позволяющих определять смещения поверхности объектов, а через них деформации, напряжения, дефекты структуры, измерять амплитуды вибраций и исследовать формы колебаний, измерять параметры рельефа сложных поверхностей объектов и производить сравнение исследуемых объектов с эталонными.

Представлялось, что с помощью этих методов можно будет решить ряд задач, поставленных перед разработчиками систем измерения и контроля. В первую очередь это задачи перехода от измерения пространственно распределенных величин в дискретных точках к получению измерительной информации сразу по всему полю исследуемого объекта бесконтактным способом. При этом необходимо обеспечить одновременно высокую точность, быстродействие и низкий порог чувствительности.

Исследования возможностей использования методов голографической интерферометрии для решения этих задач наш коллектив начал в конце 60-х годов в Институте автоматики и электрометрии по предложению академика Ю. Е. Нестерихина. В это время нами в частности, да и в мировой практике вообще, эти методы использовались для решения так называемых «качествен-

ных» задач. Сюда относятся задачи, в которых уже по самому характеру интерференционных картин можно делать важные выводы о состоянии объекта исследования или об изменениях, происшедших с ним. К таким задачам относится неразрушающий контроль — определение дефектов в деталях и конструкциях. Основным принцип голографического неразрушающего контроля состоит в том, что механические дефекты вызывают аномальные изменения поля перемещений исследуемого объекта при его нагружении (статическом, вибрационном, тепловом и т. д.), что, в свою очередь, вызывает искажения интерферограмм. Анализируя указанные искажения картин полос, можно в ряде случаев очень точно определять размеры и расположение механических дефектов.

Однако в подавляющем числе случаев экспериментатора интересует не только качественная картина, но и количественная информация о процессах, происходящих в исследуемом объекте.

Как известно, голографическая интерферограмма содержит очень большой объем информации, который необходимо обработать и расшифровать для получения количественных оценок. Например, определение деформаций объекта требует решения ряда вопросов.

1. Для нахождения деформации необходимо определить перемещение исследуемого участка или всей поверхности объекта.

2. Для определения перемещения по интерференционной картине следует выполнить измерение числа интерференционных полос.

3. Для того чтобы измерение произвести с достаточной точностью, необходимо исключить разного рода шумы.

4. Для повышения чувствительности метода нужно измерять не только целые числа полос, но и их доли.

5. Для эффективного использования результатов следует представить их в удобном для экспериментатора виде.

Весьма желательно эти процессы автоматизировать.

Для решения этих вопросов нужны системы, в задачу которых входят получение информации, ее преобразования, ввод в ЭВМ, обработка и расшифровка и представление результатов в соответствующем виде. Исследования по созданию таких систем были широко развернуты в 1972 г. после организации на базе нашего коллектива Научно-исследовательского отдела голографических методов измерения и автоматизации научных исследований Новосибирского электротехнического института.

В это время методам голографической интерферометрии уделялось много внимания, большое число научных исследований было посвящено совершенствованию и развитию этих методов, их применению для решения самых разнообразных задач, проблемам расшифровки интерферограмм и другим важным вопросам. Однако характерным для большинства этих работ был специализированный подход, определяемый конкретно поставленными задачами. Часто решение таких задач заканчивалось получением качественных результатов без обработки и расшифровки интерферограмм.

В то же время очевидно было, что поскольку интерференционная картина позволяет получать информацию о различных измеряемых величинах, то система, основанная на этих методах, может измерять не одну величину, а совокупность величин. Причем эти величины могут быть как статическими, так и динамическими. Это позволяет создавать многофункциональные системы.

Ясно было и то, что применение современных вычислительных средств и разработка соответствующего программного обеспечения позволяют разработать эффективные методы обработки и расшифровки и автоматизировать эти процессы.

Нами был предложен, обоснован и реализован комплексный подход к созданию голографических интерферометрических систем измерения и контроля, реализующих все основные процессы, включая восприятие оптической информации, ее измерительные преобразования, расшифровку и представление полученных результатов в удобном для экспериментатора виде. Естественно, что для этого решен широкий круг научных и технических задач. Такой

подход являлся пионерским, поскольку системы в таком полном виде отсутствовали как у нас, так и за рубежом.

Для обеспечения многофункциональности и универсальности систем предложены, разработаны и реализованы оригинальные способы получения голографических интерферограмм для измерения деформаций, вибраций и параметров рельефа поверхности исследуемых объектов; эффективные методы расшифровки голографических интерферограмм, позволяющие автоматизировать процесс измерения и получать результаты измерения в реальном времени; оригинальные схемы универсальных голографических интерферометров, обеспечивающих возможность одновременного получения интерферограмм, определяющих как поле деформаций или вибраций, так и топографическую карту поверхности объекта и позволяющих осуществить голографирование с четырех направлений, что обеспечивает однозначное определение модуля вектора смещения; выполнен анализ основных метрологических характеристик голографических измерительных систем; произведена оптимизация схем голографических интерферометров по их метрологическим характеристикам; предложены принципы построения таких систем.

Необходимо сразу заметить, что реализация таких систем чисто оптическими средствами в настоящее время практически невозможна, поскольку соответствующие оптические средства или отсутствуют, или значительно уступают электронным. Поэтому предложено было разрабатывать гибридные системы, сочетающие одновременное использование оптических методов и устройств получения информации и электронных методов и средств ее измерения и обработки. В таких системах в качестве первичного системного преобразователя используется голографический интерферометр, преобразующий поле измеряемых величин в поле яркости интерференционной картины, которое, в свою очередь, с помощью электронно-оптических устройств преобразуется в электрические сигналы и вводится в ЭВМ для последующей обработки, расшифровки и представления полученных результатов.

Мы их называем голографическими измерительными системами (ГИС) потому, что определяющую роль в них играет голографический интерферометр, который, как любой другой первичный преобразователь, в основном и определяет характеристики системы в целом.

Для определения искомой величины, например поля перемещений на поверхности исследуемого объекта, в ГИС необходимо осуществить ряд аппаратно-программных преобразований оптической информации. Представим в общем виде процессы преобразования в ГИС и их математическую модель:

$$U(x, y) \rightarrow \Phi(x, y) \rightarrow I(x, y) \rightarrow D(x, y) \rightarrow \tilde{I}(m, n) \rightarrow \varphi(m, n) \rightarrow U(m, n).$$

Здесь $U(x, y)$ — поле перемещений на поверхности объекта; $\Phi(x, y) = KU(x, y) + \Delta\Phi$ — разность фаз волновых фронтов, отраженных от объекта на голограмму, где K — вектор чувствительности, который при одном направлении освещения и наблюдения имеет вид $K = 2\pi(r_o + r_n)/\lambda$; r_o и r_n — орт-векторы направлений освещения и наблюдения; λ — длина волны источника света; $\Delta\Phi$ — случайная шумовая составляющая, обусловленная флуктуациями источника излучения, вибрациями оптических элементов, изменением окружающей температуры, нестабильностью характеристик устройства нагружения и др.

$I(x, y) = I_0(x, y)[1 + V(x, y)\cos\Phi(x, y)]$ — поле яркости изображения, восстановленного с голограммы, где I_0 — средняя яркость, обусловленная спекл-шумом; V — контраст полос на интерферограмме. Спекл-структура $I_0(x, y)$ несет информацию о микрорельефе поверхности объекта и зависит в основном от длины волны света, апертуры голограммы и расстояния между объектом и голограммой. В задаче определения поля U она играет роль широкополосной шумовой составляющей, которая в значительной степени определяет метрологические характеристики ГИС.

$D(x, y) = D[I(x, y)] + \delta^2 D$ — поле почернения фотоматериала промежуточного носителя (в случае непосредственного ввода изображения в ЭВМ этот этап отсутствует), где $\delta^2 D$ — погрешность, обусловленная искажением масштабов в схеме восстановления и нелинейностью характеристики фотоматериала.

При записи интерферограммы на линейном участке характеристической кривой $I(x, y)$ поле почернения точно повторяет негатив исходного поля яркости интерферограммы.

$\tilde{I}(m, n) = \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D(x, y) P(x - m\Delta X, y - n\Delta Y) dx dy \right] (\text{mod } \Delta D)$ — цифровой образ поля яркости интерферограммы, где P — апертурная функция; ΔD — элемент разрешения по яркости; $(x, y) \rightarrow (m\Delta X, n\Delta Y) \rightarrow (m, n)$ — соответствие непрерывных физических и дискретизированных пространственных координат. Оцифровка изображения с помощью конечной апертуры устройства ввода эквивалентна низкочастотной фильтрации интерферограммы на стадии ввода в ЭВМ. Однако уменьшение размеров сканирующей диафрагмы, хотя и повышает разрешающую способность устройства ввода, но приводит к значительному зашумлению цифрового образа интерферограммы спекл-шумов. Увеличение размеров диафрагмы усиливает фильтрующие свойства устройства ввода, увеличивая отношение сигнал/шум, но вызывает искажения в передаче профилей интерференционных полос, что приводит к статистическим погрешностям при расшифровке полос.

$\varphi(m, n) = \varphi(I, A)$ — цифровой образ фазовых искажений, полученный при расшифровке интерферограммы, где A — параметры, зависящие от выбранного алгоритма расшифровки. В зависимости от выбранного алгоритма параметры A могут иметь различный смысл. Например, в случае использования алгоритма отслеживания средин интерференционных полос набор параметров включает геометрические размеры и расположение областей, в которых выбирается направление отслеживания, а также величину шага перемещения в выбранном направлении. Для алгоритма, основанного на выделении реперных точек, параметры A — это расстояния между ними, а также характеристики правила интерполяции интерференционных полос между реперными точками.

$U(m, n) = K^{-1} \varphi(m, n)$ — цифровой образ поля перемещений, где K^{-1} — обратный вектор по отношению к вектору чувствительности. На этом этапе погрешность восстановления поля характеризуется только геометрией схемы интерферометра, определяемой направлениями освещения и наблюдения объекта.

При наличии отмеченных выше сложных взаимозависимостей и взаимоисключающих требований поставленная задача может быть решена на основе оптимизации основных элементов ГИС и обработки большого объема информации на ЭВМ.

Для получения количественной информации по голографическим интерферограммам обычно необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений вида

$$AU = \pm \lambda N, \quad (1)$$

где A — угловая матрица, характеризующая геометрию схемы интерферометра, т. е. направления освещения исследуемого объекта и наблюдения восстановленного его изображения; U — вектор-столбец проекций измеряемой величины, определяющих разность хода интерферирующих волн; λ — длина световой волны; N — вектор-столбец чисел интерференционных полос.

Такую систему уравнений можно сформировать, например, считая интерференционные полосы с разных направлений наблюдения. Так как левые части уравнений определены только по модулю, трех уравнений в общем случае недостаточно, чтобы получить однозначное решение системы уравнений. Различные сочетания знаков в уравнении (1) дают четыре пары решений $|U|_i$, где $i = 1, 2, 3, 4$. Чтобы знать, какая из этих пар содержит

достоверный результат, необходимо четвертое уравнение. Подставляя решения $|U|$ в это уравнение, находим такое, при котором уравнение обращается в тождество. В итоге получается результат, достоверный по модулю, но неопределенный по знаку. Такой подход позволяет устранить грубые промахи при определении модуля вектора измеряемой величины.

Из (1) следует, что источниками погрешности измерения являются неточности получения геометрических параметров и числа полос N . Для анализа погрешности измерения голографических интерферограмм (ГИ) используются результаты хорошо разработанной теории решения линейных алгебраических уравнений. Она дает соотношение между погрешностью составляющих вектор-столбца искомой величины U , возмущением угловой матрицы A , обусловленным неточностью отсчета углов, и погрешностью определения составляющих вектор-столбца чисел полос N , связанной с неточностью отсчета полос. Это соотношение, дающее максимальную оценку относительной погрешности измерения вектор-смещения δU , выглядит таким образом:

$$\delta U \leq \frac{\nu}{1 - \nu \delta A} (\delta A + \delta N), \quad (2)$$

где $\delta A = \frac{\|dA/dy\|}{\|A\|} |\Delta y|$ и $\delta N = \frac{\Delta |N|}{N}$ — соответственно относительные погрешности нормы угловой матрицы A и вектор-столбца N ; ν — число обусловленности, характеризующее устойчивость решения уравнений (1). Относительная погрешность δN известна из эксперимента, она зависит от ряда условий, и вопросы ее оценки рассмотрены дальше.

Для определения величин ν и δA необходимо вычислить согласованную с нормами $|U|$ и $|N|$ норму $\|A\|$ матрицы A . Это можно сделать, рассматривая конкретную схему голографического интерферометра.

Для интерферометра, где единичный вектор направления освещения в прямоугольной системе координат совпадает с осью Z , а единичные векторы направлений наблюдения составляют с осью Z угол 2γ , получены соотношения, анализ которых показывает, что погрешность измерения δU мало зависит от неточности отсчета угла $\Delta\gamma$ и в основном определяется неточностью отсчета числа полос N .

Отсюда очень важной представляется обработка интерферограмм с целью увеличения точности отсчета числа полос за счет увеличения отношения сигнал/шум.

Минимальная погрешность определения искомой величины имеет место, если направления биссектрис между направлениями наблюдения и освещения образуют ортогональную систему ($\nu = 1$). При прочих равных условиях предпочтение следует отдать такой базисной системе, при которой векторы биссектрис составляют максимально возможный угол с плоскостью объекта, а проекции вектора примерно равны между собой.

Реализацию полученных результатов на практике может обеспечить разработанная в Отделе схема четырехголограммного интерферометра.

Таким образом, на основе проведенного анализа возможно определение основных параметров схем голографических интерферометров, обеспечивающих минимальную погрешность измерения обобщенного параметра U , который может представлять собой смещение, амплитуду вибраций, высоту рельефа и другие параметры.

Метрологические характеристики ГИ в основном определяются шумами голографических интерферограмм, получивших название спекл-шумов. Они имеют мелкозернистую, резко контрастную структуру, определяемую шероховатостью поверхности объекта исследования и характеристиками оптической системы.

При условии, что интерферирующие случайные функции имеют гауссовское распределение со средними значениями, равными нулю, нами получено выражение для средней интенсивности голографической интерферограммы, определяющей картину полос на фоне спекл-шума:

$$\langle I(x, y) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ e^{-\sigma_{\theta}^2 + R_{\theta}} + e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} e^{-\sigma_{\varphi}^2 + R_{\varphi}} + 2 \cos \varphi_1 e^{-\frac{1}{2}(\sigma_{\theta}^2 + \sigma_{\varphi}^2)} e^{R_{\theta\varphi}} \right\} \times \\ \times K_1 K_2^* d\xi_1 d\xi_2 d\eta_1 d\eta_2, \quad (3)$$

где ξ, η — пространственные координаты; σ_{θ}^2 и σ_{φ}^2 — дисперсия спекл-шумов интерферирующих полей; R_{θ} , R_{φ} и $R_{\theta\varphi}$ — соответственно функции автокорреляции и взаимной корреляции; K — импульсная переходная функция системы регистрации; φ — разность фаз интерферирующих полей без шумовых искажений с единичными амплитудами. Индексы 1 и 2 означают интегрирование по соответствующим переменным.

Из (3) с учетом конечного разрешения Δ и шага интерференционных полос x_0 для одномерного случая получим

$$\langle I(x, y) \rangle = 1 + \left(\frac{x_0}{\pi \Delta} \right)^2 \sin^2 \frac{\pi \Delta}{x_0} + 2 \left(\frac{x_0}{\pi \Delta} \right) \sin \frac{\pi \Delta}{x_0} \cos \frac{2\pi x}{x_0}. \quad (4)$$

Первое слагаемое — это интенсивность начального состояния объектного поля, второе — интенсивность, характеризующая измененное состояние объекта, а третье описывает собственно интерференционную картину.

В голографическом эксперименте обычно выполняется условие, когда разрешение считывающего устройства много меньше шага интерференционных полос. Это позволяет упростить соотношение (3). Считая, что первый и второй интегралы дают одинаковый вклад, а в третьем φ не зависит от переменных интегрирования,

$$\langle I(x, y) \rangle = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\sigma_{\theta}^2 + R_{\theta}} K_1 K_2^* d\xi_1 d\xi_2 d\eta_1 d\eta_2 + \\ + 2 \cos \varphi_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}(\sigma_{\theta}^2 + \sigma_{\varphi}^2) + R_{\theta\varphi}} K_1 K_2^* d\xi_1 d\xi_2 d\eta_1 d\eta_2. \quad (5)$$

Вместе с тем при идеальном разрешении

$$\langle I(x, y) \rangle = 2 \langle I_0 \rangle [1 + V \cos \varphi(x, y)], \quad (6)$$

где $\langle I_0 \rangle$ — средняя яркость изображения без полос,

$$\langle I_1 \rangle = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}(\sigma_{\theta}^2 + \sigma_{\varphi}^2) + R_{\theta\varphi}} K_1 K_2^* d\xi_1 d\xi_2 d\eta_1 d\eta_2, \quad (7)$$

а

$$\langle I_0 \rangle = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\sigma_{\theta}^2 + R_{\theta}} K_1 K_2^* d\xi_1 d\xi_2 d\eta_1 d\eta_2. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) позволяют строго определить контраст, который однозначно связан с погрешностью отсчета числа полос:

$$\Delta N = \pm \frac{1}{\pi} \arccos \left(2 - \frac{1}{V} \right). \quad (9)$$

Погрешность отсчета полос ΔN дает возможность найти общую погрешность измерения в соответствии с соотношением (2).

Таким образом, соотношения, связывающие погрешность отсчета дробных долей интерференционных полос с параметрами шероховатости исследуемой поверхности, разрешением оптической системы и декорреляцией полей, рассеянных объектом до и после деформации, позволяют в каждом конкретном случае оценить погрешность и указать возможные пути ее снижения.

Заметим, что при контрасте полос менее одной трети измерение без обработки, увеличивающей отношение сигнал/шум, становится невозможным, так как погрешность в этом случае равна целой полосе.

В большинстве практических случаев спекл-шум имеет большую пространственную частоту, чем полезный сигнал, что дает возможность для увеличения отношения сигнал/шум использовать частотную фильтрацию.

Для использования разработанных методов необходимо оценить статистические характеристики спекл-шумов анализируемых интерферограмм. Отметим, что характеристики спекл-шумов зависят как от геометрии схемы голографического интерферометра, так и от относительной апертуры системы наблюдения. При этом заметим, что требования снижения погрешности отсчета дробных долей полос и погрешности определения компонент (или модуля) вектора измеряемой величины, обусловленной геометрией схемы интерферометра, являются противоречивыми, поэтому схемы интерферометра, учитывающие все требования, часто не дают возможности получить удовлетворительную погрешность измерения.

В таком случае целесообразно работать со схемой, имеющей оптимальную геометрию, а уровень пространственных шумов снижать обработкой изображений на ЭВМ. Это правильно еще и потому, что в изображении, введенном в память ЭВМ, кроме спекл-шумов, дающих основной вклад в погрешность, присутствуют шумы, обусловленные характеристиками регистрирующего материала и электронными цепями устройств.

Таким образом, оптимизируя параметры схемы голографического интерферометра и устройства ввода оптической информации в ЭВМ, можно увеличить отношение сигнал/шум по сравнению с исходным изображением, т. е. осуществить обработку уже на стадии ввода интерферограммы в ЭВМ.

Важнейшим вопросом при создании голографических измерительных систем является разработка эффективных методов расшифровки голографических интерферограмм.

При расшифровке интерферограмм исходной является система уравнений (1). Она позволяет определить проекцию измеряемого вектора определяемой величины на биссектрисы углов между направлениями освещения r_0 и наблюдения r_n .

Методам расшифровки интерферограмм посвящено большое число работ. При исследовании напряженно-деформированных состояний диффузно рассеивающих объектов наиболее плодотворными оказались методы, основанные на представлении поверхности объекта в виде совокупности точек, которые позволяют в каждой из этих точек определить компоненты вектора смещения.

В большинстве случаев при решении задач экспериментальной механики интересуют не собственно смещения, а то, какие деформации и напряжения они вызывают. Так как по голографической интерферограмме можно получить только двумерные функции $U(x, y)$, $V(x, y)$, $W(x, y)$, то полностью могут быть определены лишь компоненты поверхностной деформации ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , $\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx}$, которые вычисляются как производные в поле смещений. Поскольку при расшифровке интерферограмм поле смещений получается дискретным, необходимо аппроксимировать его непрерывными функциями. В простейшем случае используется линейная аппроксимация, при необходимости можно воспользоваться сплайн-функциями. Такое решение задачи является трудоемким. Поэтому понятно стремление к непосредственному определению деформаций по интерференционной картине.

Нами предложено использовать для этой цели тот факт, что деформация в точке связана с градиентом интенсивности в этой же точке.

Получены уравнения:

$$\begin{aligned}\frac{\partial I}{\partial x} &= \frac{1}{2}(\Gamma_0 + \Gamma_n) \left(i \frac{\partial U}{\partial x} + j \frac{\partial V}{\partial x} + K \frac{\partial W}{\partial x} \right) \sin \varphi; \\ \frac{\partial I}{\partial y} &= \frac{1}{2}(\Gamma_0 + \Gamma_n) \left(i \frac{\partial U}{\partial y} + j \frac{\partial V}{\partial y} + K \frac{\partial W}{\partial y} \right) \sin \varphi,\end{aligned}\tag{10}$$

которые определяют взаимосвязь между производной от функции распределения интенсивности $I(x, y)$ и линейными деформациями ∂U , ∂V , ∂W . Из этих уравнений видно, что огибающая этой производной пропорциональна линейным деформациям.

Для определения компонент линейной деформации по аналогии с (1) составляется система уравнений, только вместо чисел полос здесь используют производные $\partial I_i / \partial x$ и $\partial I_i / \partial y$, полученные при разных направлениях наблюдения.

Таким образом, для определения деформаций поверхности исследуемого объекта получают голографическую интерферограмму, характеризующую поле смещений точек поверхности, затем находят производную от распределения яркости в исходной интерферограмме, далее выделяют огибающую полученного в результате дифференцирования распределения яркости и по ней вычисляют деформации поверхности в заданных точках.

Предложенный способ определения деформаций обладает важными преимуществами. Во-первых, устраняется необходимость нахождения поля смещения точек и его аппроксимации. Во-вторых, не требуется счета интерференционных полос. В-третьих, вычисляется деформация именно в точке, а не усреднение по некоторому участку поверхности.

При расшифровке голографических интерферограмм может быть успешно использован эффект муара. Применение эффекта муара не позволяет получить такую же подробную информацию о полях смещений и деформаций, как при использовании методик голографической интерферометрии, изложенной выше, но простота реализации и наглядность результатов в ряде случаев делают метод весьма эффективным.

Однако соотношения, определяющие картину муаровых полос, позволяют находить деформации, действующие в плоскости, проходящей через исследуемую точку, т. е. можно исследовать простые плоские объекты. Если исследуемый элементарный участок поверхности оказывается наклонным в случае объекта со сложной поверхностью, то для определения деформации необходимо дополнительно знать направление нормали, характеризующей положение участка.

Нами предложено использовать для этой цели голографическую топографию. Топографическая интерферограмма, содержащая информацию о рельефе поверхности, позволяет определить направление нормали в каждой точке поверхности.

Таким образом, для определения линейных деформаций поверхности сложного объекта необходимо получить голографические интерферограммы, определяющие и поле перемещений, и топографию поверхности объекта.

Полученные результаты позволяют обоснованно разрабатывать голографические измерительные системы с использованием мини- и микроЭВМ и персональных компьютеров как системы комплексные, автоматизированные и многофункциональные, оценивать их основные характеристики и использовать для измерения разнообразных величин при проведении научных исследований, испытании различных объектов в экспериментальной механике и оптическом приборостроении.

Созданные системы, обладая рядом уникальных свойств, позволяют значительно повысить эффективность использования голографических методов, расширить области их применения, реализовать новые методы голографической интерферометрии, существенно улучшить метрологические характерис-

тики этих методов и автоматизировать процесс измерения. Голографические измерительные системы обладают важными специфическими свойствами, что позволяет считать их новым классом информационно-измерительных систем. Они успешно используются в ряде организаций для решения комплексных задач экспериментальной механики, в том числе: для исследования напряженно-деформированного состояния объектов, измерения и анализа вибрационных характеристик объектов, измерения параметров рельефа объектов, исследования спекл-структур голографических изображений, неразрушающего контроля дефектов различных конструкций. С большим эффектом они применяются и в оптическом приборостроении. Это естественно, если учесть универсальность методов, основанных на интерференционных принципах, их высокую точность, чувствительность и другие достоинства. Однако традиционные способы анализа довольно трудоемки и не всегда позволяют реализовать потенциальные возможности этих методов. Расшифровка голографических интерферограмм связана с обработкой большого объема информации.

Анализ существующих методов показывает, что для определения полей разности фаз оптических волновых фронтов наиболее эффективными являются методы, основанные на внесении управляющих фазовых воздействий. Системы с управляемым фазовым сдвигом обеспечивают высокую точность при определении разности фаз в пределах периода, однако существующие алгоритмы восстановления полной фазы используют информацию о пространственной структуре и поэтому накладывают дополнительные ограничения на исследуемые волновые фронты, имеют небольшой динамический диапазон.

В настоящее время разрабатываются алгоритмы на основе методов многомодульной арифметики, позволяющие значительно расширить динамический диапазон, устранить фазовую неоднозначность и достичь полной автоматизации процесса обработки. Предлагаемый способ основан на анализе набора полей разности фаз, определенных в пределах периода и полученных при различных ценах интерференционных полос. На основе предложенных новых методов, алгоритмов и технических средств впервые в мире создается новый класс когерентно-оптических систем — целочисленные измерительные системы.

Указанным выше вопросам посвящены статьи сотрудников Отдела В. И. Гужова, Б. В. Карпюка, А. Е. Подъякова, Ю. Н. Солодкина, публикуемые в настоящем номере журнала.

Результаты основных исследований изложены в приведенной библиографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козачок А. Г. Голографические методы исследований в экспериментальной механике. — М.: Машиностроение, 1984.
2. Козачок А. Г. Проблемы построения голографических измерительных систем // Тез. докл. Всесоюз. конф. по измерительным информационным системам «ИИС-75». — Кишинев: Политехн. ин-т, 1975. — Т. 1.
3. Козачок А. Г. Голографические измерительные системы — новый класс информационно-измерительных систем // Голографические измерительные системы: Сб. науч. тр. — Новосибирск: НЭТИ, 1976.
4. Де С. Т., Козачок А. Г., Логинов А. В. и др. О погрешности определения рельефа поверхности методом двухдлинноволновой интерферометрии // Там же.
5. Де С. Т., Козачок А. Г., Логинов А. В., Солодкин Ю. Н. Измерение параметров рельефа поверхностей методом двухдлинноволновой интерферометрии // Там же.
6. Де С. Т., Ким В. Ф., Козачок А. Г., Логинов А. В. Анализ схем регистрации двухдлинноволновых топографических изображений // Там же.
7. Де С. Т., Логинов А. В., Малеев Н. М., Павликов А. И. Ионные газовые лазеры для голографии // Там же.

8. Де С. Т., Козачок А. Г., Логинов А. В., Солодкин Ю. Н. Голографический интерферометр с минимальной погрешностью измерения смещений и деформаций // Там же.—1978.
9. Ким В. Ф., Козачок А. Г., Логинов А. В., Солодкин Ю. Н. Анализ пространственных шумов изображений диффузных объектов в когерентном свете // Там же.—1980.
10. Де С. Т., Козачок А. Г., Логинова Н. А., Натальченко В. В. Измерительная система для исследования статистических характеристик яркости изображений // Там же.
11. Цапенко М. П., Алиев Т. И., Клисторин И. Ф. и др. Современное состояние и перспективы развития измерительных информационных систем // Измерения, контроль, автоматизация.—1981.—Вып. 5.
12. Козачок А. Г. Вопросы автоматизации прочностных исследований на основе методов когерентной оптики и голографии // Автометрия.—1982.—№ 4.
13. Гужов В. И., Дружинин А. И., Козачок А. Г., Логинов А. В. Измерительно-вычислительная система для исследования напряженно-деформированного состояния объектов // Там же.
14. Де С. Т., Козачок А. Г., Логинов А. В., Солодкин Ю. Н. Использование двухдлинноволновой интерферометрии при исследовании деформаций и вибраций объектов // Проблемы прочности.—1976.—№ 5.
15. Де С. Т., Логинов А. В., Козачок А. Г. и др. Анализ метрологических характеристик двухдлинноволнового голографического интерферометра для измерения параметров рельефа поверхностей // Приборы и системы управления.—1976.—№ 9.
16. Гинзбург Э. С., Гришанов А. Н., Козачок А. Г. и др. Экспериментальное исследование характеристик спекл-структуры голографических изображений // Системы автоматизации обработки оптической информации: Межвуз. сб. науч. тр.—Новосибирск: НЭТИ, 1984.
17. Дружинин А. И., Козачок А. Г., Логинов А. В., Цигуткин В. И. Об использовании систем автоматизации обработки оптической информации для решения задач фазометрии // Там же.
18. Гужов В. И., Родионов В. А. Цифровое моделирование оптических систем для фазометрии // Там же.
19. А. с. 714144 СССР. Способ определения деформаций объекта / С. Т. Де, А. Г. Козачок, А. В. Логинов, Ю. Н. Солодкин.—Опубл. 05.02.80, Бюл. № 5.
20. А. с. 838327 СССР. Устройство для расшифровки голографических интерферограмм / С. Т. Де, А. Г. Козачок, А. В. Логинов, Ю. Н. Солодкин.—Опубл. 15.06.81, Бюл. № 22.
21. Козачок А. Г. Возможности и перспективы голографической топографии // Использование оптических квантовых генераторов в современной технике.—Л.: ЛДНТМ, 1977.
22. Козачок А. Г., Солодкин Ю. Н. Определение деформаций на голографической интерферограмме // Там же.
23. Де С. Т., Козачок А. Г., Логинов А. В. и др. Голографическая измерительная система для решения задач экспериментальной механики // Мат-лы 2-го Всесоюз. симп. «Оптическое приборостроение и голография».—Львов: Политехн. ин-т, 1976.—Кн. 2.
24. Де С. Т., Козачок А. Г., Логинов А. В., Солодкин Ю. Н. Голографическая система для получения, обработки и расшифровки интерферограмм // Квантовая электрон.—1977.—4, № 1.
25. Гурьев Л. П., Гужов В. И., Козачок А. Г. и др. Универсальная измерительно-вычислительная система для обработки голографических изображений // Мат-лы 6-й Всесоюз. конф. «Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ».—Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1981.
26. Гужов В. И., Козачок А. Г., Лопарев Е. Г. и др. Голографическая измерительная система для определения поля разности фаз методом внесения контролируемого фазового сдвига // Автометрия.—1986.—№ 2.
27. Герасимов С. И., Гужов В. И., Жилкин В. А., Козачок А. Г. Автоматизация обработки интерференционных картин при исследовании полей деформаций // Завод. лаб.—1985.—№ 4.
28. Козачок А. Г. Проблемы обработки информации в голографических измерительно-вычислительных комплексах // Тез. докл. Всесоюз. конф. по измерительным информационным системам.—Львов: Политехн. ин-т, 1981.

29. Гужов В. И., Дружинин А. И., Козачок А. Г. и др. Некоторые вопросы использования мини- и микроЭВМ в системах автоматизации обработки когерентно-оптической информации // Мат-лы 16-й Всесоюз. школы по автоматизации научных исследований.—Горький: ГУ, 1982.
30. Козачок А. Г., Солодкин Ю. Н. Голографические методы измерений.—Новосибирск: НЭТИ, 1985.
31. Васильев А. М., Гик Л. Д., Козачок А. Г. и др. Исследование деформаций оболочек методом голографической интерферометрии // Тез. Всесоюз. конф. «Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ».—Новосибирск, 1970.
32. Васильев А. М., Гик Л. Д., Козачок А. Г. и др. Исследование деформаций и вибраций методом голографической интерферометрии // Автометрия.—1971.—№ 1.
33. Васильев А. М., Гик Л. Д., Гурьев Л. П., Козачок А. Г. Голографические методы исследований форм колебаний сложных объектов // Мат-лы Всесоюз. конф. «Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ».—Новосибирск, 1972.
34. А. с. 1022209 СССР. Устройство для отображения информации на экране электронно-лучевой трубки /Л. П. Гурьев, В. Г. Нечаев, А. Г. Козачок.—Опубл. 07.06.83, Бюл. № 21.
35. А. с. 1116325 СССР. Фотометр /Л. П. Гурьев, В. Г. Нечаев, А. Г. Козачок.—Опубл. 30.09.84, Бюл. № 36.
36. А. с. 1389010 СССР. Устройство для оконтуривания изображений интерферограмм /Л. П. Гурьев, А. Г. Козачок, В. Г. Нечаев.—Опубл. 15.04.88, Бюл. № 14.
37. А. с. 1392389 СССР. Способ определения амплитуд вибраций и голографическая система для его осуществления /Л. П. Гурьев, Б. В. Карпюк, А. Г. Козачок и др.—Опубл. 30.04.88, Бюл. № 16.
38. Солодкин Ю. Н. Измерение величин в системах остаточных классов // Измерения. Контроль. Автоматизация.—1991.—№ 2.
39. Солодкин Ю. Н. Методы измерений в остаточных классах // Измерительные информационные системы (ИИС-91): Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф.—С.-Петербург: ЦП ВНТО приборостроителей им. С. И. Вавилова, ВНИИЭП, ЛГТУ, 1991.
40. Гужов В. И., Солодкин Ю. Н. Использование свойств целых чисел для расшифровки интерферограмм // Оптика и спектроскопия.—1988.—65, вып. 5.
41. Гужов В. И., Солодкин Ю. Н. Оценка точности целочисленного интерферометра // Там же.—Вып. 6.
42. Genender M. I., Gushov V. I., Kozachok A. G., Solodkin Yu. N. Geometric form definition of cosmic technical objects // 1st Sino-Soviet Symposium on Astronautical Science and Technology: Abstracts.—China, Harbin, 1991.
43. Брандт Х., Солодкин Ю. Н. О возможности коррекции результата в целочисленных интерферометрах // Автометрия.—1992.—№ 4.
44. Ракушин Ю. А., Солодкин Ю. Н. Методы расшифровки голографических интерферограмм // Голографические измерительные системы /Под ред. А. Г. Козачка.—Новосибирск: НЭТИ, 1976.—Вып. 1.
45. Логинов А. В., Солодкин Ю. Н., Чудновский А. И. Возможности и перспективы использования когерентно-оптических методов при анализе длительной прочности // Там же.—1978.—Вып. 2.
46. Павликов А. И., Хандогин В. А. Измерение поля перемещений в окрестности конца разреза // Там же.—1980.—Вып. 3.
47. Хандогин В. А. Приложения когерентно-оптических методов измерений к решению некоторых задач теории трещин (обзор) // Там же.
48. Gushov V. I., Solodkin Yu. N. Automatic processing of fringe patterns in integer interferometers // Opt. and Lasers in Eng.—1991.—14.—Р. 311.
49. Солодкин Ю. Н. Голографический интерферометр как измерительный прибор // Автометрия.—1973.—№ 5.
50. Васильев А. М., Де С. Т., Логинов А. В., Солодкин Ю. Н. Исследование вибрационных характеристик объектов методом голографической интерферометрии // Там же.
51. Евсеенко Н. И., Солодкин Ю. Н. Влияние положения детали в лазерном пучке на точность определения ее размера по дифракционной картине // Изв. вузов. Приборостроение.—1983.—№ 11.

52. Евсеенко Н. И., Козачок А. Г., Солодкин Ю. Н. Анализ дифракционных способов измерения линейных размеров // *Метрология*.—1984.—№ 2.
53. А. с. 1165885 СССР. Устройство для определения смещений точек поверхности объекта / Л. П. Гурьев, Н. И. Евсеенко, В. Г. Нечаев, Ю. Н. Солодкин.—Опубл. 07.07.85, Бюл. № 25.
54. Гурьев Л. П., Карпюк Б. В., Нечаев В. Г. и др. Голографическая система для исследования вибрационных характеристик изделий // *Проблемы автоматизации в прочностном эксперименте: Тез. докл. 6-го Всесоюз. симп.*—Новосибирск, 1986.
55. Васильев А. М., Гик Л. Д., Козачок А. Г. и др. О возможности применения голографических методов в исследовании прочности // *Автоматизация экспериментальных исследований: Тез. докл. Всесоюз. конф.*—Куйбышев: КуАИ, 1971.
56. Васильев А. М., Гик Л. Д., Козачок А. Г. и др. Применение метода голографической интерферометрии для контроля деформаций и вибраций // *Там же*.
57. Васильев А. М., Гик Л. Д., Козачок А. Г. и др. Применение метода голографической интерферометрии для контроля деформаций и вибраций // *Автоматизация оптических методов измерений и контроля линейных и угловых величин.*—М.: МДНТП, 1971.—Сб. 1.
58. Васильев А. М., Гик Л. Д., Гурьев Л. П. и др. Голографические методы исследования форм колебаний сложных объектов // *Когерентно-оптические элементы обработки информации: Тез. докл. Всесоюз. конф. «Автоматизация научных исследований на основе применения ЭЦВМ».*—Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1972.
59. Гужов В. И., Лопарев Е. Г., Солодкин Ю. Н. Автоматизация получения, обработки и расшифровки спекл-интерферограмм // *Интерференционные оптические методы механики твердого тела и механики горных пород: Тез. докл. Всесоюз. сем.*—Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1985.
60. Гужов В. И., Тимшин А. В. Устранение фазовой неопределенности при расшифровке голографических интерферограмм // *Там же*.
61. Гужов В. И., Лопарев Е. Г., Солодкин Ю. Н. Автоматизация получения, обработки и расшифровки спекл-интерферограмм // *Там же*.
62. А. с. 1357712 СССР. Способ определения разности фаз / В. И. Гужов, Ю. Н. Солодкин.—Опубл. 07.12.87, Бюл. № 45.
63. 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: Тез. докл. Всесоюз. сем.*—М.: МДНТП, 1989.
64. Gushov V. I., Solodkin Yu. N. Using integer properties for automatic processing fring patterns // *Physical Research Fringe'89 Automatic Processing of Fring Patterns /Ed. W. Osten et al.*—Berlin: Academie-Verlag, 1989.
65. Solodkin Yu. N. Integer Michelson: State-of-the-Art and Applications.—Poland, Warsaw, 1989.
66. Solodkin Yu. N. Integer Michelson Interferometer // *Proc. of SPIE (Reports of Interferometry'89).*—Bellingham, 1990.
67. А. с. 1538046 СССР. Способ измерения шероховатости поверхности / И. В. Кузнецова, Н. А. Логинова, Ю. Н. Солодкин.—Опубл. 23.01.90, Бюл. № 3.
68. А. с. 1619033 СССР. Способ определения разности фаз световых волн / В. И. Гужов, Ю. Н. Солодкин.—Опубл. 07.01.91, Бюл. № 1.
69. А. с. 1663416 СССР. Интерференционное устройство для измерения перемещений объектов / В. И. Гужов, И. В. Кузнецова, Ю. Н. Солодкин.—Опубл. 15.07.91, Бюл. № 26.
70. Гужов В. И., Тимшин А. В., Цигуткин В. И. Специфика цифровой обработки голографических интерферограмм в системах с управляемым фазовым сдвигом // *Автоматизация научных исследований: Тез. докл. 19 Всесоюз. шк.*—Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1985.
71. Гужов В. И., Цигуткин В. И. Расшифровка сдвиговых интерферограмм в системах контроля формы оптических поверхностей // *Тез. докл. Всесоюз. симп. «Методы и применение голографической интерферометрии».*—Куйбышев: КуАИ, 1990.
72. Васильев А. М., Де С. Т., Логинов А. В. Лабораторный аргоновый лазер с разрядным каналом из окиси бериллия // *Автометрия.*—1972.—№ 5.
73. Васильев А. М., Де С. Т., Логинов А. В. Лабораторный ионный лазер // *Проблемы голографии.*—М.: МИРЭА, 1973.—Вып. II.

74. Васильев А. М., Де С. Т., Логинов А. В. Лабораторный ионный лазер с выходной мощностью 5 Вт // Тез. докл. Всесоюз. симп. «Проблемы технического применения голографии в системах контроля качества материалов и изделий». — Пенза: Политехн. ин-т, 1972.
75. Логинов А. В. Порог чувствительности двухдлинноволнового голографического интерферометра // Тез. докл. I Всесоюз. симп. «Оптическое приборостроение и голография». — Львов: Политехн. ин-т, 1976. — Кн. 2.
76. Де С. Т., Денежкин Е. Н., Хандогин В. А. Применение муара интерференционных полос для обнаружения дефектов // Дефектоскопия. — 1984. — № 12.
77. Де С. Т., Денежкин Е. Н., Хандогин В. А. Голографический неразрушающий контроль трехслойных панелей // Там же. — 1986. — № 1.
78. Де С. Т., Денежкин Е. Н., Козачок А. Г., Хандогин В. А. Голографическая система контроля дефектов в сотовых авиационных конструкциях // Тез. докл. X Всесоюз. науч.-техн. конф. «Неразрушающие физические методы и средства контроля», Львов, 1984. — М.: НИИИИИ, 1985. — Кн. 1.
79. Хандогин В. А. Особенности измерений полей перемещений методом спекл-фотографии // Автометрия. — 1985. — № 5.
80. Положительное решение на заявку 3777378/24 СССР. Способ измерения дисторсий оптических систем / В. А. Хандогин. — Принято 27.07.84.
81. Гришанов А. Н., Де С. Т., Ильиных С. П., Хандогин В. А. Количественная расшифровка интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов. Ч. I. Анализ и алгоритмы // Автометрия. — 1989. — № 1.
82. Хандогин В. А., Гришанов А. Н., Гурьев Л. П., Поткин А. С. Голографическая интерференция при подвижной регистрирующей среде // Там же.
83. Де С. Т., Ильиных С. П., Хандогин В. А. Количественная расшифровка интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов. Ч. II. Реализация алгоритмов // Там же.
84. Денежкин Е. Н., Ильиных С. П., Хандогин В. А. Количественная расшифровка интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов. Ч. III. Родственные алгоритмы // Там же. — № 2.
85. Де С. Т., Денежкин Е. Н., Ильиных С. П., Хандогин В. А. Универсальная система расшифровки интерферограмм // Тез. докл. зонального науч.-техн. сем. «Применение лазеров в промышленности и научных исследованиях». — Челябинск: Политехн. ин-т, 1988.
86. Денежкин Е. Н., Ильиных С. П., Хандогин В. А. Голографический неразрушающий контроль композитных цилиндрических оболочек // Дефектоскопия. — 1989. — № 3.
87. Ильиных С. П., Хандогин В. А. Программно-алгоритмический комплекс расшифровки интерферограмм // Тез. докл. Всесоюз. симп. «Методы и применение голографической интерферометрии». — Куйбышев: Политехн. ин-т, 1990.
88. Хандогин В. А., Де С. Т., Ильиных С. П. Программно-алгоритмический комплекс для расшифровки интерферограмм // Оптика и спектроскопия. — 1989. — 66, вып. 3.

Поступила в редакцию 21 сентября 1992 г.

УДК 535.411.01

Б. В. Карпюк, Ю. Н. Солодкин

(Новосибирск)

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ С УПРАВЛЯЕМЫМ ФАЗОВЫМ СДВИГОМ

Рассмотрены как систематические, так и случайные составляющие погрешности измерения фазы интерферометром с управляемым фазовым сдвигом. Получены средние квадратические и максимальные оценки случайной погрешности.

Метод измерения фазы интерферометром с управляемым фазовым сдвигом получил широкое распространение, так как он позволяет определить фазу в пределах 2π с высокой точностью по результатам измерений