

УДК 004.94

МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАНОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

М. Е. Гусев¹, А. А. Воронин¹, В. С. Гуревич², А. М. Исаев², И. В. Алексеенко³,
В. И. Редкоречев⁴

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

² Научно-производственная фирма «Центр лазерных технологий», Алматы, Казахстан

³ Институт технической оптики Штуттгартского университета, Штуттгарт, Германия

⁴ НПО «Академприбор», Ташкент, Узбекистан

miegus@mail.ru, vgurev@nursat.kz, ingwarr@mail.ru, vliv@tps.uz

В работе проведено сопоставление классических и цифровых методов голографической интерферометрии, показано преимущество цифровой голографии. Описаны новые цифровые методы, расширяющие возможности голографических измерений, диапазон исследований, наглядность представления результатов. Проанализированы все этапы регистрации, обработки и представления результатов измерений, проведены оценки требований к регистрирующим устройствам. Подробно рассмотрены проблемы автоматизации процесса голографических измерений, программно-аппаратные средства для создания полностью автоматизированного цифрового голографического измерительного комплекса. Приведены практические примеры использования цифровой голографии в механике, контрольно-измерительной технике, оптико-физических измерений. Показано, что данные цифровые голографические системы могут эффективно использоваться для измерений перемещений нанометрового диапазона.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия, цифровая голография, виброметрия, наноизмерения, неразрушающий контроль, бесконтактная диагностика.

Введение

Известны три основных метода классической голографической интерферометрии: метод двух экспозиций, метод усреднения по времени и метод реального времени [1]. Кроме того, к ним следует добавить разработанный в 1968 году стробоголографический метод [2]. Все указанные методы в классическом варианте основаны на использовании фотоматериалов, требующих химической обработки. Используются также методы регистрации голограмм на фототермопластический носитель, позволяющие реализовать многократный цикл регистрации и стирания (после восстановления и фиксации голограммы на видеоустройство) [3]. Следует отметить, что для восстановления голограмм в классических методах наличие лазерного источника обязательно. Это приводит к существенным ограничениям при практическом использовании голографической интерферометрии как средства оптико-физических измерений.

В конце 80-х годов, с появлением высокоразрешающих цифровых видеокамер технического зрения, в мире начался постепенный переход к цифровым методам голографической интерферометрии, которые в настоящее время практически полностью вытеснили классические [4]. В этом случае регистрация голограмм осуществляется на матричный светочувствительный сенсор и полученное таким образом изображение (цифровая голограмма)

фиксируется в памяти компьютера. Последующая цифровая обработка такой голограммы позволяет отдельно восстановить амплитудное и фазовое распределение в объектном луче. Для получения интерферограммы вычитают одно из другого фазовые распределения, и получают распределение разности фаз в зависимости от координат точек объекта. С учетом длины волны лазера, фазовое распределение легко пересчитывается в распределение перемещений.

В настоящей работе проанализированы различные методы современной цифровой голографии, проведено их сравнение с классическими, показаны сходство и отличие. Подробно рассмотрены стадии регистрации, обработки и представления результатов измерений. Особое внимание уделено чувствительности методов к перемещениям, в частности, вопросам измерений в нанометрическом диапазоне. Представлены результаты измерений и испытаний, как на модельных объектах, так и на натуральных конструкциях. Также в работе приведены последние данные по усовершенствованию программного обеспечения для количественной обработки цифровых интерферограмм, приведены примеры практического применения цифровой голографии для дефектоскопии реальных объектов.

Одним из основных результатов настоящей работы является развитие методов многоэкспозиционной регистрации голограмм и создание методик и технических средств для представления результатов измерений в виде интерференционного фильма (киноголография). Эту группу методов можно рассматривать как 4-х мерную голографию, где к трем пространственным координатам добавляется их изменение во времени. Это позволяет получить полную картину динамических деформаций во времени, во много раз сократить время исследования сложных динамических процессов, определить моменты наиболее важных изменений в состоянии объекта. Киноголографические методы отличаются высокой наглядностью и вариативностью. В докладе представлены два киноголографических метода, проведен сравнительный анализ, определены преимущества, выделены недостатки.

1. Цифровая голографическая интерферометрия

1.1. Взаимодействие волновых полей в голографической интерферометрии

Для математического описания взаимодействия волновых полей в голографической интерферометрии воспользуемся методом комплексных амплитуд [5]. Если плоская электромагнитная волна описывается уравнением

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \mathbf{E}_0 e^{-i[\omega t - (kr) + \varphi_0]}, \quad (1.1)$$

то в комплексную амплитуду $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ не входит временная составляющая ωt и начальная фаза φ_0 , т.е.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \mathbf{E}_0 e^{i(kr)} \quad (1.2)$$

Здесь \mathbf{E}_0 - амплитуда вектора напряженности электрического поля в электромагнитной волне, в точности соответствующая амплитуде в уравнении (1.1).

В голографической интерферометрии взаимодействуют два восстановленных волновых поля \mathbf{E}_{o1} и \mathbf{E}_{o2} , отвечающих за два состояния объекта (метод 2-х экспозиций)

$$\mathbf{E}_p = \mathbf{E}_{o1} + \mathbf{E}_{o2} \quad (1.3)$$

При этом интенсивность восстановленного изображения описывается выражением (рис. 1):

$$\begin{aligned} I_p &= \mathbf{E}_p \mathbf{E}_p^* = \mathbf{E}_{o1} \mathbf{E}_{o1}^* + \mathbf{E}_{o2} \mathbf{E}_{o2}^* + (\mathbf{E}_{o1} \mathbf{E}_{o2}^* + \mathbf{E}_{o1}^* \mathbf{E}_{o2}) = \\ &= I_{o1} + I_{o2} + (\mathbf{E}_{o1} \mathbf{E}_{o2}^* + \mathbf{E}_{o1}^* \mathbf{E}_{o2}) = 2[I_0 + \sin(KL)] = 4I_0 \cos^2(KL/2), \end{aligned} \quad (1.4)$$

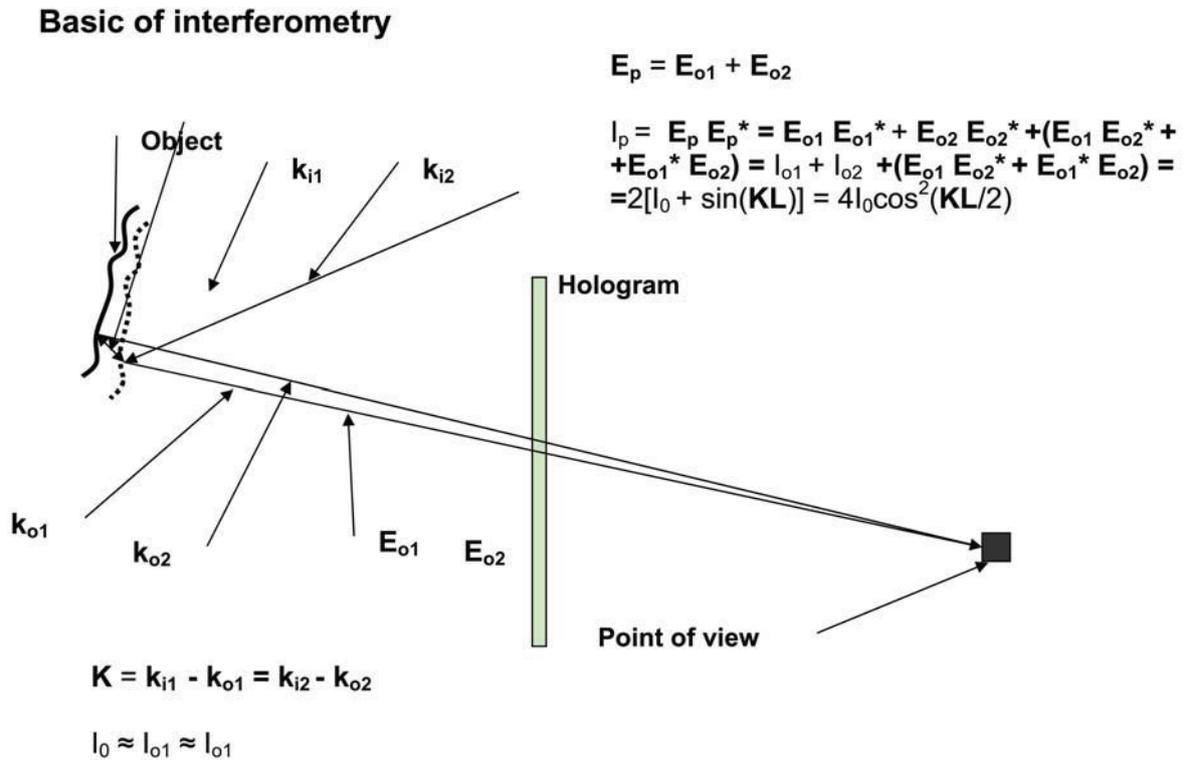


Рис. 1. Основы голографической интерферометрии

где $K = k_{i1} - k_{o1} = k_{i2} - k_{o2}$ — вектор голографической чувствительности, L — вектор перемещения точки объекта

1.2. Методы голографической интерферометрии. Характеристическая функция

Понятие характеристической функции было введено К.А.Стетсоном в работе [6]. Характеристической функцией M_T называется усредненный по времени интеграл

$$M_T = \frac{1}{T} \int_0^T e^{i[\vec{k}\vec{F}(\vec{r},t)]} dt \quad (1.5)$$

где $F(\mathbf{r},t)$ характеризует изменение измеряемой величины во времени

Интенсивность восстановленного интерференционного изображения определяется как:

$$I_{rec} = |M_T|^2 \quad (1.6)$$

Фактически это «видность» интерференционных полос, введенная в работе [7]. Для основных методов голографической интерферометрии характеристические функции будут иметь следующий вид:

1. Метод двух экспозиций	$ M_T ^2 = \cos^2(KL)$,	где $L = L(r)$ — вектор перемещения точек объекта между экспозициями
2. Метод реального времени	$ M_T ^2 = m \cdot \cos^2(KL)$,	где $0 \leq m \leq 1$ — коэффициент, зависящий от разницы интенсивности восстановленного и реального изображения
3. Метод усреднения по времени	$ M_T ^2 = J_0(KA) ^2$	где $A = A(r,t)$ — амплитуда колебаний точек объекта
4. Стробоголографический метод	$ M_T ^2 = \cos^2[(1/2) * (KA) (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2)]$	где φ_1 и φ_2 — фазы импульсов стробирования

1.3. Цифровая регистрация и реконструкция взаимодействия полей

Методы цифровой голографии основаны на применении специализированных цифровых видеокамер в качестве устройства для регистрации голограмм. Следует отметить, что регистрация собственно голограмм методами цифровой голографии не только не дает какого-либо преимущества перед методами регистрации на фоточувствительные материалы (фотоэмульсии, фототермопласт и т. п.), но и приводит к существенному снижению качества восстановленного изображения [4]. Причина этого — сильный спекл-шум, связанный с существенно меньшей разрешающей способностью цифровых видеокамер по сравнению с классическими фоточувствительными материалами. Если в классической голографии пространственная частота записи голограммы, определяемая как

$$f_{\text{пр}} = \frac{1}{d} = \frac{2 \sin \frac{\theta}{2}}{\lambda}, \quad (1.8)$$

где d — расстояние между интерференционными полосами, зависящее от угла θ между опорной и объектной волнами и длины волны λ , составляет 300-1000 лин/мм, то при использовании цифровых видеокамер эта величина снижается до 50-100 лин/мм. Такая необходимость в снижении пространственной частоты вытекает из требований теоремы Котельникова-Шенона [8], которая требует, чтобы интервал дискретизации был меньше, чем $f_{\text{пр}}/2$. Этот интервал, точнее, его минимальное значение, зависит от расстояния между соседними пикселями (светочувствительными элементами) используемой цифровой приемной светочувствительной матрицы применяемой видеокамеры. Так при расстоянии между пикселями Δx предельная частота будет $f_{\text{max}} = 1/\Delta x$, а значит, что $f_{\text{пр}} < f_{\text{max}}/2$. Достичь такого соотношения проблем не составляет, надо лишь уменьшить угол между опорным и объектным лучами. Однако при использовании цифровых видеокамер мы сталкиваемся еще с одной проблемой. В классической интерферометрии размеры спеклов в области голограммы всегда больше, чем расстояние d между интерференционными полосами, определяющими пространственную частоту (больше углы между опорной и объектной волнами и достаточно большие расстояния от голограммы до объекта, см [1], разд. 1.4). Размер спекла рассчитывается как $b_s = 1,5 \frac{\lambda z}{L}$, где L — поперечный размер объекта, z — расстояние от объекта до голограммы. Если используется линза, т. е. регистрируется голограмма сфокусированного изображения, то $b_s = 1,22 \frac{f}{D}$, где f — фокусное расстояние линзы, а D — диаметр зрачка линзы или размер диафрагмы. Нетрудно видеть, что чем выше пространственная частота $f_{\text{пр}}$, тем меньшие размеры спеклов можно допускать. Рис.2 иллюстрирует, как должны соотноситься указанные размеры, однако точные значения необходимо подбирать

экспериментально. Ниже будут обсуждены критерии, позволяющие оценить правильность выбора этих размеров.

Для реконструкции (восстановления изображения объекта) цифровой голограммы, представляющей собой трехмерный массив данных $A \times B \times D$, где $A \times B$ — размер приемного сенсора в пикселах, а D — индекс дискретизации данных каждого пиксела (определяется возможностями компьютера и платы управления камерой), используется компьютерная симуляция сходящегося опорного пучка, либо симуляция линзы, разделяющей изображения в фокальной плоскости [4,8]. Для достижения результата достаточно просто применить двумерное Фурье-преобразование к нашему массиву. При наличии корректно записанной несущей частоты, после преобразования мы получим и сможем посмотреть на экране компьютера Фурье-массив, в котором будет присутствовать три компонента - суперпозиция двух полей в центре, а также объектное поле \bar{E}_0 и его комплексно сопряженное поле \bar{E}_0^* ; одно - справа, другое - слева от суперпозиционного поля (если несущие полосы вертикальны). При наличии диафрагмы ситуация несколько меняется, в соответствующих областях Фурье-массива мы увидим изображения не объекта, а диафрагмы и объектного поля внутри диафрагмы (см. рис. 7). В этом случае, чтобы получить изображение объекта, необходимо применить второе Фурье-преобразование по границам одного из изображений диафрагмы (или по координатам, находящимся внутри диафрагмы). Чем большую площадь диафрагмы мы будем использовать при втором Фурье-преобразовании, тем качественнее восстановим объектное поле [9].

Цифровая голография сохраняет главное преимущество классической голографии - зависимость восстановленного изображения от фазы опорного пучка. Однако, если в классической голографии человеческий глаз способен в этом случае воспринимать изображение как объемное, видеотехника информацию об объемности не дает. Тем не менее, информация о фазе может быть сосчитана и в дальнейшем использована, например, в интерферометрии.

Самый простой, но достаточно трудоемкий способ - это просто вычислить фазу как отношение мнимой и действительной части комплексной амплитуды. Однако сделать это возможно только после второго Фурье-преобразования, т.е. после того, как мы избавимся от несущей и суперпозиции опорного и объектного пучков. Отметим, что хотя первичный массив является реальной функцией, его фурье-образ уже функция комплексная (см., например [9]). После второго Фурье-преобразования полученный массив $u_0(x, y, z_i)$ также будет комплексным. Тогда фаза в каждой точке определяется как

$$\varphi(x, y, z_i) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}[u_0(x, y, z_i)]}{\operatorname{Re}[u_0(x, y, z_i)]} \quad (1.9)$$

Здесь z_i обозначает, что фаза определяется на определенном расстоянии от голограммы (приемного сенсора) [4,9].

Другой метод расчета фазы, описанный в работах [4,9], позволяет обойтись без цифровой реконструкции (двойного Фурье-преобразования), однако в этом случае полосы пространственной частоты должны иметь расстояние d между собой больше, чем 3 пиксела, т. е. $d \gg 3\Delta x$. В этом случае интенсивности на 3-х соседних пикселах можно записать в следующем виде

$$\begin{aligned} I_1 &= 2I_0[1 + \cos(\varphi_0 - \varphi_R - \Delta\varphi)] \\ I_2 &= 2I_0[1 + \cos(\varphi_0 - \varphi_R)] \\ I_3 &= 2I_0[1 + \cos(\varphi_0 - \varphi_R + \Delta\varphi)] \end{aligned} \quad (1.10)$$

где $\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta x}{d}$.

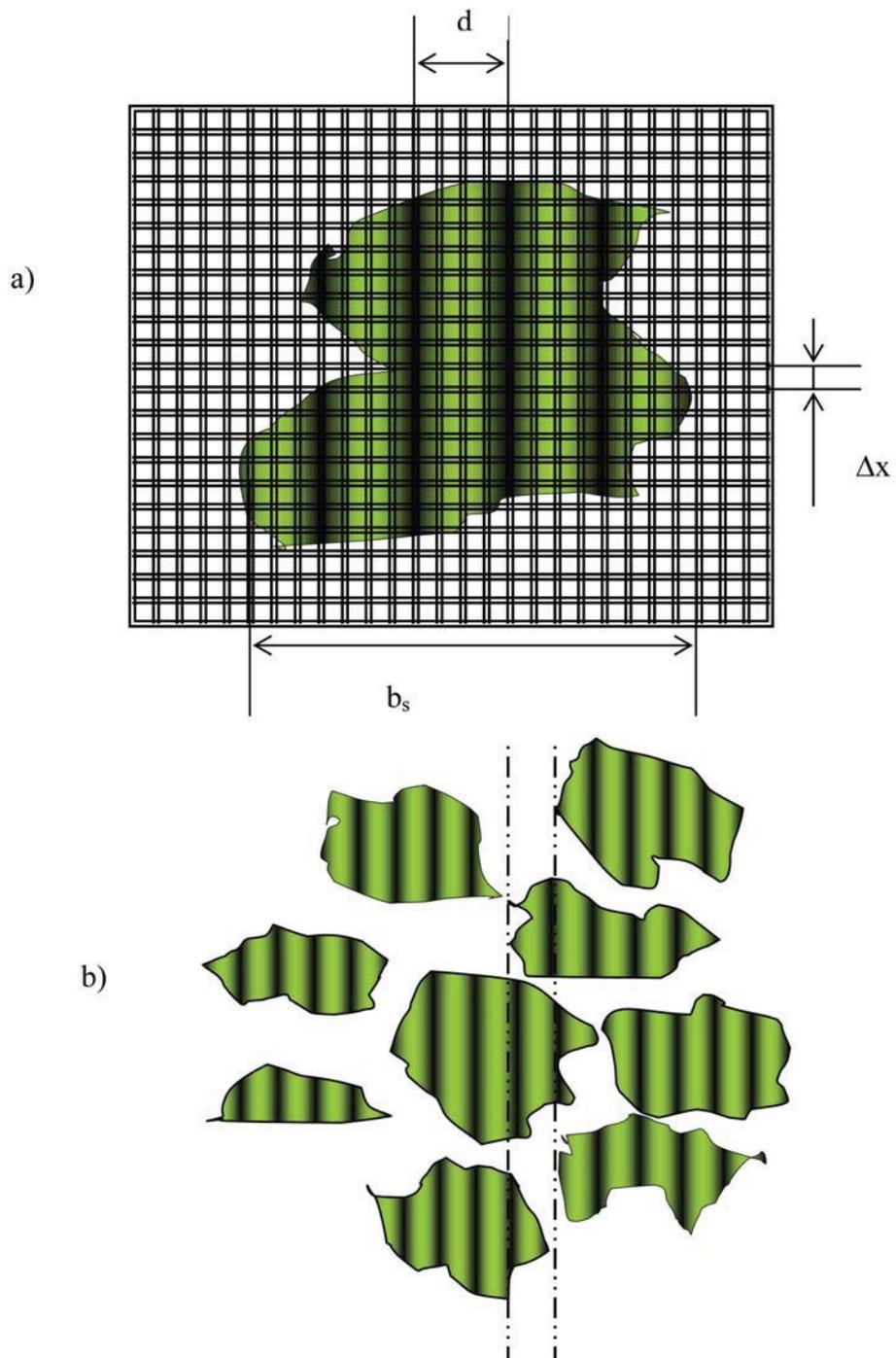


Рис. 2. Выбор оптимального размера спекла

Тогда, исключая из уравнений I_0 и φ_R , получим для φ_0

$$\varphi_0(x, y) = \operatorname{arctg} \left[\frac{I_1 - I_3}{I_1 + I_3 - 2I_2} \operatorname{tg} \frac{\Delta\varphi}{2} \right] \quad (1.11)$$

Применяя данную операцию последовательно ко всем тройкам соседних пикселей, т. е. сдвигая каждый раз зарегистрированный массив на $\pm\Delta x$, мы получим распределение фаз объектного луча.

1.4. Особенности цифровой голографической интерферометрии

Задача интерферометрического сравнения для двух известных массивов распределения фазы предельно проста – надо получить распределение разности фаз:

$$\Delta\varphi = \varphi_0^1 - \varphi_0^2 \quad (1.12)$$

Это легко достигается простым вычитанием одного массива из другого. Получаемое при этом тангенциальное распределение яркости интерференционных полос имеет разрывы в фазах $\frac{\pi}{2} + n\pi$. Пример, как выглядят интерференционные полосы (косинусоидальный контраст) и фазовое распределение, рассчитанной методом вычитания (тангенциальный контраст) приведен на рис. 3.

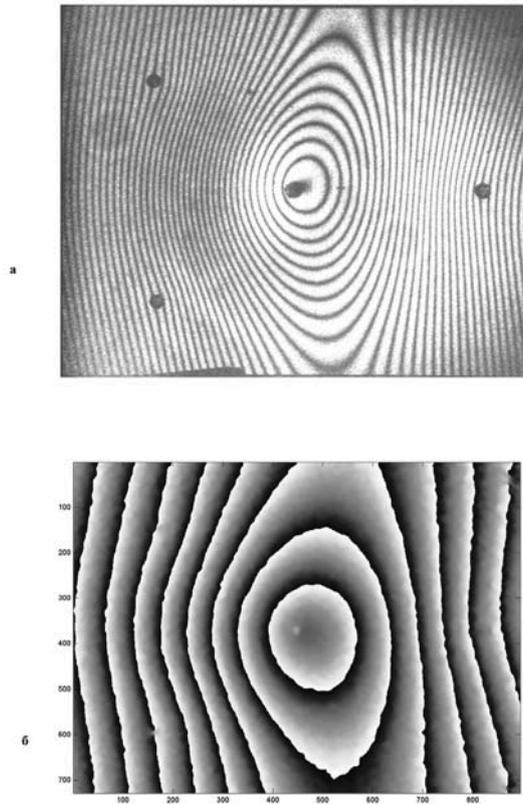


Рис. 3. Косинусоидальный (а) и тангенциальный (б) вид интерференционных полос

Важно подчеркнуть, что полученное тангенциальное распределение чувствительно к направлению перемещения, чего не наблюдается в классической двухэкспозиционной интерферометрии (там контраст полос косинусоидальный). Это сразу решает проблемы определения знака перемещений и существенно облегчает расчет полной картины разности

фаз $\Delta\varphi_{obj}(x, y)$ в плоскости объекта. Как известно, $\Delta\varphi = (\vec{K} \cdot \vec{L})$ (см. [9]), поэтому полный расчет вектора перемещений \vec{L} требует, как минимум, трех разных \vec{K} , т. е. Необходимо записать и рассчитать три интерферограммы с тремя разными значениями \vec{K} , или получить интерферограмму одного и того же процесса с трех разных направлений.

Основные различия между цифровой и классической голографической интерферометрией можно свести к следующему:

	Классические	Цифровые
Метод двух экспозиций	$E_p(\mathbf{r}) = E_{o1}(\mathbf{r}) + E_{o2}(\mathbf{r})$ $I_p(\mathbf{r}) = 4I_0 \cos^2(\Delta\phi_{12}/2)$ $\Delta\phi_{12}(\mathbf{r}) = 2 \cdot \arccos[\sqrt{I_p/4I_0}]$ Интерферируют 2 изображения, восстановленные опорным лучом Контраст косинусоидальный	$\phi_1 = \arctg[\text{Im}(E_{o1})/\text{Re}(E_{o1})]$ $\phi_n = \arctg[\text{Im}(E_{o1})/\text{Re}(E_{o1})]$ $\Delta\phi_{nm} = \phi_n - \phi_m$ Интерферограмма рассчитывается компьютером по 2-м цифровым голограммам Контраст тангенциальный
Метод реального времени	$E_p(\mathbf{r}) = E_{o1}(\mathbf{r}) + m \cdot E_{o2}(\mathbf{r})$ $m \leq 1$ Видность полос: $ M_t ^2 = 0,5 \cdot [1 + m \cdot \sin(\Delta\phi_{12})]$ Интерферируют изображения разной яркости	Вычитание изображений $I_v = (I_0 - I_t) \cdot F$ где F — частота кадров. $T_{\text{эксп.}} \leq 1/F$ $ M_{t2} = 0,5 \cdot [1 + \sin(\Delta\phi_{12})]$ Наблюдается картина разности 2-х изображений с частотой кадровой развертки
Метод усреднения по времени	$F(\mathbf{r}, t) = A(\mathbf{r}) \sin \omega t$ $ M_t [KA(t)] ^2 = J_0^2 [KA(\mathbf{r}, t)]$ Видность полос определяется функцией Бесселя (быстрое падение яркости относительно нулевой линии)	Квазибинарная голограмма В основном наблюдаются узловые линии
Стробоголографический метод	$F(\mathbf{r}, t) = A(\mathbf{r}) \sin \omega t$ $ M_{\Gamma^2} = \cos^2 [(1/2) (KA) (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2)]$ Стробирование модуляцией излучения лазера, непрерывного с накоплением, или 2-х импульсного	Стробирование реализуется самой камерой. $T_{\text{эксп.}} \leq 1/F \leq T_{\text{кол.}}$ Фактически 2-х экспозиционный метод

1.5. Новые возможности цифровой голографии

Анимация изображений (интерференционный фильм)

Попарное сравнение цифровых голограмм предоставляет уникальные возможности создавать интерференционные фильмы. Если мы регистрируем N цифровых голограмм изменяющегося во времени процесса, то, выбирая способ регистрации последовательности цифровых голограмм с заданным временным интервалом, мы получим серию вида:

$$N_1(t_1), N_2(t_1 + \Delta t), N_3(t_1 + 2\Delta t) \dots N_n(t_1 + n\Delta t)$$

Из такой последовательности цифровых голограмм легко получить последовательность цифровых интерферограмм вида:

$$M_1 = N_2 - N_1, M_2 = N_3 - N_1 \dots M_{n-1} = N_n - N_1$$

Преобразовав данную последовательность в видеофильм, получим картину изменения процесса во времени, или 4D- интерферометрию. $M_1 = N_2 - N_1$. На рис.10а Приведены необходимые пояснения к способу регистрации, а также фрагменты интерференционных фильмов колебаний модельного объекта при вибрационном нагружении [10].

Метод фазового сложения

Так как для вычисления интерферограммы мы можем использовать любые пары голограмм из последовательности, то мы можем использовать это для измерений больших перемещений, выходящих за пределы корреляционных свойств регистрирующей системы. Если перемещение L не регистрируется методом двух экспозиций, то мы можем зарегистрировать данное перемещение за N шагов, т.е.

$$L = N \cdot \Delta L, M_1 = N_2 - N_1, M_2 = N_3 - N_2 \dots M_{n-1} = N_n - N_{n-1}$$

При этом при каждом шаге мы не выходим за пределы корреляции. Далее мы просто получаем суммарную интерферограмму

$$M = \sum_i M_i$$

На рис. 10б проиллюстрирован данный метод для регистрации перемещения в 100 мкм, которое нельзя получить прямым методом 2-х экспозиций [11]

$$M_1 = N_2 - N_1, M_2 = N_3 - N_1 \dots M_{n-1} = N_n - N_1$$

Метод накопления

По сути – это возврат к классическому методу стробоголографии, когда камера включена на довольно длительное время, а движение объекта «замораживается» за счет стробирования. Движение объекта при этом должно быть периодическим. Применять метод можно, когда энергии в одной экспозиции не достаточно для регистрации цифровой голограммы. Суть метода приведена на рис. 1.

Таким образом, мы можем утверждать, что цифровые методы не только полностью эквивалентны классическим (за исключением усреднения по времени), но и позволяют существенно расширить возможности голографических измерений [12].

2. Программно-аппаратные средства цифровой голографической интерферометрии

2.1. Автоматизированный цифровой голографический измерительный комплекс

Состав комплекса и оптическая схема регистрации цифровых голограмм приведены на рис.4. Стрелочками обозначены пути и направления функционального взаимодействия при работе комплекса. Данный комплекс является универсальным и предназначен для решения широкого круга по голографическим измерениям, дефектоскопии, неразрушающему контролю. В конкретных условиях некоторые элементы могут отсутствовать. На представленных далее рис. 5а,5б приведены различные варианты промышленного исполнения голографических автоматизированных систем как с непрерывными, так и с импульсными лазерами.

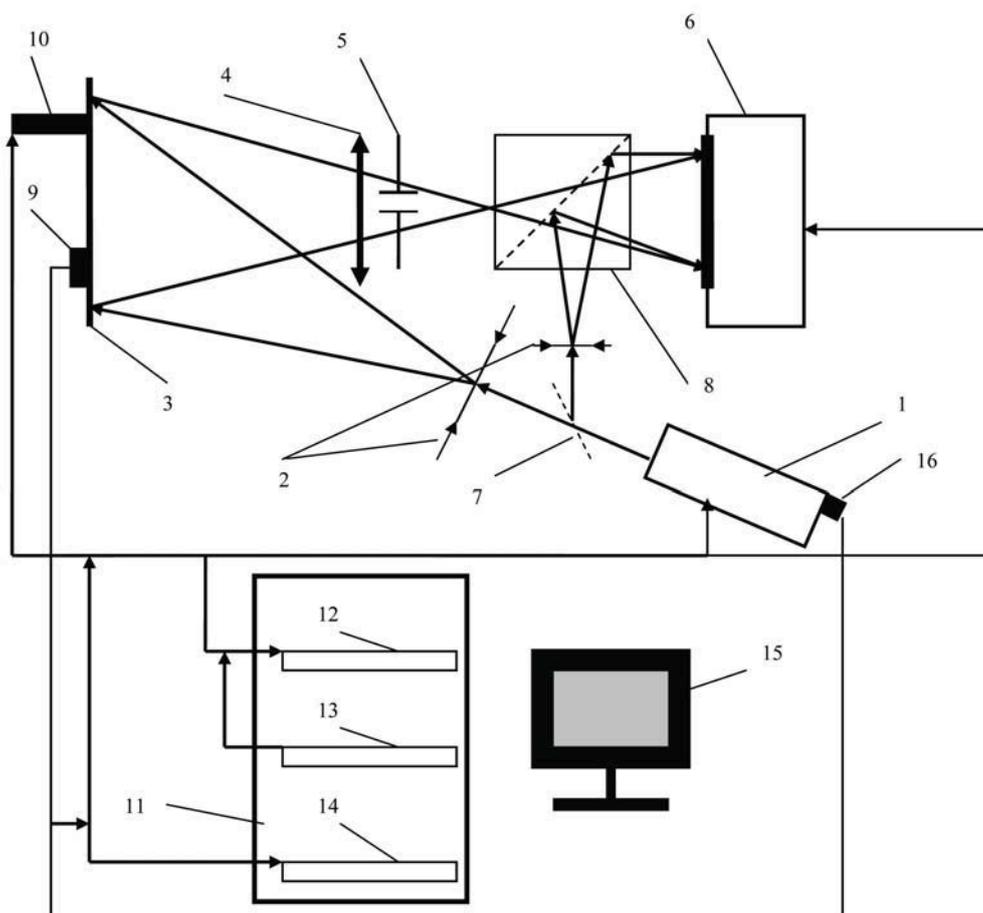


Рис. 4. 1- лазер Nd-YAG, непрерывный, 2, 4, 5, 7, 8 - элементы интерферометра, 3 - объект, 6- CCD-камера Pulnix TM-1320-15CL, 9- датчик состояния процесса, 10 - нагружающий модуль, 11- компьютерный терминал, 12 - плата сбора видеоданных NI IMAQ-1428, 13 - плата таймеров-счетчиков NI PCI-6602, 14-многофункциональная плата ввода-вывода NI PCI-6229, 15-монитор с интерфейсом программы, 16- датчик контроля излучения

Основные области применения подобных комплексов:

1. Анализ полей деформаций при статическом и квазистатическом нагружении – давление, температура, влажность
2. Прочностные и усталостные испытания новых материалов при различных видах нагружения, выявление зон дефектов и закономерностей их развития.
3. Вибрационный анализ - определение форм колебаний, полей виброперемещений при различных видах вибраций - резонансных и вынужденных колебаниях, нестационарных, случайных, многокомпонентных вибрациях.
4. Анализ закономерностей распространения упругих волн при быстропротекающих воздействиях - ударных, взрывных, сейсмических.



а



б

Рис. 5. Комплекс с непрерывным лазером (а), комплекс с импульсным лазером (б)

2.2. Аппаратные средства цифровой голографии

Цифровые видеокамеры технического зрения

В настоящее время производители камер технического зрения предлагают широкий выбор изделий различного функционального назначения. Какой-либо универсальной классификации по типам, устройству и назначению не существует. Тем не менее, в наиболее общем случае, камеры можно разделить на следующие группы:

(1) По типу	<ul style="list-style-type: none"> • Цветные • Черно-белые
(1) По назначению	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Стандартные</u> (ТВ-стандарт, около 500x700 пкс, черезстрочная развертка, 25 -49 кадров/сек.) • <u>Высокоразрешающие</u> (более 1000x1000 пкс, построочная развертка, режим переноса кадров – Interline transfer, менее 20 кадров/сек) • <u>Высокоскоростные</u> (более 100 кадров/ сек) • <u>Высокочувствительные</u> (требуется охлаждение жидким азотом)
(1) По диапазону	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Видимый</u>. 400 – 800 нм • <u>ИК</u>. более 800 нм • <u>УФ</u>. менее 400 нм

Выбор конкретной камеры и производителя определяется задачами исследований или функциональным назначением голографической измерительной системы

Важным аспектом в применении камеры как устройства регистрации цифровых голограмм является способ передачи данных от камеры к компьютеру, а также наличие возможности внешнего управления параметрами камеры, такими как внешний запуск, установки экспозиции, усиления, цветопередачи и т.д. Существуют следующие системы передачи данных:

- *Analog (стандартные камеры)*
- *Camera Link (специальный стандарт передачи данных)*
- *Parallel Digital*
- *USB (без платы ввода)*
- *IEEE 1394 (системы камера – компьютер, без платы ввода)*
- *GigE Vision (безпроводной)*

Платы ввода, или платы сбора видеоданных могут быть в PCI и PXI исполнении

- *PCI Peripheral Component Interconnect. PCI offers a theoretical maximum transfer rate of 133 Mbytes/s. Такие платы вставляются в PCI – слот компьютера*
- *PXI (PCI eXtension for Instrumentation) is an open, PC-based platform for test, measurement, and control. В этом случае плата вставляется в специальные внешний корпус.*

Следует отметить, что камеры и устройства сбора видеоданных выпускаются разными по типу компаниями, и пользователю необходимо самому подбирать необходимую конфигурацию

Электроника автоматизации измерений

При разработке автоматизированного голографического комплекса необходимо выполнить ряд специфических требований, касающихся совместимости аппаратуры регистрации, аппаратуры автоматизации и программного обеспечения вычислительных компонентов процесса измерений и представления результатов.

Автоматизированная голографическая измерительная система должна решить две задачи. Первое – это автоматизация процесса регистрации голограмм. Здесь необходимо организовать управление внешними модулями, задействованными в процессе регистрации, а также принять и отобразить сигналы от датчиков, контролирующих процесс. При этом используются специализированные программно-аппаратные средства. Вторая задача – реконструкция голографических компьютерных изображений, обработка информации и представление ее в удобном пользователю виде. Эта задача решается чисто на программном уровне.

Назначение системы автоматизированной системы в следующем:

- Сбор видеоданных с камеры технического зрения
- Сбор данных с датчиков сигналов
- Формирование сигналов управления внешними устройствами
- Работа в единой программно-аппаратной среде
 - Удобство и гибкость программирования, совместимость с другими программными средствами (C++, MatLab и пр.)
- Управление всеми модулями с единого компьютерного терминала
- Создание интерактивного, удобного пользователю интерфейса

Компоненты компьютерного управления и автоматизации выпускаются различными компаниями и для разных потребностей. Для автоматизации голографических измерений одним из решений является использование программно-аппаратных средств компании «National Instruments». Преимущества данного выбора:

- Широкий выбор аппаратных средств (многофункциональные платы ввода/вывода (аналоговые и цифровые), платы счетчиков – таймеров и др.)

- Выбор устройств сбора видеоданных для различных типов камер технического зрения
- Выбор программного обеспечения для управления и автоматизации (Labview, Measurements Studio и пр.)
- Выбор программного обеспечения для работы с камерами и визуализации
- Совместимость с программами C++ и MatLab

Программно-аппаратная среда Labview

Данной программно-аппаратной среды позволяет полностью автоматизировать процесс голографической регистрации, а именно:

- Реализует независимое компьютерное управления всеми устройствами компании National instruments
- Позволяет создавать удобные пользователю интерфейсы
- Совместимость с программами C++ и MatLab

2.3. Программные средства

Цифровая обработка голограмм. Программная среда MatLab

Совместимость программно-аппаратной среды Labview и программно-вычислительной среды Matlab позволяет полностью совместить процессы регистрации с процессами обработки и представления результатов. Совместное использование программ позволяет реализовать:

- Большое разнообразие цифровых методов обработки изображений
- Возможность реализовать различные методы обработки и представления результатов
- Наглядность представления результатов в удобном пользователю виде

Цифровые методы построения поверхности разности фаз

1. Двойное Фурье-преобразование
2. 3-х пиксельный метод
3. Прямое вычисление разность фаз (без построения интерферограммы)
4. Интерференционные фильмы

Компьютерные интерфейсы

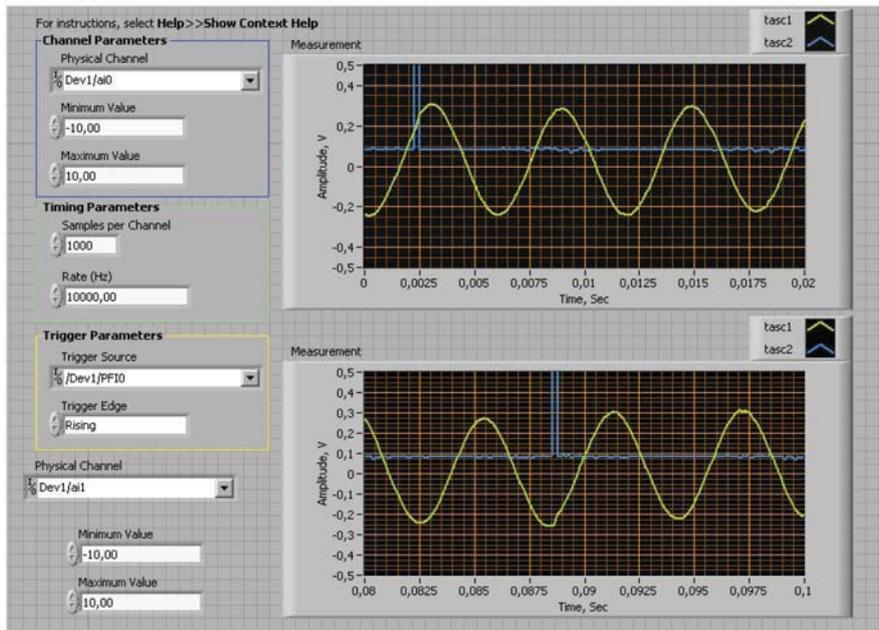
На рис. 6 приведен вид компьютерных интерфейсов для регистрации и обработки цифровых голограмм и отображения результатов измерений. Интерфейс регистрации голограмм сделан в среде Labview и позволяет управлять процессом регистрации и отображать необходимую контрольную информацию от датчиков процесса. Интерфейсы обработки сделаны как в среде Labview, так и в среде Matlab. Интерфейс в среде Matlab является специализированным, предназначенным для решения проблем механики.

Этапы цифровой обработки и получения поверхности разности фаз

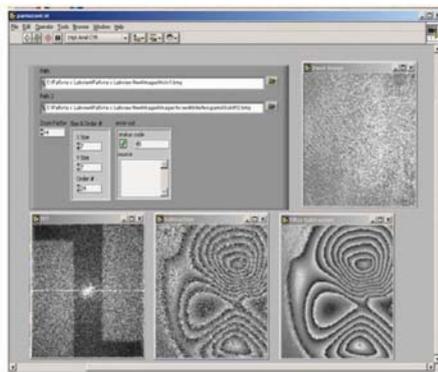
На рис.7 приведены результаты компьютерного построения голографической интерферограммы из 2-х цифровых голограмм. Использован метод двойного Фурье-преобразования. Программа расчета поля перемещений «сшивает» тангенциальные разрывы интерференционных полос.

3. Примеры применения цифровых голографических методов и систем

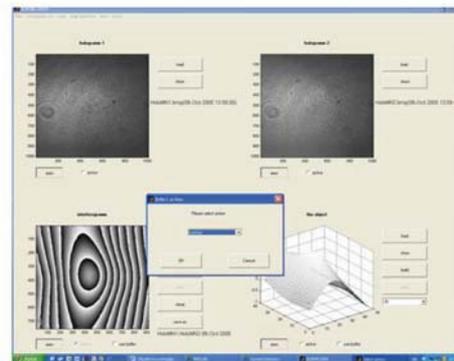
На рис. 8 приводятся результаты применения автоматизированного комплекса для решения различных задач. Ввиду того, что в цифровой голографии на этапе расчета определяется распределение разности фаз между двумя состояниями объекта, данная информация доступна для определения поля перемещений даже когда на интерферограмме нет



а



б



в

РИС. 6. Интерфейсы. а - Интерфейс программы управления и регистрации. б - Последовательность обработки информации в Labview 7.1: фурье-образ, интерферограмма и фильтрация. в - Интерфейс модуля обработки в программе Matlab

полос. На этом построен метод прямого расчета разности фаз. Это позволяет определять перемещения нанометрового диапазона. Пример таких измерений для случая регистрации поверхностно-акустических волн (ПАВ) приведен на рис. 8. Более подробно проблемы измерения параметров ПАВ изложены в работах [13-15]

Выводы

Современные методы цифровой голографии значительно превосходят классические методы голографической интерферометрии по таким параметрам, как чувствительность,

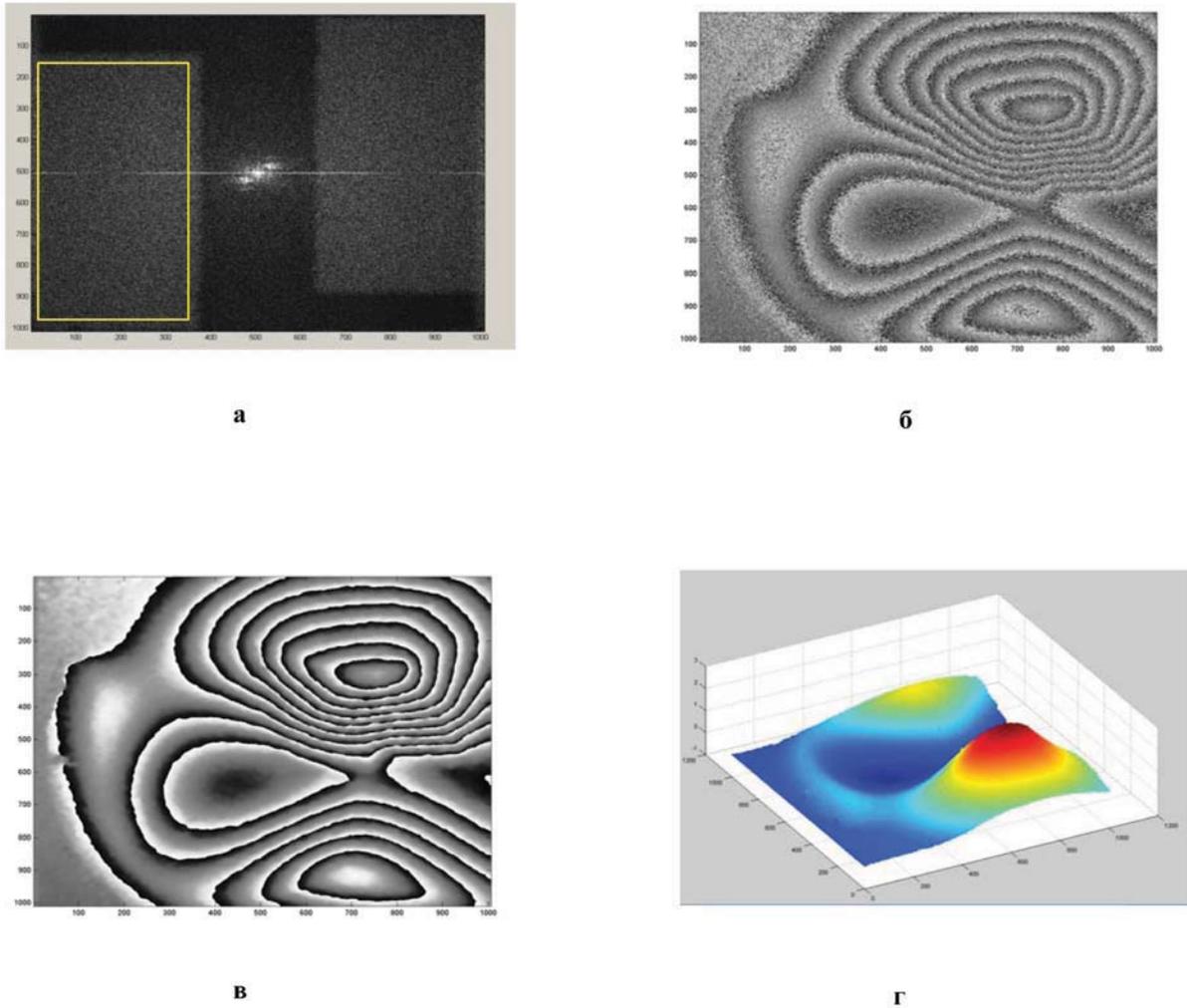
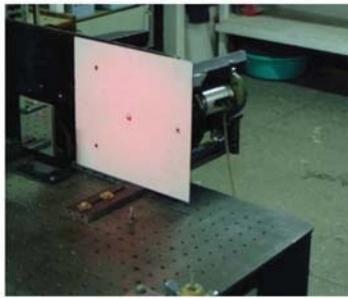


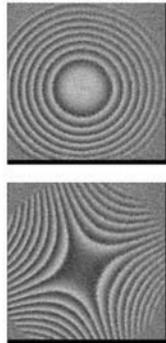
РИС. 7. Последовательность обработки цифровых голограмм. а- Фурье - преобразование Выделена область для обратного преобразования. б - интерферограмма. в- фильтрация. г - Поверхность перемещений

помехозащищенность, быстрота получения конечного результата и наглядность его представления. Они легко встраиваются в автоматизированные измерительные комплексы и могут быть эффективно использованы не только в лабораторных, но и в производственных условиях.

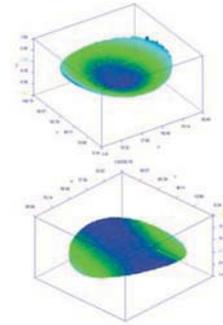
- Цифровые методы голографической интерферометрии позволяют реализовать практически все известные методы классические методы
- Цифровая голография непрерывно развивается, расширяя диапазон измерений, возможности автоматизации, улучшая наглядность представления результатов
- Цифровые данные о поверхность разности фаз легко преобразуются в конкретные измеряемые величины, пригодные для дальнейшего математического анализа



Объект

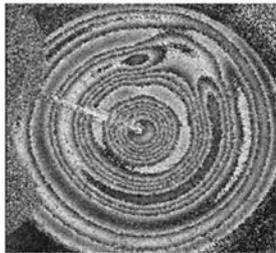


Интерферограммы, непрерывный лазер (верх.) и импульсный (нижн.).



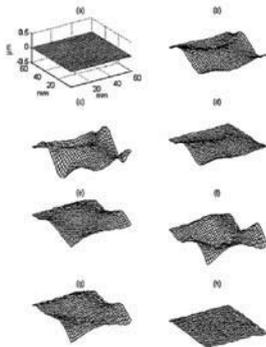
Соответствующие поля перемещений

а



Локализация внутреннего дефекта в геле. Размер геля 140 мм, размер дефекта 2x2 мм, глубина от поверхности 5 мм.

б



Фрагменты интерференционного фильма. Металлическая пластинка 60x60x0,5 мм, частота вибрации – 943 Гц. Длительность 1-ой экспозиции 40 мкс. Фазовый сдвиг между экспозициями равен 1/40 периода

в

РИС. 8. Примеры применения. А- Двухэкспозиционный метод с непрерывным и импульсным лазером. Б- Ударное возбуждение. В- Интерференционный фильм

Литература

- [1] C. M. Vest. Holographic Interferometry. Wiley, 1979
- [2] Sajenko P., Johnson C.D. Stroboscopic holographic interferometry // Appl. Phys. Lett. 1968. 13. P. 44.
- [3] Гусев М.Е., Нарубин С.Л., Алексеенко И.В., Гуревич В.С. Мобильный голографический комплекс // ПТЭ, 1999, № 3, с. 162–163.
- [4] U.Schnars, W.Jupter. Digital holography. Springer Verlag, 2005.
- [5] Франсон М. Голография. М.: Мир, 1972.
- [6] Powell R.L., Stetson K.F. Interferometric analysis by wave-front reconstruction // J. Opt. Am. 1965. 55. P. 1593.
- [7] Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977.
- [8] Pedrini G., Alexeenko I., Gusev M. E., Tiziani H. J. Vibration measurements of hidden object surfaces by using holographic endoscopes // Proc. SPIE. 4827, P. 315–322.
- [9] Pedrini G., Zou Y., Tiziani H. J., Digital double-pulse TV-Holography // Optics and Laser in Engineering, 1997, 26, No. 2-3, P. 199-219.
- [10] Pedrini G., Osten W., Gusev M.E. High-speed digital holographic interferometry for vibration measurement // Applied Optics. 2006. P. 3456.
- [11] Гусев М.Е., Воронин А.А., Гуревич В.С., Исаев А.М., Алексеенко И.В. Современные методы регистрации, восстановления и представления результатов в цифровой голографической интерферометрии // Сб. трудов 7-й Международной научно-практической конференции «Голография – наука и практика» 28-30 сентября 2010 г., Москва, с. 83.
- [12] Гуревич В.С., Гусев М.Е., Гапонов В.Е., Редкоречев В.И. Цифровая голографическая интерферометрия как метод анализа деформаций. Современное состояние и перспективы развития // Сб. трудов 7-й Международной научно-практической конференции «Голография – наука и практика» 28-30 сентября 2010 г., Москва, с. 350–357.
- [13] Гуревич В.С., Редкоречев В.И., Исаев А.М., Гапонов В.Е., Гусев М.Е., Алексеенко И.В., Мельников В.А., Калинин В.А. Применение голографической интерферометрии для измерения полей перемещений нанометрового диапазона // Сборник трудов и официальные материалы научно-практической конференции «Голография в России и за рубежом, наука и практика», 5-я международная конференция Голография экспо - 2008, 1-2 июля 2008, Санкт-Петербург, с. 100–105.
- [14] Alexeenko I., Gusev M., Gurevich V. Separate recording of rationally related vibration frequencies using digital stroboscopic holographic interferometry // Applied Optics, 2009, 48, № 18, P. 3475-3480.
- [15] Алексеенко И.В., Гусев М.Е. Измерение вибраций металлического диска методом цифровой стробоскопической голографической интерферометрии сфокусированных изображений // Автометрия. 2008. 44. № 1. С. 111–117.