

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 4

1994

УДК 621.378 : 681.33

Л. А. Борняк, О. Н. Захаров, А. В. Логинов, П. М. Меднис
(Новосибирск)

НАКЛАДНОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР
С АДАПТИВНОЙ БАЗОЙ

Рассматриваются вопросы, связанные с использованием голограмм, регистрируемых во встречных пучках на пленочном носителе, для формирования интерферометра с адаптивной базой на поверхности исследуемого объекта. Описываются модели предлагаемых схемных решений интерферометров и технические варианты реализации этих схем. В геометрическом приближении излагаются алгоритмы расшифровки интерферограмм и методика построения полей перемещений деформируемой поверхности. На примере исследования кривизны цилиндрической оболочки оценивается практическая значимость разработанного интерферометра.

Введение. Накладные интерферометры реализуются посредством закрепления голограммы на поверхности объекта и регистрации ее во встречных пучках по схеме Ю. Н. Денисюка [1]. Они фиксируют информацию о перемещениях объекта относительно плоскости голограммы — базы интерферометра, которая в эксперименте остается практически неизменной из-за введения низкоомодульной, оптически прозрачной среды между стеклянной подложкой голограммы и деформируемой поверхностью [2]. Разработанные алгоритмы расшифровки интерферограмм позволяют вычислить внутриплоскостные и нормальные компоненты вектора перемещения для каждой освещенной точки поверхности объекта. Однако в тех случаях, когда необходимо исследовать тонкостенные конструкции типа пластин и оболочек, возникает проблема устранения влияния голограммы на их прогиб. Кроме того, при решении динамических и вибрационных задач необходимо считаться с массой закрепляемой фотопластины. В этой связи представляется актуальной разработка накладного интерферометра, где стеклянная подложка заменяется гибкой (адаптивной) базой. Оптический преобразователь формируется автономно в лабораторных условиях, а затем для контроля изменения формы объекта закрепляется на его поверхности. Интерференция возникает за счет изменения углов освещения и наблюдения голограммы и может регистрироваться как в белом, так и в монохроматическом свете. Процесс прогиба поверхности сопровождается изменением вида интерферограммы. Отличие формы и числа полос в деформированном и исходном состояниях несет информацию об изменении кривизны исследуемой поверхности, т. е. об ее перемещениях. Известные алгоритмы механики сплошной среды позволяют по полю перемещений вычислить напряженно-деформированное состояние (НДС) объекта. Исследования, связанные непосредственно с определением НДС конструкций, в данной работе не рассматриваются.

1. Интерферометр с адаптивной базой. В голографической интерферометрии существует несколько подходов к созданию оптических преобразователей пространственно-временных параметров исследуемой физической величины в выходной сигнал-интерферограмму (в дальнейшем рассматривается только задача определения перемещений деформируемой поверхности). Практически все они основаны на том, что фазовое распределение в интерференционных полосах обусловлено пространственным перемещением точек

поверхности объекта относительно неизменной базы интерферометра. Рассмотрим, какие возможности появляются, если базу интерферометра сделать подвижной — адаптивной к форме поверхности объекта.

Основная идея интерферометра заключается в регистрации на голограмме и восстановлении двух когерентных пучков света с управляемым фазовым сдвигом, которые интерферируют между собой. Классическим примером таких интерферометров являются тонкие пленки, клиновидные и параллельные пластины, освещенные лазерным светом, в которых интерферируют лучи, отраженные от их передней и задней поверхности. Фазой интерферирующих волн можно управлять изменением толщины, клиновидности, показателя преломления, угла освещения и наблюдения. При этом происходит перемещение полос, изменение геометрии, а для тонких пленок окраски при наблюдении их в белом свете. На практике эти устройства используют только для квазиплоских объектов, так как от криволинейной поверхности зеркально отраженные лучи уходят в широкий телесный угол и не попадают в апертуру регистрирующей системы [3, 4].

Оптический преобразователь, рассматриваемый ниже, позволяет формировать в пространстве когерентные волновые поля с управляемым фазовым сдвигом, интерференция которых может быть зарегистрирована в широком диапазоне углов наблюдения. На рис. 1 представлена схема регистрации голограммы, где 1 — голографическая эмульсия либо пленка с голографической эмульсией, 2 — плоскопараллельная оптически прозрачная среда с квазидиффузными поверхностями, 3 — диффузный отражатель, 4 — когерентный пучок лазерного света. Характеристики диффузной поверхности плоскопараллельной пластины экспериментально подбираются такими, чтобы пучки, отраженные от ее передней и задней поверхности, частично сохраняли параметры пространственной когерентности и могли интерферировать между собой [5, 6]. Критерием правильного соотношения между зеркальной и диффузной составляющими отраженного излучения, а также углом индикатрисы рассеяния является контраст наблюдаемых интерференционных полос. На рис. 2 схематично представлены возможные варианты формирования интерферирующих волн, восстановленных голограммой. Для нахождения оптической разности хода используем геометрический подход и будем рассматривать только два луча, отраженные от передней и задней поверхности пластины. Понятно, что системой наблюдения данные лучи всегда можно выделить из конуса диффузно отраженных пучков. В случае деления амплитуды (рис. 2, а) исходный пучок, перпендикулярный пленке, отклоняется под некоторым углом (луч 1) от верхней грани пластины и под некоторым другим углом (луч 2) от нижней грани пластины. Лучи 1 и 2 параллельны и для них можно вычислить оптическую разность хода. То же самое можно осуществить и для лучей, представленных на рис. 2, б и 2, с.

Чтобы установить, какой из механизмов является определяющим для формирования интерференционных полос, восстановленных голограммой, поставим тестовый эксперимент. На боковую поверхность цилиндрической

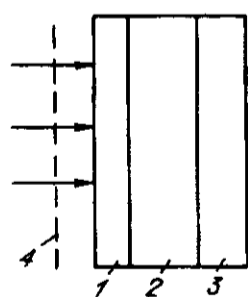


Рис. 1. Схема регистрации голограммы

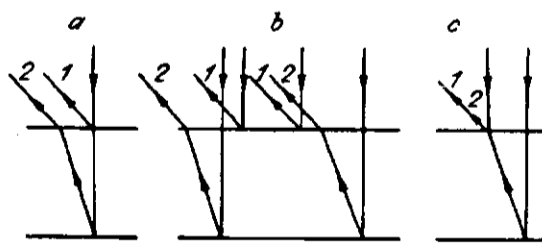
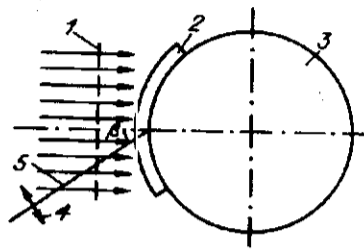


Рис. 2. Возможные механизмы интерференции:
а — деление пучка по амплитуде, б и с — деление по фронту

Рис. 3. Схема регистрации интерферограммы:
 1 — волновой фронт восстанавливающего излучения, 2 — голограмма,
 3 — цилиндрическая оболочка, 4 — объектив, 5 — направление
 фотографирования



оболочки с радиусом кривизны 142 мм плотно закрепляем полосу прозрачной основы пленки МГ-690 и полосу голографической эмульсии с зарегистрированной на ней по схеме рис. 1 голограммой этой пленки. Фотографирование интерферограмм осуществляем согласно схеме, представленной на рис. 3. Вначале рассмотрим алгоритм расшифровки интерферограммы, возникающей при наблюдении интерферирующих лучей, отраженных от передней и задней поверхности оригинала — прозрачной основы пленки МГ-690, нанесенной на боковую поверхность оболочки.

2. Определение разности хода интерферирующих лучей, отраженных от оригинала. Определим оптическую разность хода интерферирующих лучей, рассеянных оригиналом, имеющим форму цилиндрической поверхности (рис. 4). Будем считать исходными данными значения следующих величин: $O'F$ — фокусное расстояние объектива, OF — расстояние от точки O до фотопленки, FN — положение интерференционной полосы на фотопленке, причем фотопленка расположена в фокальной плоскости объектива, $CC' = R$ — радиус цилиндрической поверхности, $OC' = d_0$ — толщина оригинала, n — показатель преломления оригинала, λ — длина волны исходного излучения, β — угол между осью Z и главной оптической осью объектива. Схема хода лучей такова, что позволяет одновременно рассчитать две модели. При делении исходной волны по амплитуде разность хода интерферирующих лучей AN и $\bar{O}N$ для точки P дается выражением

$$\Delta = (AP + P\bar{O})n - M'A + \varphi. \quad (1)$$

Здесь φ — скачок фазы волны, рассеянной в точке P , не существенный для дальнейшего рассмотрения. В случае деления исходной волны по фронту

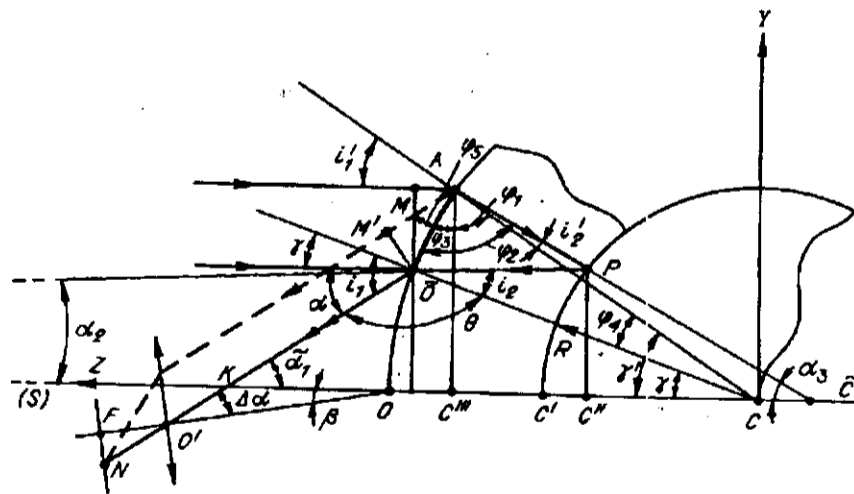


Рис. 4. Схема регистрации интерферограмм для расчета оптической разности хода интерферирующих лучей, формируемых оригиналом и голограммой

оптическая разность хода Δ' интерферирующих лучей $MAP\bar{O}N$ и $\bar{O}N$ дается выражением

$$\Delta' = (AP + P\bar{O})n + MA + \varphi. \quad (2)$$

Для определения разности хода следует выразить отрезки AP , $P\bar{O}$, MA , MA , входящие в уравнения (1), (2), через измеряемые параметры — координаты интерференционных полос FN и фокусное расстояние OF (см. рис. 4). Однако углы наблюдения, а с ними и другие угловые величины не являются малыми, что приводит к сложному выражению для вычисления длины отрезков. Поэтому ниже опишем алгоритм определения разности хода, удобный для машинной обработки.

Прежде всего по FN на фотографии полос и фокусному расстоянию OF находим угол $\Delta\alpha$:

$$\Delta\alpha = \text{arctg}(FN/OF). \quad (3)$$

Из треугольника $KO'O$ следует, что угол $\tilde{\alpha}_1$ равен

$$\tilde{\alpha}_1 = \Delta\alpha + \beta. \quad (4)$$

Из треугольника $O'KO$ и $K\bar{O}C$ определяем соотношения

$$OK \cdot \sin\tilde{\alpha}_1 = OO' \cdot \sin(\Delta\alpha), \quad (5)$$

$$(OK + R + d_0)\sin\tilde{\alpha}_1 = (R + d_0)\sin\Theta, \quad (6)$$

позволяющие последовательно сначала найти отрезок $OO' = OF - OF$, затем отрезок OK и далее угол Θ . Из рис. 4 видно, что

$$\gamma = \pi - (\Theta + \tilde{\alpha}_1), \quad i_1 = \tilde{\alpha}_1 + \gamma. \quad (7)$$

Из закона Снелиуса и треугольника $S\bar{O}C$ находим угол α_2 :

$$\alpha_2 = i_2 - \gamma, \quad \sin i_2 = \frac{1}{n} \sin i_1. \quad (8)$$

Отметим, что $i_2 > \gamma$.

Определим координаты точки $\bar{O}(Z_{\bar{O}}Y_{\bar{O}})$. Очевидно, что

$$Z_{\bar{O}} = \sqrt{(R + d_0)^2 - Y_{\bar{O}}^2}, \quad Y_{\bar{O}} = (R + d_0)\sin\gamma. \quad (9)$$

Чтобы найти координату точки P , воспользуемся уравнением прямой $\bar{O}P$

$$Y_P = Y_{\bar{O}} - \text{tg}\alpha_2(Z_P - Z_{\bar{O}}) \quad (10)$$

и уравнением окружности, проходящей через точку P ,

$$Z_P^2 + Y_P^2 = R^2. \quad (11)$$

Система уравнений (10) и (11) позволяет вычислить координаты точки $P(Z_P Y_P)$. В результате по найденным точкам \bar{O} и P определяем отрезок

$$P\bar{O} = \sqrt{(Z_{\bar{O}} - Z_P)^2 + (Y_{\bar{O}} - Y_P)^2}. \quad (12)$$

Чтобы найти координаты точки $A(Z_A Y_A)$, заметим, что

$$C\bar{C} = C\bar{C} - Z_P = \frac{Y_P}{\text{tg}\alpha_3} - Z_P. \quad (13)$$

Из треугольника $A\bar{C}C''$ и закона Снелиуса для углов i_1' и i_2' получаем

$$\frac{\sin i_1'}{\sin i_2'} = \frac{\bar{C}A}{\bar{C}C}, \quad \bar{C}A = \bar{C}C n. \quad (14)$$

Теорема косинусов для треугольника $A\bar{C}C$ позволяет составить уравнение для угла α_3 :

$$(R + d_0)^2 = C\bar{C}^2 + \bar{C}A^2 - 2C\bar{C}\bar{C}A \cdot \cos \alpha_3. \quad (15)$$

Через указанные отрезки $\bar{C}A$, $\bar{C}C$ и угол α_3 находим координаты точки $A(Z_A Y_A)$:

$$Y_A = \bar{C}A \cdot \sin \alpha_3, \quad Z_A = \bar{C}A \cdot \cos \alpha_3 - \bar{C}C. \quad (16)$$

По значениям координат точек A и P выражаем длину отрезка AP :

$$AP = \sqrt{(Z_A - Z_P)^2 + (Y_A - Y_P)^2}. \quad (17)$$

Завершим описание алгоритма нахождения отрезков $M'A$ и MA . По известным координатам точки A сначала находим угол γ' :

$$\gamma' = \arctg(Y_A/Z_A). \quad (18)$$

По известным γ , γ' находим углы φ_1 и φ_4 , соответственно равные

$$\varphi_1 = \pi/2 - \gamma', \quad \varphi_4 = \gamma' - \gamma. \quad (19)$$

Наконец, определим углы φ_2 , φ_3 и φ_5 соотношениями

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \varphi_3 = \frac{1}{2}(\pi - \varphi_4), \quad \varphi_5 = \pi/2 - \varphi_3 - \tilde{\alpha}_1. \quad (20)$$

Тогда из треугольников $\bar{O}AC$ и $\bar{O}M'A$ получаем формулы для нахождения отрезка $M'A$:

$$M'A = \bar{O}A \cdot \cos \varphi_5, \quad \bar{O}A = 2(R + d_0) \sin(\varphi_4/2). \quad (21)$$

Отрезок MA находится тривиально:

$$MA = Z_{\bar{O}} - Z_A. \quad (22)$$

Таким образом, нами описан алгоритм нахождения отрезков $P\bar{O}$ и AP — формулы (12) и (17) — и отрезков $M'A$ и MA — формулы (21) и (22), определяющих разности хода лучей Δ и Δ' — выражения (1), (2) для двух механизмов интерференции. Места максимумов на фотопленке определяются обычным условием $\Delta = \lambda m$, где m — целое число. Чтобы получить связь радиуса цилиндра с остальными параметрами, необходимо решить полученные соотношения относительно неизвестного R . В качестве критерия верности рассматриваемых механизмов формирования интерферирующих пучков были произведены расчеты отношений оптической разности хода между любыми соседними полосами на интерферограмме к длине волны используемого света λ . Экспериментальные значения, включаемые в расчет выражений

$$\frac{\Delta_{m+1} - \Delta_m}{\lambda}, \quad \frac{\Delta'_{m+1} - \Delta'_m}{\lambda}, \quad (23)$$

следующие: толщина пленки МГ-690 $d = 0,14$ мм, угол наблюдения интерферограммы $\beta = 0,193$ рад, радиус цилиндра $\kappa = 142$ мм, показатель преломления пленки $n = 1,465$, масштаб увеличения $M = 15,8$, фокусное расстояние $O'F = 97,8$ мм, $\lambda = 0,63$ мкм; Δ — разность хода для схемы рис. 2, a , Δ' — для рис. 2, c .

Вычисленные средние значения выражений (23) для десяти полос соответственно равны $0,1 \pm \delta$ и $1 \pm \delta$. Полосы представлены на рис. 5, a . Проведенный анализ показывает, что в качестве модели интерференционного механизма подходит только вторая схема — схема деления падающего излучения по волновому фронту (см. рис. 2, c). Альтернативная схема (см. рис. 2, b) не может быть использована, так как фазы световых волн, диффузно отраженных от соседних участков, взаимно не коррелированы [5].

3. Вычисление разности хода интерферирующих лучей, восстановленных с голограммы. Рассмотрим, как формируется интерферограмма, когда вместо оригинала используется голограмма, на которой зарегистрированы волны, отраженные от передней и задней поверхности плоскопараллельной пластины. Точно так же, как и в классической интерферометрии, рассмотренной выше, определим оптическую разность хода для световых волн, зарегистрированных и восстановленных с голограммы для схемы рис. 2, c .

Порядок полосы, следовательно, и оптическая разность хода интерферирующих лучей в точке наблюдения N (см. рис. 3) являются как функцией положения точки P , зависящей от геометрии освещения, наблюдения и физических параметров плоскопараллельной пластины, так и функцией параметров самой голограммы. Голограмму модельно можно представить набором «зеркальных» поверхностных решеток, из которых выходят дифрагированные волны. На стадии восстановления каждое из зеркал трансформирует падающую волну в волну, рассеянную объектом. Таким образом, если восстанавливающее излучение падает на голограмму под другим углом, чем при ее регистрации, дифрагированные лучи меняют свое направление. В лучевом представлении нормаль n к поверхности изофазного зеркального слоя голограммы, в нашем случае практически нормаль к поверхности голографической пленки, может быть представлена выражением вида

$$n = \frac{K_1 - K_0}{|K_1 - K_0|}, \quad (24)$$

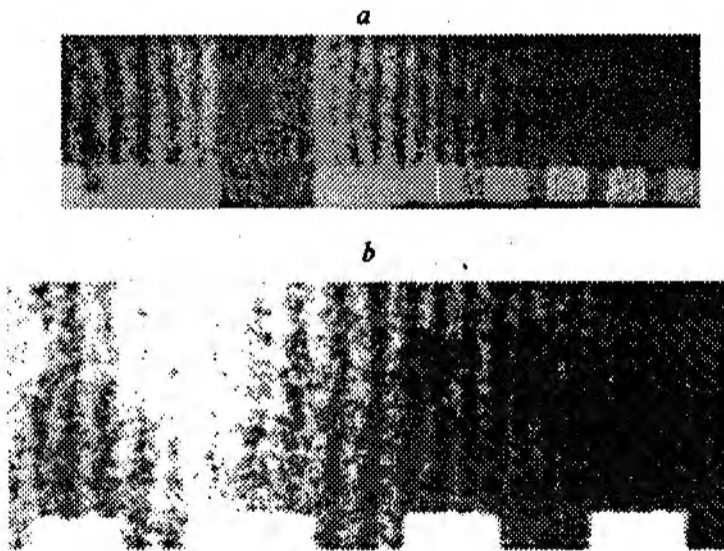


Рис. 5. Интерферограммы:
 a — оригинал, b — восстановленное изображение

где K_1 — лучевой вектор восстанавливающей волны, K_0 — лучевой вектор восстановленной объектной волны [7].

Из выражения (24) для зеркальных лучей следует, что

$$\sin \varphi_m - \sin i_m = \sin \varphi_n - \sin i_n, \quad (25)$$

где φ_m, i_m — углы падения объектных и опорных лучей, отсчитываемые от поверхности в сторону нормали на стадии регистрации голограммы, и φ_n, i_n — углы дифрагированных и восстанавливающих лучей при воспроизведении изображения [8]. Схематично данный эффект можно учесть фиктивным смещением точки P (см. рис. 4) по окружности оболочки посредством поворота отрезка AP на некоторый дополнительный угол, определяемый соотношениями (24) и (25). По этой причине в точке N порядок интерференционной полосы изменится из-за возникшей дополнительной разности хода $\tilde{\Delta}$ при смещении точки P . На основании сделанного замечания и алгоритма расчета оптической разности хода, изложенного в п. 2, определяем оптическую разность хода интерферирующих лучей, восстановленных голограммой в соответствии с исходным механизмом интерференции, изображенным на рис. 2, с. Для двух соседних интерференционных полос, наблюдаемых с восстановленного изображения голограммы, вычислялось выражение, аналогичное выражению (23):

$$\frac{\tilde{\Delta}_{i+1} - \tilde{\Delta}_i}{\lambda}, \quad (26)$$

где $\tilde{\Delta}$ — оптическая разность хода лучей, приходящих в точку N с учетом поправки $\tilde{\Delta}$. Среднее значение отношения (26), вычисленное для десяти полос, равнялось $1 \pm \delta$. Погрешность определения соотношений (23) и (26) не превышает 0,05 и зависит от точности измерения характерных точек интерференционных полос — координат центров темных и светлых полос.

Таким образом, тестовый эксперимент показал, что голографический интерферометр с адаптивной базой можно использовать как оптический преобразователь перемещений в универсальный сигнал-интерферограмму. Алгоритмы расшифровки дают инженерную точность расчета интерферограмм.

4. Определение кривизны цилиндрической оболочки. Для оценки возможности использования рассмотренного интерферометра в практических исследованиях определялся радиус кривизны различных оболочек. С этой целью решалась обратная задача. По заданной разности хода, определяемой на интерферограмме, и с помощью алгоритма расшифровки, рассмотренного в п. 2 и 3, вычислялось неизвестное значение радиуса цилиндрической оболочки. Численно определялось положение точек $O, \tilde{O}_1, \tilde{O}_2 \dots$ поверхности оболочки, являющихся отображением центров интерференционных полос на ее поверхность. Через найденные точки путем интерполяции полиномами Чебышева восстанавливалось окружное сечение оболочки. Численно определенные значения радиусов оболочек расходятся с их истинными значениями не более чем на 10 % для оболочек малой кривизны и не более чем на 5 % для оболочек большой кривизны.

Заключение. Расчеты и эксперименты показали, что рассмотренный адаптивный голографический интерферометр с управляемым фазовым сдвигом может успешно использоваться для восстановления кривизны цилиндрических оболочек и пластин, а также для качественного контроля изменения формы их поверхности при силовом воздействии. Количественное исследование деформированного состояния данных объектов связано с восстановлением поверхности до и после воздействия, что требует дальнейшего развития данного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жилкин В. А., Борыняк Л. А. Метод голографической интерферометрии с использованием голограмм Ю. Н. Денисюка для исследования деформированного состояния объекта // Мат-лы II Всесоюз. шк. по голографии.—Л., 1979.
2. Борыняк Л. А., Герасимов С. И., Жилкин В. А. Практические способы записи и расшифровки голографических интерферограмм, обеспечивающие необходимую точность определения компонент тензора деформаций // Автометрия.—1982.—№ 1.
3. Александров А. Я., Ахметзянов М. К. Поляризационные оптические методы механики деформируемого тела.—М.: Наука, 1973.
4. Сухарев И. П. Экспериментальные методы исследования деформаций и прочности.—М.: Машиностроение, 1987.
5. Вакут П. А., Мандросов В. И., Матвеев И. Н., Устинов В. Д. Теория когерентных изображений.—М.: Радио и связь, 1987.
6. Франсон М. Оптика спеклов.—М.: Мир, 1981.
7. Колфилд Г. Оптическая голография.—М.: Мир, 1982.
8. Комар В. Г., Серов О. Б. Изобразительная голография и голографический кинематограф.—М.: Искусство, 1987.

Поступила в редакцию 16 марта 1994 г.