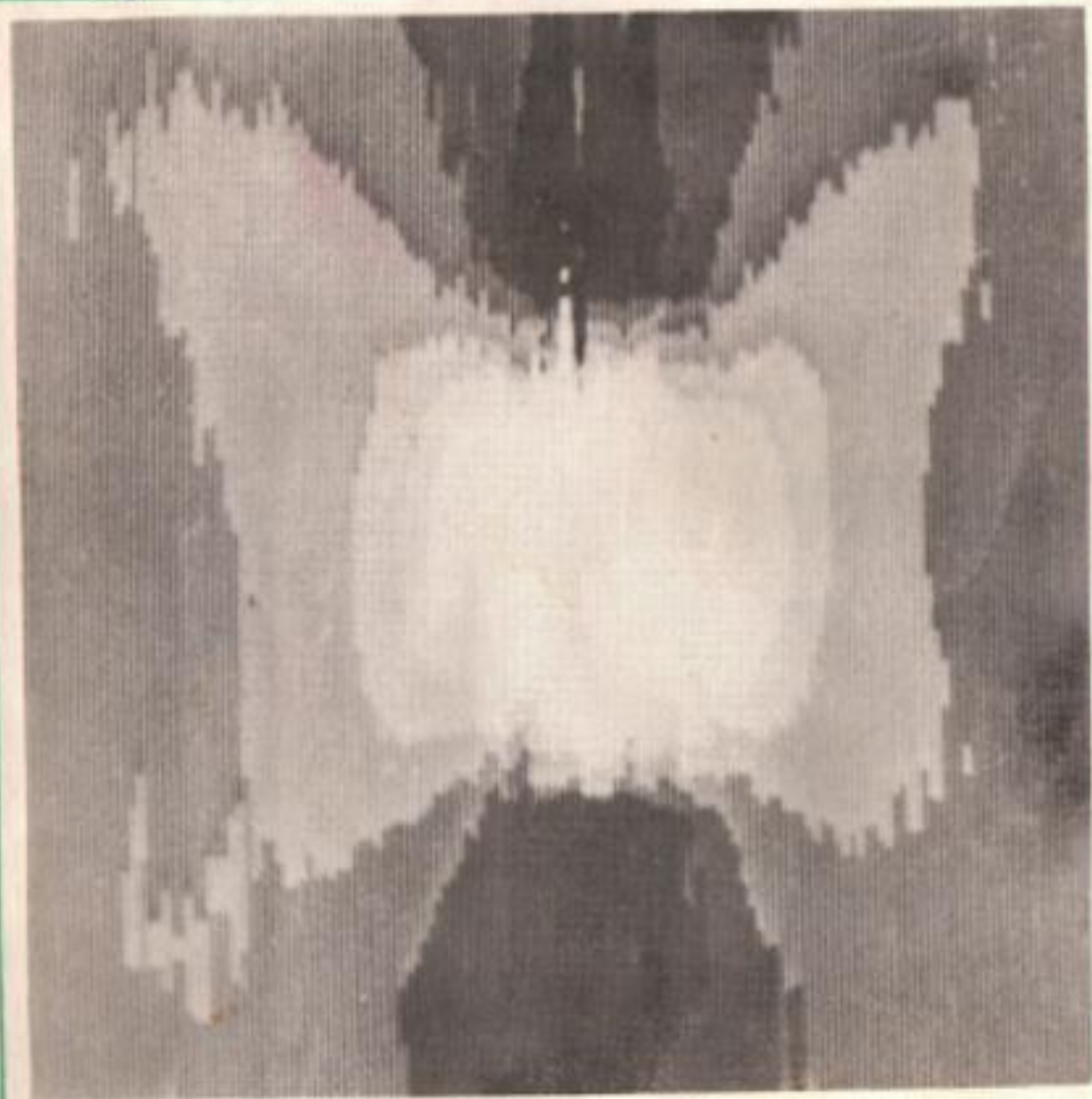


621.38

К 59



А. Г. КОЗАЧОК · Ю. Н. СОЛОДКИН

**ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ**

Учебное пособие

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
НОВОСИБИРСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

А.Г. КОЗАЧОК, Ю.Н. СОЛОДКИН

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Учебное пособие

Новосибирск • 1985

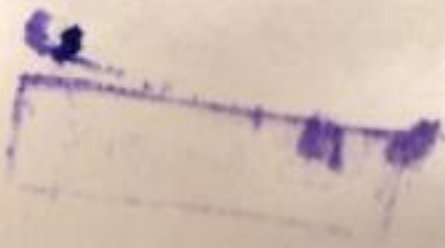
УДК 621.378.9:778.4

Козачок А.Г., Солодкин Ю.Н. Голографические методы измерений: Учеб. пособие / Новосиб. электротехн. ин-т. - Новосибирск, 1985. -

Изложены основные свойства голографических интерферометров и принципы построения голографических измерительных систем. Пособие предназначено для студентов IV-V курсов факультета автоматики и вычислительной техники (специальность 0642) дневной формы обучения.

Ил. 29, список лит. - 23 назв.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. А. Жилкин,
канд. техн. наук, доц. Б. В. Карпюк



86.11

86

БИБЛИОТЕКА
Новосибирского
электротехнического
института

Г л а в а I

ДВУХВЕКОВАЯ ИСТОРИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ С ЭТЮДАМИ ОБ УЧЕНЫХ

История интерферометрии начинается в первые годы прошлого столетия. Открытие интерференции световых волн принадлежит выдающемуся английскому физiku Томасу Юнгу. Размышляя о сложении волн на поверхности озера, Юнг писал: "Я полагаю, что подобные эффекты имеют место всякий раз, когда смешиваются две части света. Это явление я называю общим законом интерференции".

Идея Юнга проста и удивительна. Удивительна потому, что свет, постоянно "смешиваясь своими частями" на всем, что мы видим, никогда не дает интерференционной картины. "...кто бы мог подумать, что свет, слагаясь со светом, может вызвать мрак!" — это восклицал не лирик, а один из ведущих физиков того времени Араго. Но мало высказать идею. Ее истинность необходимо подтвердить опытом, причем эксперимент надо придумать, так как природа, наполненная светом, не демонстрирует человеку картин интерференции. Почему?

Если складываются два гармонических колебания одинаковой частоты, то суммарная интенсивность, как известно, определится выражением

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \varphi, \quad (1)$$

где A_1 и A_2 — амплитуды колебаний, а φ — их разность фаз. Поскольку частота световых волн 10^{14} – 10^{15} Гц, любая регистрирующая аппаратура позволяет получить только усредненные значения интенсивности, и вместо равенства (1) надо рассматривать соотношение

$$\langle A^2 \rangle = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \langle \cos \varphi \rangle. \quad (2)$$

Последнее слагаемое, называемое интерференционным членом, и определяет, существует или нет интерференционная картина. Если световые волны имеют различную частоту или их начальные фазы случайным образом меняются, то $\langle \cos \phi \rangle = 0$ и результирующая интенсивность есть просто сумма интенсивностей слагаемых волн. Именно так складывается свет от природных источников.

Для того, чтобы получить интерференцию, Юнг использует "две части одного и того же света" — так звучит у Юнга требование когерентности. В интерферометре Юнга (рис. 1) солнечный свет, проходящий через небольшое отверстие в окне S , падает на два близко проколота

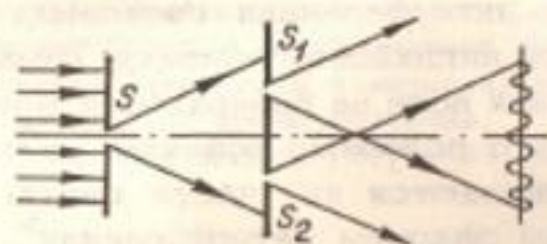


Рис. 1. Интерферометр Юнга

ые отверстия в непрозрачном экране S_1 и S_2 . За экраном в результате дифракции образуются два световых конуса, которые, перекрываясь, дают интерференционные полосы. Если закрыть одно из отверстий,

то полосы исчезают, но остаются дифракционные кольца, и это несколько снижает эффект демонстрации.

Эксперимент Юнга неопровержимо доказывал волновую природу света и имел революционное значение для последующего развития физики.

Открытие новых явлений всегда приводит к созданию новых измерительных средств. И Юнг блестяще продемонстрировал это. Он ввел понятие длины световой волны и измерил длины волны видимого света, получив результат 0,42 — 0,70 мкм. Им же был изобретен прибор для измерения среднего диаметра мельчайших частиц по дифракционному спектру. Юнгу удалось с поразительной точностью определить размер молекулы, что по достоинству было оценено только век спустя.

Эпизод о Юнге. Разносторонность Юнга потрясает настолько, что с трудом верится в существование такого человека. С двух лет он пристрастился к чтению и поначалу проявил выдающиеся лингвистические способности — легко и быстро освоил около десятка языков. С увлечением читал маленький Юнг все, что попадало под руку —

историю древней Греции и лекции по физике, книгу о жизни растений и математический словарь. Познание мира во всей его полноте доставляло ему огромное удовольствие. "У меня было правило, — напишет потом Юнг, — вставать летом на час раньше моих товарищей, а зимой ложиться часом позже их, чтобы углубить пройденное за день." Он учился работать не только головой, но и руками. Освоил токарный станок, шлифовал стекла, сам изготовил микроскоп, телескоп и другие оптические приборы. Но когда в 18 лет пришлось решать, кем же все-таки стать, он выбрал медицину. Может быть потому, объяснил он, что "нет науки, сложностью превосходящей медицину".

В 20 лет Юнг выступает в Королевском обществе с "Наблюдениями над процессом зрения", в которых объясняет способность глаза видеть на различных расстояниях изменением кривизны хрусталика. Через год его избирают членом Королевского общества, а еще через год — 22-летний академик отправляется в овеянный славой Геттингенский университет. Здесь он не только совершенствует свои знания в медицине и других науках, но продолжает увлекаться музыкой, живописью, даже занимается верховой ездой, во всем достигая высокой степени совершенства.

"Я потому так много успел, — подытожил Юнг в конце жизни, — что стремился каждый день сделать хоть что-нибудь". Получив после окончания университета звание доктора медицины, хирургии и акушерства, Юнг занимается врачебной практикой, читает лекции, но и то, и другое, как ни странно, получается у него довольно плохо. Зная очень много, он в одном случае долго сомневается, какой поставить диагноз, а в другом — никак не может приспособиться к среднему уровню слушателей. Благо, получив приличное наследство, Юнг мог особенно не заботиться о хлебе насущном и со свойственной ему увлеченностью занялся оптическими исследованиями.

Открыв интерференцию световых волн, Юнг вместо того, чтобы получить заслуженное признание, подвергся уничтожающей критике. Разве мыслимо было в то время усомниться в непогрешимом авторитете Ньютона. Барон Бругем, молодой физик и математик, почитающий автори-

теты и, может быть, поэтому ставший впоследствии видным политиком и лордом-канцлером Англии, неистово обрушился на "пустые фантазии, поверхностные и бессодержательные опусы" Юнга, призывая Королевское общество не печатать подобного "брёда". Такое мнение было активно поддержано другими коллегами Юнга, и он оказался в полном одиночестве. "Юнг имел несчастье, — отметил Гельмгольц, — быть много выше современников". Это чаще вызывает раздражение, чем преклонение. Необходимо время, обычно превышающее срок жизни первооткрывателя, чтобы идея овладела умами.

Юнг понимал это. Он был еще и житейски мудрым человеком, терпимо относился к людским слабостям, никогда категорически не высказывался по вопросам морали. И все-таки грубые нападки выбивали Юнга из колеи. До конца своих дней он постоянно менял род занятий, выполнив огромное количество интереснейших работ, а взамен получая почти всегда обвинения в невежестве и прямые издевательства. Немногие признания не могли заглушить общего недоброжелательного хора. За два года до смерти Юнг писал Френелю: "...я могу только предчувствовать что-то вроде посмертной славы, которой я никогда особенно на жаждал".

Интерферометр Юнга в оптике, модуль Юнга в механике — при общепризнанной гениальности Юнга это может показаться маловатым. Не тратьте ученый время на изучение нравов пауков или ежегодной ренты, расшифровку египетских иероглифов или составление "Мореходного календаря" (перечень того, чем занимался Юнг, непостижимо длинный и удивительный), мог бы он достичь более выдающихся результатов? Бесмысленный вопрос. Не сожаление, а восхищение вызывает феноменальная разносторонность Юнга. На вопрос, счастлив ли он, Юнг отвечал строчкой Вергилия: "Счастлив тот, кто сумел вещей постигнуть причины".

Через пятнадцать лет после открытия Юнга Огюстен Жак Френель, который на те же пятнадцать лет был моложе своего предшественника и до поры до времени ничего не знал о нем, вновь открыл принцип интерференции.

"Очень простой эксперимент доказал мне, что световые лучи могут действовать друг на друга, ослабляясь или взаимно усиливаясь", — писал Френель. Он придумал интерферометр с оптическим элементом, получившим впоследствии название бизеркала Френеля (рис. 2). Свет от точечного источника S , отражаясь от двух зеркал,

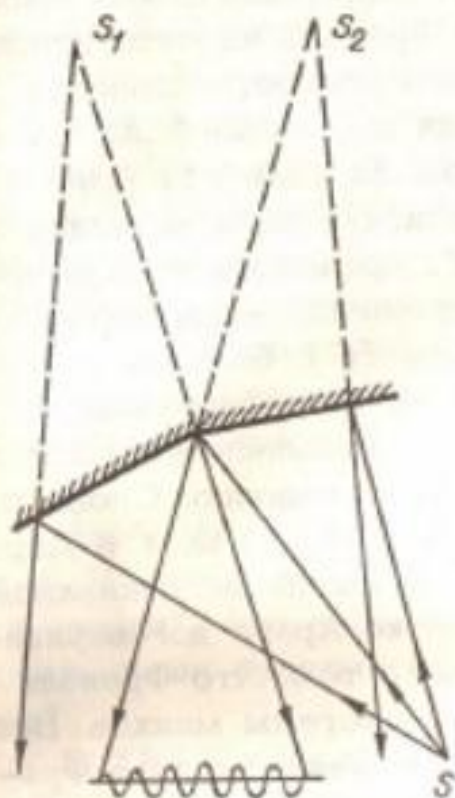


Рис. 2. Интерферометр Френеля

положенных под небольшим углом друг к другу, образует на экране интерференционные полосы. Это эквивалентно интерференции волн от двух идентичных источников S_1 и S_2 являющихся мнимыми изображениями источника S . Перекрытие любого из зеркал приводит к исчезновению полос, но в отличие от интерферометра Юнга остаются не дифракционные кольца, а равномерно освещенный круг. Эксперимент более эффектен, но суть не меняется.

Френель первым понял, что дифракция — это та же интерференция, только от многих источников. Он разработал строгую теорию дифракции,

предложил принцип (Гюйгенса-Френеля) для расчета дифракционных картин. Зонная пластинка Френеля, полученная расчетным путем, явилась прообразом голографической линзы. Френель исследовал влияние поляризации света на интерференцию, и эти эксперименты легли в основу гипотезы о поперечности световых волн.

Эпизод о Френеле. Френель почти во всем — полный антипод Юнга. Не проявляя никаких особых способностей, в 21 год он закончил Школу мостов и дорог и в качестве инженера был направлен в глухую провинцию ремонтировать и прокладывать дороги. Свою работу он не любил. Будучи крайне замкнутым человеком, долгие провинциаль-

ные вечера он заполнял чтением научных книг и в 1814 году серьезно увлекся оптикой. Это увлечение было активно поддержано Араго, сыгравшим огромную роль в судьбе Френеля.

Почти на весь 1816 год Араго выхлопотал Френелю отпуск для проведения опытов по интерференции и дифракции световых волн в лаборатории Политехнической школы в Париже. После провинции, где Френель на собственные скудные средства, проявляя чудеса изобретательности, ставил оптические опыты, условия в Париже были сказочными. И это принесло свои плоды. За один год были поставлены эксперименты по дифракции и написан знаменитый "Мемуар о дифракции света", проведены измерения показателя преломления и его изменений интерференционным методом, построен интерферометр с бизеркалами и исследовано влияние поляризации на интерференцию.

Но отпуск закончился, и вновь пришлось заниматься ремонтом мостов и дорог. К счастью недолго. Снова хлопоты Араго, и Френель окончательно переезжает в Париж. От преподавания в Политехнической школе он отказался и решил остаться инженером. Тот же Араго договаривается в Управлении мостов и дорог о том, что Френель будет заниматься созданием новой системы маяков. Все-таки поближе к оптике. Кстати, и в маячном деле Френель получил блестящие технические результаты. Но главным увлечением Френеля оставалась физическая оптика.

Узнав о работах Юнга, Френель, конечно же, огорчен. "Если что-либо могло меня утешить в потере права на приоритет, то это было сознание, что я встретился с ученым, обогатившим физику таким большим числом важных открытий". Однако, когда до Френеля дошли слова Юнга, который сравнивал себя с яблоней, а его с яблоком, он не может сдержать честолюбивых эмоций и сгоряча пишет Юнгу злое письмо. Спустя несколько месяцев Френель приносит Юнгу свои извинения, просит сжечь злополучное письмо и до конца своих дней сохраняет с Юнгом дружеские отношения.

О том, как трудно порой определить, где кончаются заслуги Юнга и начинаются заслуги Френеля, свидетельствует хотя бы гипотеза о поперечности световых волн.

Первым ее высказал, узнав об опытах Френеля, Юнг, но с многочисленными оговорками, что это не реальность, а удобная аналогия. Ведь если гипотеза реальна, то эфир должен быть твердым телом, а это звучало не менее абсурдно, чем предположение об отсутствии эфира. Араго, не склонный к безумству, отказался подписать подготовленную Френелем статью, в которой на основе их совместных экспериментов делался вывод о поперечности световых волн. И только Френель четко сознавал, что надо либо примириться с поперечностью световых волн, либо отказаться от волновой теории.

В 1823 году Френеля избирают в Академию, а через год его здоровье резко ухудшается, и он практически оставляет научные исследования. В 39 лет прекращается жизнь "гения, который составил честь Франции и своего века" — так оценило заслуги Френеля следующее за ним поколение физиков.

Изобретение интерферометра позволило, говоря словами Майкельсона, "крайне усовершенствовать искусство измерения", что весьма важно, поскольку "мы должны искать наши будущие открытия в далеких десятичных знаках".

В 1851 году Физо поставил интерференционный измерительный эксперимент, который Майкельсон назвал одним из самых остроумных опытов, когда-либо произведенных в физике, а Эйнштейн неоднократно подчеркивал его важность для подтверждения теории относительности. Решалась задача о влиянии движения среды на скорость распространения света. В интерферометре Физо (рис. 3) свет от источника проходил через две полуметровые трубки T , по которым со скоростью нескольких метров в секунду пропусклась вода. Зеркало M отражало лучи так, что они менялись местами, через те же трубки возвращались назад и интерферировали в области O . Так как оба луча проходили один и тот же путь, то нестабильность его оптических характеристик не влияла на смещение интерференционных полос. Это смещение определялось только скоростью воды, поскольку один луч двигался по течению, а другой — против. Результаты экс-

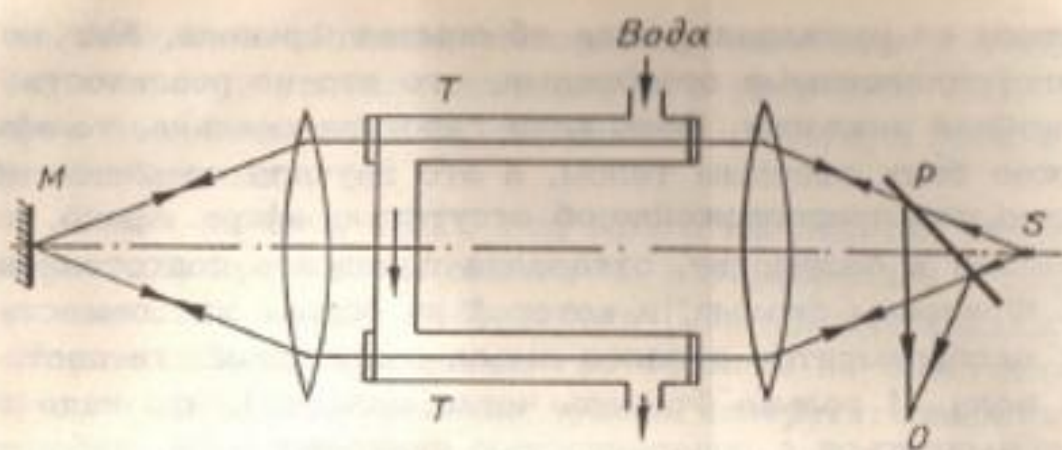


Рис. 3. Интерферометр Физо

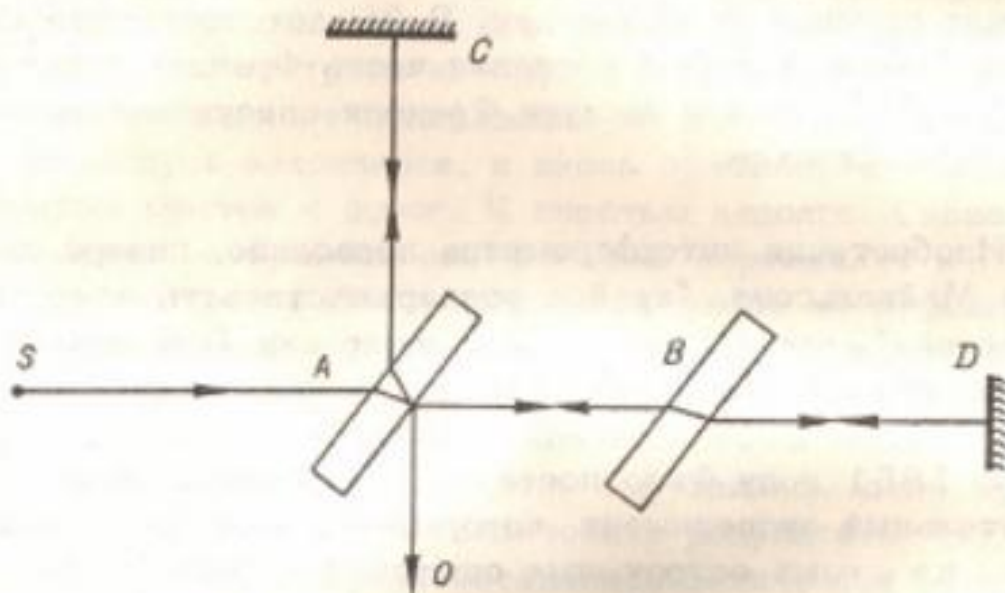


Рис. 4. Интерферометр Майкельсона

перимента Физо полностью соответствовали, как стало понятным полвека спустя, релятивистской формуле сложения скоростей.

Дальнейшие выдающиеся результаты в интерферометрии были получены в конце XIX – начале XX веков Альбертом Майкельсоном. В поисках "эфирного ветра" он изобрел интерферометр, показанный на рис. 4. Луч от источника *S* светоделительной пластинкой *A* делится пополам в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Отразившись от зеркал *C* и *D*, оба луча интерферируют в направлении *O*. Пластинка *B* вводится для того, что-

бы пути обоих лучей были полностью одинаковы. Если теперь расположить интерферометр так, что направление одного луча совпадает с вектором скорости вращения Земли вокруг Солнца (30 км/с), то различное время прохождения лучей должно привести к разности хода и смещению интерференционных полос. В свое время Максвелл усомнился в возможности когда-либо определить скорость движения эфира, потому что необходимая точность порядка $v^2/c^2=10^{-8}$ казалась недостижимой. И до сих пор вызывает удивление, как Майкельсону удалось преодолеть влияние механических нестабильностей, теплового расширения материалов и перепада давлений в разных частях интерферометра, чтобы получить необходимую точность измерений. Майкельсон на протяжении всей своей жизни неоднократно повторял эксперимент, повышая чувствительность и точность интерферометра. Результаты по непонятной Майкельсону причине были отрицательными, и он вынужден был сделать вывод, что гипотеза покоящегося эфира ошибочна.

Другой блестящий интерференционный эксперимент Майкельсона - измерение в 1920 г. диаметра сверхгигантской звезды Бетельгейзе. Как возникла идея звездного интерферометра? По утверждению А.С. Пушкина, "следовать за мыслями великого человека есть наука самая занимательная".

Если закрыть среднюю часть входного отверстия телескопа, как показано на рис. 5,а, то открытые части S_1 и S_2 будут играть роль двух отверстий в интерферометре Юнга (рис. 1). Так как звезда - точечный источник, должна получиться четкая интерференционная картина. А если источник протяженный? Тогда, как отмечал еще Юнг, при некотором угловом расстоянии α между S_1 и S_2 полосы исчезнут. Поэтому, изменяя α , можно определить диаметр источника d из простого соотношения

$$d = \frac{\lambda}{\alpha}, \quad (3)$$

где λ - длина световой волны.

Равенство (3) можно записать иначе:

$$\beta = \frac{\lambda}{d}, \quad (4)$$

где β - угловой диаметр, а l - расстояние между источниками S_1 и S_2 .

И Майкельсон предлагает интерферометр (рис. 5,б). На входе телескопа устанавливаются раздвижные зеркала, расстояние между которыми увеличивается до момента исчезновения интерференционных полос. Учитывая, что расстояние до Бетельгейзе примерно 200 световых лет, Майкельсон получил диаметр звезды $d \sim 300$ млн. км. И сам эксперимент, и результат измерения были впечатляющими.

Выдающейся заслугой Майкельсона является также новое определение эталона метра. Этот эталон под влиянием времени и окружающей среды мог измениться. Майкельсон предложил контролировать метр с помощью естественного эталона - длины световой волны. Он измерил с помощью эталона, хранящегося в Севре, длину волны красной линии кадмия, которая и была впоследствии принята за единицу длины. Эксперимент оказался исключительно трудоемким. Из-за ограниченной когерентности

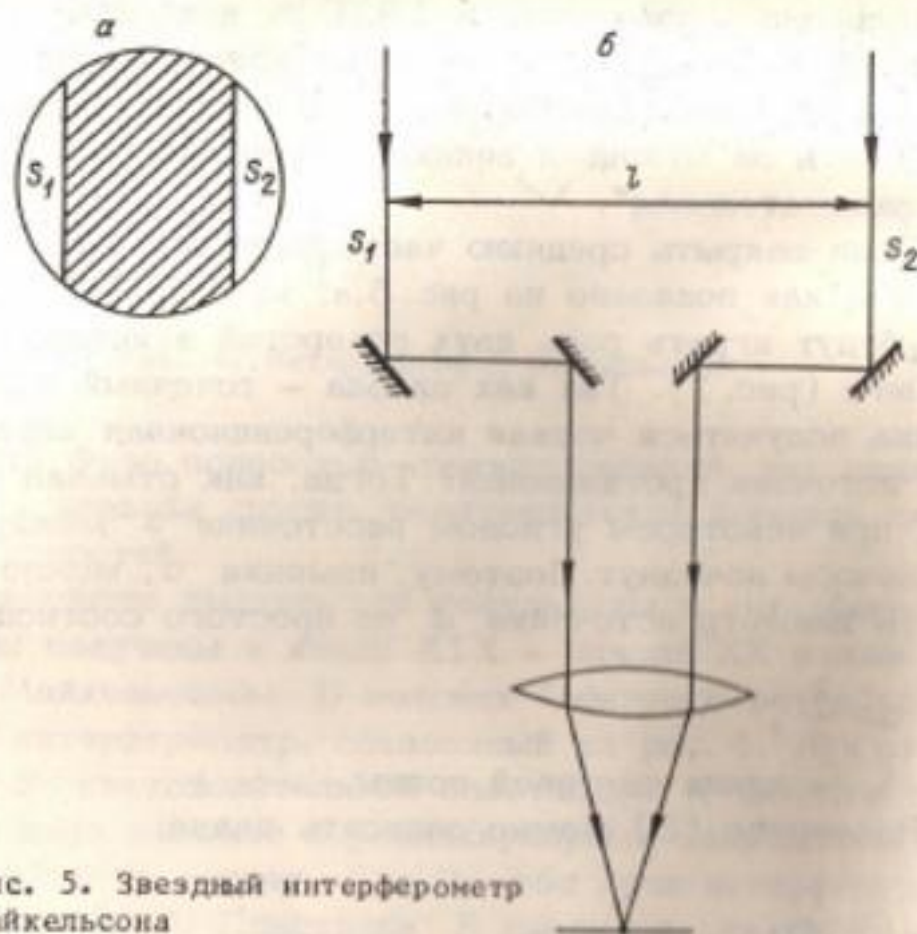


Рис. 5. Звездный интерферометр Майкельсона

источника приходилось проводить измерение небольшими отрезками, состыковывать результаты, статистически их обрабатывать. Измерение длилось год, и было получено значение $\lambda = 0,64384691$ мкм. Через пятьдесят лет, после тщательных и дорогостоящих измерений, проведенных в лабораториях Парижа, Лондона, Москвы, Токио и Берлина, принятое среднее значение λ составило $\lambda = 0,64384696$ мкм. Сравнив результаты, можно еще раз удивиться великому экспериментаторскому искусству Майкельсона.

Этюд о Майкельсоне. Альберт Майкельсон родился в 1852 году. Учась в средней школе в Сан-Франциско, он проявил большие способности к точным наукам и с удовольствием занимался починкой школьного лабораторного оборудования. После школы он решил поступить в Морскую Академию, но единственное место, выделенное для штата, досталось другому. Тогда 16-летний Майкельсон демонстрирует энергию, настойчивость и находчивость и добивается специально для него учрежденного дополнительного места. Учиться было непросто - из 86 поступивших Академию закончили 29, в том числе Майкельсон - с хорошими отметками по физике и математике, и с весьма средними - по военным и гуманитарным наукам. Майкельсон никогда не мог себя заставить заниматься тем, что ему было неинтересно.

По окончании срока обязательной морской службы Майкельсон получает предложение стать преподавателем физики в той же Академии, где учился. Он с радостью соглашается.

Первую славу приносит Майкельсону эксперимент по определению скорости света. После его успешного завершения Майкельсона командировуют на два года в Европу для обучения у знаменитых физиков Франции и Германии. В Берлине в лаборатории Гельмгольца он приступает к измерению скорости "эфирного ветра" и создает интерферометр, на котором был получен "самый выдающийся из отрицательных результатов".

После возвращения из Европы морской офицер Майкельсон уходит в отставку и становится профессором фи-

зики в Школе прикладных наук в Кливленде. Здесь совместно с Морли он совершенствует интерферометр, работает до нервного истощения, пытаясь определить абсолютное движение Земли в пространстве, но скорость света в любом направлении оказывается одинаковой. Майкельсон разочарован. Он утешает себя тем, что "произведенная работа вознаградила его за отрицательный результат опыта изобретением интерферометра".

Майкельсон самозабвенно увлекался своими экспериментами. А если было необходимо отдохнуть, он шел на теннисный корт или играл на скрипке, которую любил с детства. Когда находило настроение, Майкельсон брал мольберт и акварельные краски и долгие часы проводил наедине с природой. Однажды он выставил несколько своих картин в Чикагском университете, но на вопрос, не ошибся ли он в выборе профессии, ответил, что "только в науке искусство может найти свое высочайшее выражение". Майкельсон даже напечатал статью "О металлической окраске птиц и насекомых" с собственными прекрасными цветными рисунками, в которой показал, что крылья некоторых насекомых представляют дифракционные решетки, созданные природой.

По характеру Майкельсон был прямолинеен, не скрывал своих мыслей и не смягчал выражений. Это затрудняло его отношения с людьми. Однако будучи строгим и резким по отношению к другим, он не менее строго судил и самого себя. Прижизненную славу он принял со скромностью и достоинством.

Майкельсон первым из американских ученых получил Нобелевскую премию "за создание прецизионных оптических приборов и выполнение с их помощью спектроскопических и метрологических измерений".

За несколько месяцев до смерти 79-летний Майкельсон, лежа в постели, руководил новым экспериментом по измерению скорости света, но завершить этот эксперимент уже пришлось его ученикам.

Работы Майкельсона продемонстрировали, что интерференционные методы измерения обладают уникальными возможностями. При этом схемы интерферометров отличаются принципиальной простотой, а в качестве эталона используется природная константа — длина волны. Изоб-

ретенние многолучевых интерферометров позволило довести порог чувствительности при определении разности хода световых волн до 10^{-3} мкм, что соизмеримо с межатомными расстояниями.

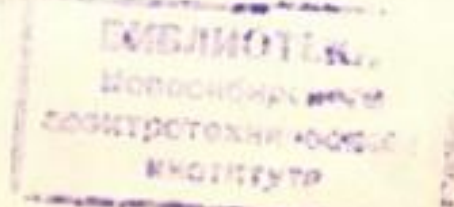
И всё же применение интерференционных методов до изобретения лазеров и голографии было весьма ограничено

Смысл интерферометрии является сравнение мало отличающихся друг от друга волновых фронтов — исследуемого и эталонного. В качестве эталонного фронта практически можно было использовать либо плоскую, либо сферическую волну. Значит, и исследуемые объекты должны создавать подобные волны, быть зеркалами, линзами, пластинами, т.е. оптически совершенными объектами. Кроме того, размеры объектов или измеряемые расстояния не могли превышать нескольких сантиметров из-за малой временной и пространственной когерентности света.

После изобретения лазеров и голографии в интерферометрии произошел качественный скачок. Лазерные интерферометры, суть которых осталась классической (только изменился источник света), в настоящее время встраиваются в серийно выпускаемые станки, позволяют измерять расстояния до нескольких десятков метров с метрологической точностью. Эталон длины стало возможным использовать в качестве рабочей меры.

86.11
Использование голографического принципа записи волновых фронтов позволило запоминать как угодно сложную световую волну и восстанавливать ее в любой момент времени. Оптические свойства объектов, сложность их формы практически перестали играть роль. Интерференционные методы оказались теперь применимы для исследования промышленных деталей и конструкций, их деформаций и напряжений, вибрационных характеристик, параметров рельефа, качества обработки поверхности. Голографическая интерферометрия, интенсивно развивающаяся с середины 60-х годов, стала одним из мощных средств научного и технического эксперимента.

Методы голографической интерферометрии и их использование рассмотрены в последующих главах.



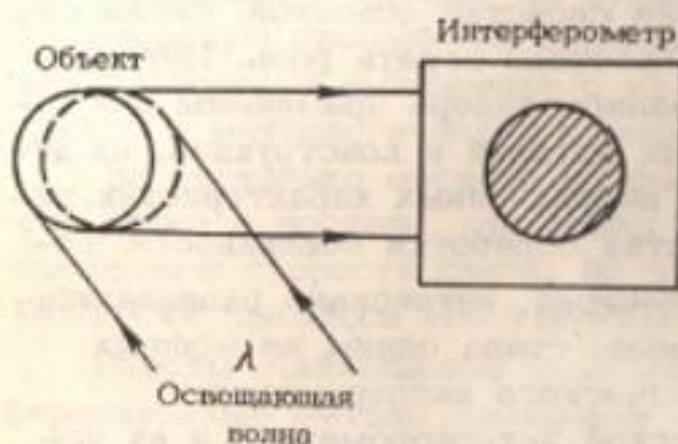
Г л а в а 2

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС

1. ГОЛОГРАФИЯ. ВИДЫ ГОЛОГРАММ И ИХ СВОЙСТВА

Взаимодействие света с объектом давно используется для получения измерительной информации. Рассеяние, поглощение и пропускание световой энергии, а также возможность построить с помощью оптики изображения объекта позволяют измерять многие физические и геометрические параметры. Для этого сравнивают, например, исходное распределение яркости световой волны, чаще всего равномерное, с распределением яркости после взаимодействия волны с объектом. В других случаях определяют пространственные характеристики световых волн, рассеянных объектом в различных состояниях.

При использовании когерентного света ситуация принципиально изменяется. Теперь имеется возможность сравнивать не поля яркости, а распределения фаз световых



воли (рис. 6). Мерой служит длина световой волны, которую можно считать известной с эталонной точностью, а устройство сравнения есть не что иное, как интерферометр. В результате сравнения получаем интерференционную картину, и число интер-

Рис. 6. Сравнение фаз световых волн

ференционных полос показывает, сколько раз мера — длина волны — содержится в измеряемой величине. Подчеркнем, что использование эталона в качестве рабочей меры является важным достоинством интерференционных методов, поскольку позволяет получать высокую точность измерения в производственных условиях.

Голографический интерферометр — это, по существу, системный измерительный преобразователь, который преобразует поле измеряемых величин в интерференционную картину. Информация получается одновременно и параллельно по всему полю, что также следует отнести к достоинствам голографических интерферометров.

Прежде чем рассмотреть методы голографической интерферометрии, напомним, что такое голографический принцип записи и восстановления световых волн.

Основная мысль, приведшая Дэнниса Габора в 1947 г. к изобретению голографии, заключается в том, что световая волна, рассеянная объектом, имеющая сложное распределение амплитуд и фаз, в любом сечении содержит полную информацию об изображении объекта. И оптическая система расшифровывает эту информацию, преобразуя световую волну в изображение на некоторой плоскости. Но в принципе можно обойтись без оптической системы (не случайно голографию иногда называют безлинзовой фотографией), если найти способ записи и восстановления амплитуд и фаз световой волны, а не поля яркостей, как в обычной фотографии. Габор понял, что это можно сделать, используя известные явления интерференции и дифракции световых волн.

Волна, рассеянная объектом, и опорная волна (рис. 7,а) образуют в области наложения интерференционную картину, которая фиксируется обычным фотографическим способом, например, на фотопластинке. Если на полученную таким образом голограмму теперь падает опорная волна, то она дифрагирует на интерференционной структуре. В результате дифракции восстанавливается волна, которая шла при записи от объекта (рис. 7,б). Через голограмму, как через окно, мы видим изображение, ничем не отличающееся от реального объекта. При этом в пределах голог-

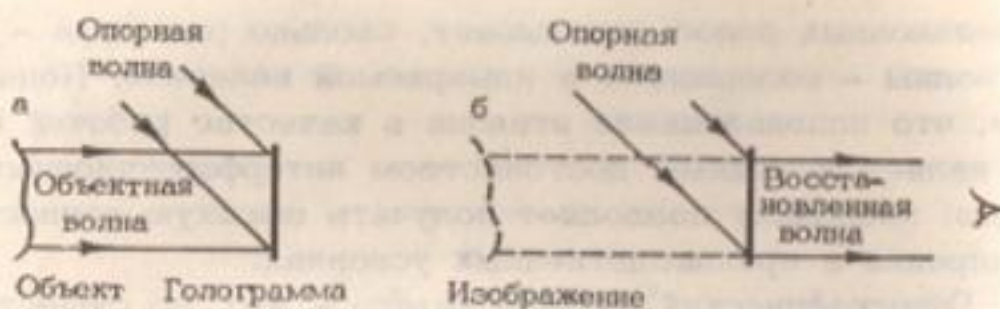


Рис. 7. Запись и восстановление голографического изображения

раммы можно наблюдать объект с разных ракурсов, ощущая его объемность.

Другое удивительное свойство голограммы, в отличие от фотографии, заключается в том, что каждая ее часть несет информацию обо всем объекте. Только вся голограмма — это большое окно, а ее часть — малое отверстие. Видно хуже, но все целиком.

Голограмму можно получить в любом месте пространства, где есть интерференция объектной и опорной волн. На рис. 8 в поле интерференции сферической и плоской волн показаны голограммы в четырех характерных положениях, определяющих четыре различных типа голограмм. В положении 1 предъявляются минимальные требования к когерентности источника и разрешающей способности регистрирующей среды, так как разность хода световых волн до голограммы минимальна, а шаг интерференционных полос максимален. Не случайно именно в этом положении Габором были получены первые голограммы. В качестве источника он использовал ртутную лампу. Такие

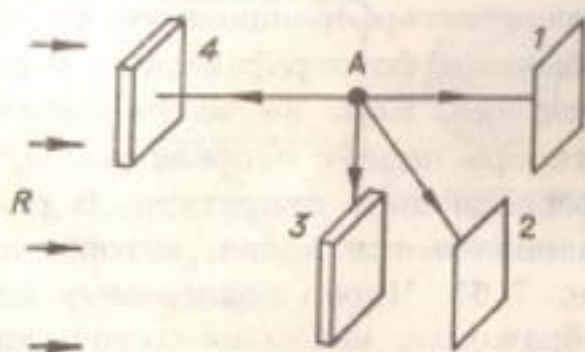


Рис. 8. Типы голограмм

голограммы получили название осевых или габоровых. Главный их недостаток — все порядки дифракции совпадают по направлению, что приводит к низкому качеству восстановленного изображения.

Получение голограмм в других положениях оказалось возможным только после появления лазеров. Первые внеосевые голограммы (положение 2) были получены в 1962 году Э. Лейтом и Ю. Упатниексом. Теперь при восстановлении с голограммы дефрагированные волны разделены в пространстве, и качество изображения существенно улучшается. Внеосевые голограммы получили наибольшее распространение при решении технических задач.

Дальнейшее увеличение угла θ между опорной и объектной волнами приводит к уменьшению шага полос d в соответствии с равенством

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}}, \quad (5)$$

где λ — длина световой волны.

В положении 3 $\theta \approx \frac{\pi}{2}$, а в положении 4 $\theta \approx \pi$. Шаг полос уменьшается до $\lambda/2$, а разность хода световых волн возрастает до удвоенного расстояния от объекта до голограммы. В этом случае толщина эмульсии фотопластинок, равная 10–15 мкм, оказывается достаточной, чтобы зарегистрировать объемную интерференционную картину. И сами голограммы 3 и 4, в отличие от плоских голограмм 1 и 2, получили название объемных. Голограмма 3 впервые описана П. Ван Хирденем в 1963 г. и получила название брэгговской, так как дифракция на такой голограмме подчиняется закону Брэгга. Голограмма 4 была исследована Ю. Н. Денисюком в 1962 г. и называется обычно голограммой во встречных пучках.

Замечательным свойством объемных голограмм является их способность восстанавливать изображение в белом свете. Объемная интерференционная структура представляет собой узкополосный фильтр, вырезающий из непрерывного спектра ту длину волны, на которой была записана голограмма.

3. $\sqrt{\quad}$ Каждая из четырех типов голограмм может быть либо амплитудной, либо фазовой. В первом случае изменяется коэффициент поглощения голограммы в соответствии

с распределением поля яркости, во втором — коэффициент преломления или рельеф поверхности голограммы.

Фазовые голограммы имеют существенно большую дифракционную эффективность, под которой понимается отношение

$$D = \frac{I_{\text{и}}}{I} 100\%, \quad (6)$$

где $I_{\text{и}}$ и I — соответственно интенсивности восстановленной и восстанавливающей световых волн.

Для плоских фазовых голограмм в пределе $D \approx 33,9\%$, а для объемных $D = 100\%$. Плоские амплитудные голограммы имеют теоретически $D = 6,25\%$, и объемные примерно столько же.

В то же время фазовые голограммы из-за наличия дефектов, царапин, неоднородностей дают большой уровень шумов в изображении по сравнению с амплитудными, для которых указанные причины не имеют значения. В зависимости от того, что важнее обеспечить — высокую дифракционную эффективность или низкий уровень шумов — выбирается фазовая или амплитудная голограмма.

Для более подробного знакомства с принципом голографической записи и свойствами голограмм необходимо обратиться к многочисленной литературе, например, [1-9]. Мы же на этом ограничимся и перейдем к рассмотрению методов голографической интерферометрии.

У В голографическом интерферометре осуществляется интерференция между двумя и более световыми волнами, из которых по меньшей мере одна записана на голограмму. Причины, по которым возникает разность фаз между интерферирующими волнами, могут быть различными. Во-первых, они связаны с исследуемым объектом, его смещениями, деформациями, изменениями оптической плотности; во-вторых, с изменением оптических характеристик среды, в которой находится объект; в-третьих, с изменением характеристик лазерного излучения при записи и восстановлении световых волн.

Таким образом, причин, приводящих к возникновению интерференционных картин, довольно много, и они определяют многообразие методов голографической интерферометрии и видов голографических интерферометров [10-21].

Мы рассмотрим только интерферометры, в которых *интерференционная картина образуется при смещении точек поверхности диффузно рассеивающего объекта, поскольку они имеют наиболее важные практические приложения и на их примере могут быть изучены основные свойства, присущие голографическим интерферометрам вообще.

2. МЕТОД «ЖИВЫХ» ПОЛОС

Сначала рассмотрим голографический интерферометр для определения векторов смещений точек поверхности объекта в реальном времени.

6 V На рис. 9 показана исследуемая поверхность, точки которой в процессе эксперимента могут перемещаться. Запишем волну, рассеянную поверхностью в начальном состоянии, на голограмму. При этом голограмма обрабатывается на месте экспонирования, так как при восстановлении изображения она должна находиться точно в том же самом месте, что и при записи. В этом случае волна, восстановленная с голограммы, совпадает с волной, рассеянной объектом, и через голограмму видны одновременно объект и его изображение, ничем не отличающиеся друг от друга. Если теперь объект подвергается воздействию, и точки поверхности начинают перемещаться, то соответственно изменяется и волна, рассеянная поверхностью. Эта волна интерферирует с начальной волной, восстановленной с голограммы. Через голограмму наблюдаем интерференционную картину, причем она меняется. По объекту бегут интерференционные полосы. Поэтому такой метод получения интерферограмм в реальном времени получил еще название метода "живых" полос.



Рис. 9. Интерферометр в реальном времени

Отметим, что смещения точек настолько малы, что оптическая система наблюдения не разрешает различных положений точек, но возникающая в результате смещений разность хода между волнами приводит к образованию интерференционных полос.

Сразу возникает вопрос, как по этим полосам определить смещения точек.

Если единичными векторами \vec{r}_0 и \vec{r}_n обозначить соответственно направления освещения и наблюдения объекта, а смещение некоторой точки поверхности A — через \vec{u} , то разность хода световых волн, рассеянных точкой A до и после смещения составит, как видно из рис. 10,

$$l = l_0 + l_n = \vec{u}(\vec{r}_0 + \vec{r}_n). \quad (7)$$

Это соответствует разности фаз между волнами

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} l. \quad (8)$$

Ту же разность фаз можно определить через число интерференционных полос N , пробежавших через точку при перемещении. Период изменения яркости точек, т.е. одна интерференционная полоса, означает фазовый сдвиг

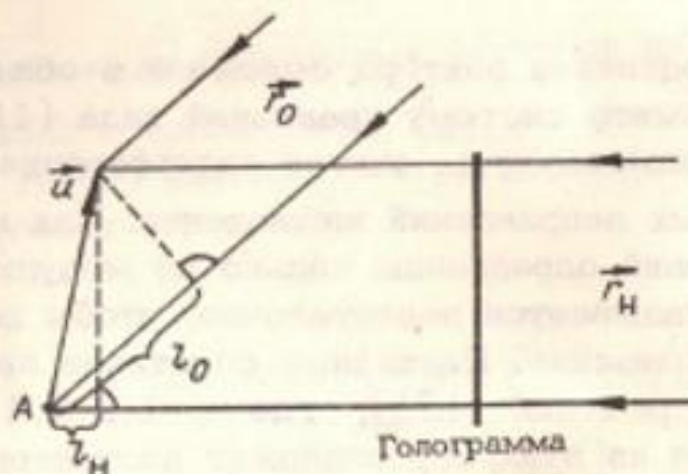


Рис. 10. К уравнению расфазировки интерферограмм

между волнами, равный 2π . Следовательно, считая число полос, пробегающих через точку, получаем фазовый сдвиг

$$\varphi = 2\pi N, \quad (9)$$

причем N может быть дробным числом. Приравнявая (8) и (9) и подставляя (7), имеем

$$\vec{u}(\vec{r}_0 + \vec{r}_H) = \lambda N. \quad (10)$$

Полученное равенство связывает между собой вектор смещения \vec{u} , геометрические параметры интерферометра \vec{r}_0 и \vec{r}_H , длину волны лазерного излучения λ и число интерференционных полос N .

Левая часть выражения (10), являющаяся скалярным произведением векторов, есть проекция \vec{u} на биссектрису угла между \vec{r}_0 и \vec{r}_H . Именно эта проекция и может быть определена из (10), причем с точностью до знака, поскольку косинус — четная функция. Значение модуля можно найти только при априорно заданном направлении смещения. Например, если смещение \vec{u} совпадает по направлению с \vec{r}_0 и \vec{r}_H , то из (10) следует:

$$|\vec{u}| = \frac{\lambda}{2} N.$$

Для определения вектора смещения в общем случае необходимо иметь систему уравнений вида (10). Такую систему можно получить, считая интерференционные полосы с разных направлений наблюдения. Так как левые части уравнений определены только по модулю, трех уравнений оказывается недостаточно, чтобы получить однозначное решение. Различные сочетания знаков дают четыре пары решений $|\vec{u}|_i$, где $i=1,2,3,4$. Чтобы узнать, какая из этих пар содержит достоверный результат, необходимо четвертое уравнение. Подставляя решения $|\vec{u}|_i$ в это уравнение, находим такое, при котором уравнение обращается в тождество. В итоге получаем результат, достоверный по модулю, но неопределенный по знаку.

Поясним, как вычисляется смещение, на примере.

Если для удобства представить \vec{u} в виде проекций в прямоугольной системе координат (u, v, w) , то уравнения (10) запишутся, как

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \pm \lambda \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

а четвертое уравнение примет вид:

$$a_{41}u + a_{42}v + a_{43}w = \pm \lambda N_4, \quad (12)$$

где a_{ij} — коэффициенты, определяемые геометрией голографического интерферометра.

Зададим направления освещения и наблюдений, как показано на рис. 11. Векторы \vec{r}_0 и \vec{r}_{n4} совпадают с осью z , а направления \vec{r}_{n1} , \vec{r}_{n2} , \vec{r}_{n3} составляют угол 2γ с осью z и расположены равномерно вокруг

нее, т.е. углы между проекциями векторов на плоскость xy равны 120° . Кроме того, \vec{r}_{H1} лежит в плоскости xz . Для такого интерферометра уравнения (11) выглядят следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \sin\gamma & 0 & \cos\gamma \\ -\frac{1}{2}\sin\gamma & \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\gamma & \cos\gamma \\ -\frac{1}{2}\sin\gamma & -\frac{\sqrt{3}}{2}\sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \pm \frac{\lambda}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{pmatrix} \quad (13)$$

а уравнение (12) принимает максимально простой вид

$$w = \pm \frac{\lambda}{2} N_3. \quad (14)$$

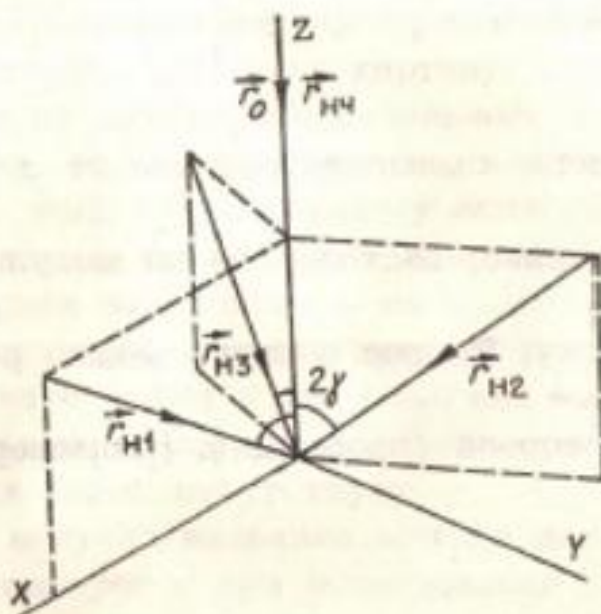


Рис. 11. Направление освещения и наблюдений

Пусть $\gamma=30^\circ$, $N_1=2$, $N_2=3$, $N_3=5$, $N_4=2\frac{2}{3}$, $\lambda=0,5$ мкм.

Решая (13) для различных сочетаний знаков чисел полюс, получим для компоненты w следующие значения: $\pm \frac{10}{9}, 0, \pm \frac{2}{3}, \pm \frac{4}{9}$ (мкм). Так как уравнение (14) содержит только w , то для компонент u и v можно не находить всех пар решений, а сразу, подставляя найденные значения w в (14), убедиться, что уравнение обращается в тождество при $w=\pm \frac{2}{3}$ мкм. Знак (+) соответствует сочетанию $(+N_1, -N_2, -N_3)$, а (-) - $(-N_1, +N_2, +N_3)$. Для этих сочетаний и найдем теперь значения u и v из уравнений (13):

$$u = \pm \frac{4}{3} \sqrt{3} \text{ мкм}, \quad v = \pm \frac{2}{3} \text{ мкм}.$$

Итак, вектор смещения составляет $\pm (\frac{4}{3}\sqrt{3}, \frac{2}{3}, \frac{2}{3})$ мкм. Получили значение, достоверное по модулю, но неопределенное по знаку. Вопрос о знаке можно решить только на основе априорной информации. Например, если на тон-

кую оболочку или мембрану воздействуют давлением, то известно направление нормальной компоненты вектора ω . Если исследуют пластинку на растяжение, то из условий эксперимента ясно направление тангенциальных компонент u или v .

Таким образом, для определения векторов смещений в реальном времени методом голографической интерферометрии, необходимо в каждой точке с четырех направлений осуществлять счет интерференционных полос и решать систему линейных уравнений вида (11), (12).

Не обсуждая пока вопросы реализации голографического интерферометра в реальном времени, отметим только, что она сложна, а зачастую просто невозможна. Поэтому существуют другие, более простые методы получения голографических интерферограмм, которые, являясь по сути частными случаями метода "живых" полос, менее универсальны. Но круг задач, которые они решают, оказывается достаточно важным, чтобы оправдать их существование.

3. МЕТОД ДВУХ ЭКСПОЗИЦИЯ

В каждый момент времени в методе "живых" полос мы наблюдаем интерференционную картину, определяемую смещениями точек от некоторого начального до данного момента. Очевидно, что точно такая же картина интерференции получится, если на голограмму записать волны, рассеянные объектом в начальном и конечном состояниях. Например, первая экспозиция — до приложения нагрузки, вторая экспозиция — после приложения нагрузки. Обе интерферирующие волны в этом случае восстанавливаются с голограммы, и реальный объект при наблюдении интерференционных полос отсутствует.

Такой метод получил название метода двух экспозиций и широко используется при исследовании статических деформаций.

Подчеркнем, что полосы в двухэкспозиционной интерферограмме существенно отличаются от "живых" полос. Они образованы точками, имеющими равные смещения, и

двумерная функция яркости может иметь сложный вид, определяемый полем смещений, в то время как "живая" полоса есть следствие изменения яркости одной смещающейся точки.

Выясним, как по интерферограмме, полученной методом двух экспозиций, можно определить поле смещений точек поверхности. Для этого сначала предположим, что при смещении некоторой точки от начального положения до конечного через нее в направлении \vec{r}_{H1} пробежало N_1 "живых" полос, а в направлении \vec{r}_{H2} — N_2 полос. Тогда в соответствии с (4)

$$\begin{aligned} \vec{u}(\vec{r}_0 + \vec{r}_{H1}) &= \lambda N_1, \\ \vec{u}(\vec{r}_0 + \vec{r}_{H2}) &= \lambda N_2. \end{aligned} \quad (15)$$

Вычитая одно уравнение из другого, получим

$$\vec{u}(\vec{r}_{H2} - \vec{r}_{H1}) = \lambda (N_2 - N_1) = \lambda N_{21} \quad (16)$$

Смысл равенства (16) заключается в том, что при изменении направления наблюдения с \vec{r}_{H1} на \vec{r}_{H2} через точку пробегает N_{21} полос. Значения N_1 и N_2 остаются неизвестными, а их разность может быть определена по двухэкспозиционной голограмме при изменении направлений наблюдения.

Как и в случае "живых" полос, для определения вектора необходимо получить три линейно независимых уравнения. Изменяя направления наблюдения с \vec{r}_{H2} на \vec{r}_{H3} и возвращаясь с \vec{r}_{H3} на \vec{r}_{H1} (рис. 12), получаем систему уравнений

$$\begin{aligned} \vec{u}(\vec{r}_{H2} - \vec{r}_{H1}) &= \lambda N_{21} \\ \vec{u}(\vec{r}_{H3} - \vec{r}_{H2}) &= \lambda N_{32} \\ \vec{u}(\vec{r}_{H1} - \vec{r}_{H3}) &= \lambda N_{13} \end{aligned} \quad (17)$$

а для установления достоверного по модулю результата используем дополнительное направление \vec{r}_{H4} и получаем еще одно уравнение

$$\vec{u}(\vec{r}_{H4} - \vec{r}_{H1}) = \lambda N_{41}. \quad (18)$$

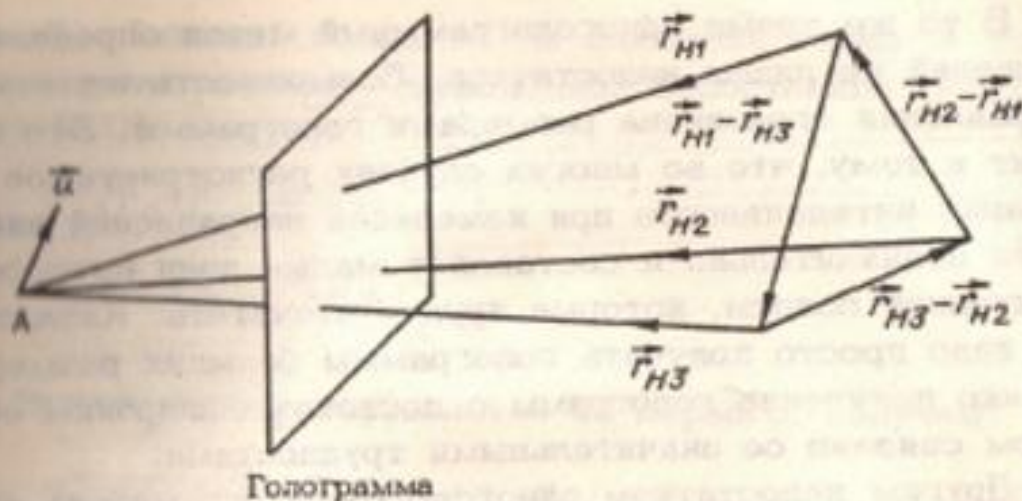


Рис. 12. Одноголограммный способ расшифровки

Но если уравнения (10) содержали информацию о проекциях вектора смещения на биссектрисы углов между \vec{r}_0 и \vec{r}_{Hi} , то уравнения (17) определяют проекции на разностные векторы, перпендикулярные биссектрисам. Это свидетельствует о том, что интерферометр, в зависимости от того, как подсчитываются интерференционные полосы, оказывается наиболее чувствительным к различным составляющим вектора смещения. Например, освещая и наблюдая объект по нормали к поверхности, в методе "живых" полос имеем максимальную чувствительность к смещению по нормали, а смещения по касательной не вызывают появления интерференционных полос. При тех же условиях в методе двух экспозиций, меняя направление наблюдения в пределах одной голограммы, получаем максимальное число интерференционных полос при смещении по касательной, а чувствительность к нормальной составляющей смещения равна нулю.

Отметим два достоинства одноголограммного интерферометра. Во-первых, как видно из уравнений (17), (18), для определения смещений не требуется знать направление освещения. Это особенно существенно, когда исследуются большие объекты, которые приходится освещать сферической волной, и вектор \vec{r}_0 оказывается различным для разных точек поверхности.

Во-вторых, в одноголограммном интерферометре определяются абсолютные смещения точек за время между экспозициями, поскольку подсчитываются только полосы, проходящие через исследуемую точку.

В то же время одноголограммный метод определения смещений не лишен недостатков. Возможность изменения направления ограничена размерами голограммы. Это приводит к тому, что во многих случаях регистрируемое изменение интенсивности при изменении направлений наблюдения незначительно и составляет малые доли интерференционной полосы, которые трудно отсчитать. Казалось бы, надо просто получать голограммы больших размеров. Однако получение голограмм с достаточно широким обзором связано со значительными трудностями.

Другим недостатком одноголограммного метода является необходимость малой апертуры наблюдения для выделения одного направления, что приводит к значительной потере интенсивности изображения. Чем больше апертура, тем больше число лучей с разных направлений участвует в получении изображения. Происходит суммирование многих интерференционных картин, отличающихся друг от друга, в результате чего происходит падение контраста вплоть до полного исчезновения интерференционных полос.

Если возникают трудности получения одной голограммы больших размеров, может быть, имеет смысл получить тем же методом двух экспозиций несколько голограмм с существенно отличными друг от друга направлениями. Разберемся, что мы теряем и что приобретаем, используя такой многоголограммный интерферометр.

Несколько небольших голограмм, которые расположены под разными углами к исследуемому объекту, можно представить как составные части одной большой голограммы. Однако, в отличие от одноголограммного метода, в данном случае нет возможности непрерывно изменять направление наблюдения. Через каждую голограмму наблюдаем практически неподвижную интерференционную картину.

Теперь выясним, какие же здесь считать интерференционные полосы, чтобы определить поле смещений точек. Снова, как и при получении равенства (16), проведем мысленный эксперимент. Допустим, что при смещении некоторой точки A от начального положения (первая экспозиция) до конечного положения (вторая экспозиция) при наблюдении через голограмму с направления \vec{r}_{H1} пробе-

жало N_1 "живых" полос, а при смещении точки B той же поверхности число "живых" полос составило N_2 . Тогда из (10) следует:

$$\begin{aligned} \vec{u}_A (\vec{r}_0 + \vec{r}_{H1}) &= \lambda N_1, \\ \vec{u}_B (\vec{r}_0 + \vec{r}_{H1}) &= \lambda N_2. \end{aligned} \quad (19)$$

Вычитая второе равенство из первого, получим

$$(\vec{u}_A - \vec{u}_B) (\vec{r}_0 + \vec{r}_{H1}) = \lambda (N_1 - N_2) = \lambda N_{H1}. \quad (20)$$

Если смещение точек отрезка AB меняется монотонно, то нетрудно сообразить, что разность N_{H1} — это число полос на объекте между точками A и B . Подсчитывая это число полос и подставляя в (20), можно найти значение разности проекций векторов смещений точек A и B на биссектрису угла между \vec{r}_0 и \vec{r}_{H1} . Для определения модуля вектора разности $|\vec{u}_A - \vec{u}_B|$ по аналогии с предыдущими методами необходимо получить четыре голограммы с различных направлений и составить систему уравнений

$$(\vec{u}_A - \vec{u}_B) (\vec{r}_0 + \vec{r}_{Hi}) = \lambda N_{Hi}$$

где $i=1, 2, 3, 4$, а N_{Hi} — число полос, подсчитанных на каждой интерферограмме от точки A до точки B .

Только в том случае, если точка B остается неподвижной между двумя экспозициями ($\vec{u}_B = 0$, $N_2 = 0$), уравнения (21) позволяют определить абсолютное смещение точки A . Неподвижные точки принадлежат так называемой нулевой полосе. Необходимость нулевой полосы для определения смещений является недостатком многоголограммного интерферометра по сравнению с одноголограммным, а также интерферометрами в реальном времени, которые могут быть реализованы и с одной, и с многими голограммами.

Многоголограммные интерферометры сложнее, но за счет существенного отличия направлений наблюдения \vec{r}_{Hi} друг от друга и соответствующих им интерференционных картин возрастает разница в числах полос, полученных

с разных направлений, и требования к точности отсчета интерференционных полос уменьшаются. Если нулевая полоса в многоголограммном двухэкспозиционном интерферометре отсутствует, то могут быть определены только относительные смещения точек. Так как чаще нас интересует не поле смещений, а поле деформаций, которое есть производная от поля смещений по координатам, то в принципе не имеет значения, какую — подвижную или неподвижную — точку выбрать за точку отсчета. Это делается только из соображений удобства.

Рассмотрим вопрос определения деформаций по интерферограмме более подробно. Понятие деформации основано на изменении элемента длины поверхности (об объемных деформациях интерферограмма не дает представления, поскольку несет информацию только о смещении точек поверхности диффузно рассеивающего объекта). Поверхностная деформация характеризуется двумя составляющими линейной деформации и деформацией сдвига:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \\ \tau_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \end{aligned} \quad (22)$$

Пусть точки A и B поверхности расположены вдоль оси x и $[AB] \rightarrow O$. Тогда, представляя уравнения (21) в виде (11), можно записать

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial v / \partial x \\ \partial w / \partial x \end{pmatrix} = \pm \lambda \begin{pmatrix} \partial N_{H1} / \partial x \\ \partial N_{H2} / \partial x \\ \partial N_{H3} / \partial x \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Чисто формально получены в правой части уравнений производные от чисел полос по координате. Теперь выясним, какой они имеют физический смысл и как их определять в эксперименте. Число полос на единице длины есть пространственная частота этих полос. Поэтому, задавая координаты точек поверхности, например, с помощью сетки, и считая число полос ΔN_{H_i} между узлами,

получим в результате решения (23) усредненные по шагу сетки Δx_z значения компонент деформации. Производная по координате представляет собой пространственную частоту полос в точке, которая аналогична понятию мгновенной частоты во времени. Ее можно вычислить по изменению яркости в точке.

Действительно, по определению

$$I = 2I_0(1 + \cos 2\pi N). \quad (24)$$

Следовательно,

$$\frac{1}{2I_0} \frac{\partial I}{\partial x} = -2\pi \frac{\partial N}{\partial x} \sin 2\pi N. \quad (25)$$

Соотношение (25) показывает, как можно экспериментально определить пространственную частоту полос в точке. Для этого надо получить нормированные функции яркости $I_{Nz}(x)$, продифференцировать их, построить огибающие, и по ним найти значения $\partial N_{Nz} / \partial x$. Алгоритм непростой, зато позволяет непосредственно по интерференционной картине находить поле деформаций, не определяя предварительно поле смещений. Деформации по оси y определяют аналогичным образом и в результате получают все компоненты поверхностной деформации (22).

Подчеркнем, что непосредственное определение деформаций невозможно при использовании метода "живых" полос, так как отсутствует информация об изменении яркости по поверхности объекта.

Важной особенностью многоголограммного интерферометра является то, что расшифровку интерферограмм можно вести по их фотографиям. Это, как правило, облегчает автоматизацию процесса расшифровки.

Существенную роль при построении голографических интерферометров играет априорное знание характера поля смещений. В экспериментальной механике довольно часто исследуется поведение простых по форме образцов, например, пластин при растяжении, дисков при сжатии, тонких оболочек под давлением изнутри. Во всех этих и подобных им случаях заранее известно направление векторов смещений и требуется определить только их моду-

ли. Поэтому схема многоголограммного интерферометра, которая в общем случае требует получения четырех голограмм, становится значительно проще и может состоять из одной-двух голограмм.

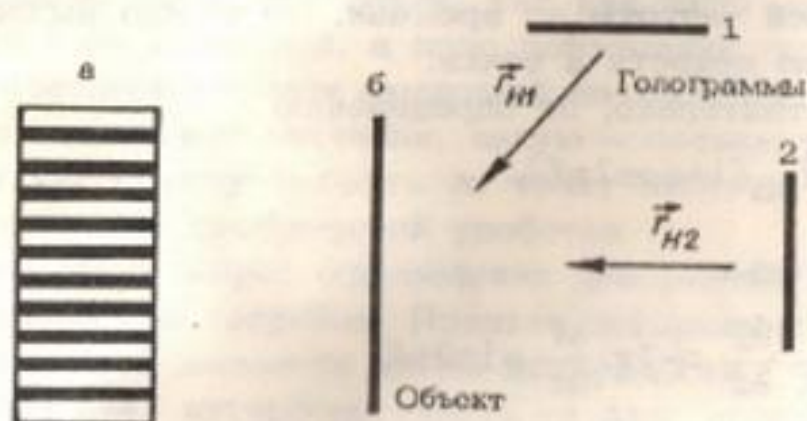


Рис. 13. К однозначности расшифровки

На рис. 13,а показана интерферограмма, представляющая собой полосы одинаковой частоты. Такая интерферограмма могла быть получена при растяжении объекта, если голограмма находилась в положении 1 (рис. 13,б), и при повороте объекта, если голографирование осуществлялось по нормали к поверхности (положение 2). Этот пример показывает, что по одной интерференционной картине, не имея предварительной информации о направлении векторов смещений и схеме голографирования, нельзя не только количественно оценить деформацию, но даже сделать вывод, есть она или отсутствует. Если известны условия эксперимента (допустим, голограмма была в положении 1), то по интерферограмме (рис. 13,а) можно судить о постоянстве деформации по поверхности объекта и определить ее значение. Очевидно, что при одновременном растяжении и повороте достаточно двух голограмм, чтобы измерить смещение.

Метод двух экспозиций, как одноголограммный, основанный на счете полос при изменении направления наблюдения, так и многоголограммный, в котором число полос определяется по неподвижным интерференционным картинам, является основным при исследовании статических деформаций.

В качестве примеров использования метода двух экспозиций приведем две голографические интерферограммы.



Рис. 14. Интерферограмма сферической оболочки

На рис. 14 показана интерферограмма сферической оболочки. Во время первой экспозиции оболочка была не нагружена. Затем произошла деформация оболочки под воздействием внутреннего давления, и во время второй экспозиции на ту же голограмму была записана волна, рассеянная оболочкой после деформации. Интерференционные полосы на восстановленном с голограммы изображении оболочки (рис. 14) несут информацию об относительном смещении точек поверхности в направлении, перпендикулярном к плоскости рисунка, так как с этим направлением совпадали освещение и наблюдение. В данном случае интерференционная картина использовалась для не-

разрушающего контроля – обнаружения по аномалиям полос внутренних дефектов структуры и определения отличий оболочки от идеальной сферы. Отметим, что современная техника при изготовлении тонких сферических оболочек диаметром порядка 10 см предъявляет требования к асферичности не более 1 мкм. Для такого жесткого контроля бесконтактные и высокочувствительные методы голографической интерферометрии являются, по-видимому, единственно пригодными.

Другая интерферограмма, полученная также методом двух экспозиций, показана на рис. 15. Это цилиндрическая оболочка с наклеенными на ее поверхность тремя тензодатчиками. Задача заключалась в том, чтобы оценить применимость тензометрии для определения поверхностных деформаций. Первая экспозиция соответствовала обес-



Рис. 15. Интерферограмма цилиндрической оболочки

точенным датчикам, а вторая производилась, когда по тензосопротивлениям, обычно включаемым в мостовую цепь, протекал ток, необходимый для определения приращения тензосопротивления при деформации. Следовательно, картина полос на рис. 15 характеризует температурные деформации, вызванные локальным нагревом в местах крепления датчиков. Голографическая интерферограмма в этом случае позволяет оценить методическую погрешность, вызванную влиянием из-

мерительного устройства на поле измеряемых величин, что особенно важно при исследовании напряженно-деформированного состояния тонких оболочек.

4. МЕТОД УСРЕДНЕНИЯ

При рассмотрении метода "живых" полос предполагалось, что устройство восприятия интерференционной картины достаточно быстродействующее, чтобы отслеживать изменение яркости. Казалось бы, в ином случае, когда время экспозиции больше периода повторения полос, получится усредненное изображение, в котором полосы отсутствуют. Однако в результате усреднения получается интерференционная картина, имеющая свои интересные особенности.

Определим яркость изображения точки поверхности, которая экспонируется в течение времени τ через голограмму в методе "живых" полос. Пусть волна, восстановленная с голограммы и пришедшая в точку изображения, имеет амплитуду A_0 и нулевую начальную фазу. Тогда волна, рассеянная реальным объектом, в соответствии с (7) и (8) имеет вид

$$A_0 \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}(\vec{r}_0 + \vec{r}_H) \right]. \quad (26)$$

В результате интерференции

$$A = A_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{u} \vec{r} \right) \right], \quad (27)$$

где $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{r}_H$.

Следовательно, мгновенное значение яркости такой точки

$$I = I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{u} \vec{r} \right) \right]^2, \quad (28)$$

а усредненное значение за время τ составит

$$\langle I \rangle = I_0 \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{u} \vec{r} \right) \right]^2 dt. \quad (29)$$

Величина $\langle I \rangle$ зависит от вида функции $\vec{u}(t)$. Рассмотрим два характерных случая.

Если точка поверхности перемещалась с постоянной скоростью \vec{v} , то $\vec{u} = \vec{v}t$ и из (29) следует:

$$\langle I \rangle = I_0 \left(1,5 + 2 \frac{\sin x}{x} + 0,5 \frac{\sin 2x}{2x} \right), \quad (30)$$

где $x = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}_0 \vec{r}$, а $\vec{u}_0 = \vec{v}t$ — вектор смещения точки за время экспозиции.

Напомним, что это смещение не должно превышать разрешения системы наблюдения, иначе теряют смысл рассуждения об интерференции.

Функция (30) показана на рис. 16 (кривая 1). Она представляет собой зависимость яркости изображения точки поверхности от ее смещения за время экспозиции при равномерном движении. Очевидно, что интерференционные полосы или линии равной яркости образуются точками, имеющими одинаковые значения $\vec{u}_0 \vec{r}$. неподвижные точки ($\vec{u} = 0$) образуют линии максимальной яркости. Последующие экстремальные значения функции яркости периодически повторяются, при этом с ростом числа периодов функция $\frac{\sin x}{x}$ быстро затухает, и $\langle I \rangle \rightarrow I_0$. На изображении отсутствуют черные линии ($\langle I \rangle = 0$), и контраст полос, равный

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (31)$$

как видно из рис. 16, падает до нуля.

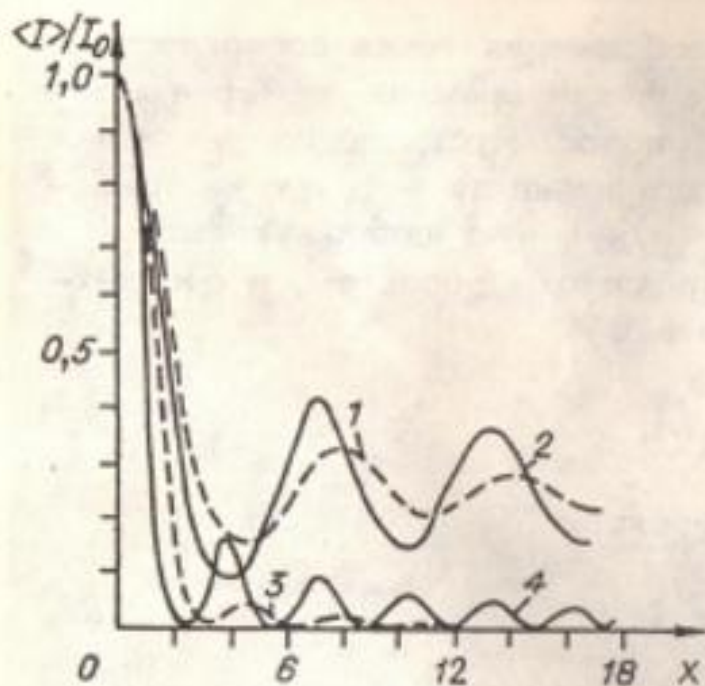


Рис. 16. Изменение яркости в методе усреднения

Рис. 16. Изменение яркости в методе усреднения

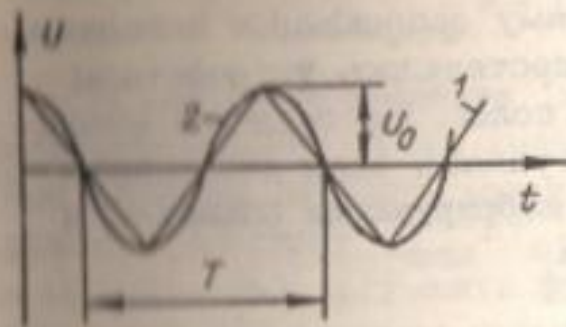


Рис. 17. Вибросмещения точки

Предыдущие рассуждения справедливы, если точка перемещается не поступательно, а совершает колебательные движения (кривая 1, рис. 17). Время экспозиции практически должно быть $\tau \gg T$, где T - период колебаний, чтобы в случае неравенства τ целому числу периодов это не при-

водило к существенному изменению результата усреднения. В этом случае по картине интерференционных полос можно определить максимальное смещение \vec{u}_0 .

Более важен для практики случай гармонических вибраций поверхности, когда (рис. 17, кривая 2)

$$\vec{u} = \vec{u}_0 \cos \frac{2\pi}{T} t. \quad (32)$$

Условие $\tau \gg T$ остается в силе. Тогда из (29) следует:

$$\langle I \rangle = I_0 \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}_0 \cdot \vec{r} \cos \frac{2\pi}{T} t)]^2 dt. \quad (33)$$

Интеграл (33) выражается через бесселевы функции первого рода нулевого порядка J_0 :

$$\langle I \rangle = I_0 [1,5 + 2J_0(x) + 0,5J_0(2x)], \quad (34)$$

где по-прежнему $x = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}_0 \cdot \vec{r}$.

Функция (34) изображена на рис. 16 (кривая 2). Эта функция, как и (30), описывает затухающие колебание, но контраст полос V падает менее резко, чем в предшествующем случае.

Если точки поверхности вибрируют с различной амплитудой, их изображения, полученные через голограмму, имеют разные яркости, за счет чего и образуется интерференционная картина, которая несет информацию об амплитудах вибраций.

До сих пор мы рассматривали интерферометр в реальном времени, когда на голограмму записывался неподвижный объект, а усреднение осуществлялось устройством регистрации интерференционных полос. Но среднюю амплитуду можно записать и на голограмму, если экспонировать на нее волну, рассеянную вибрирующим объектом в течении времени $\tau \gg T$. Тогда

$$\langle A \rangle = A_0 \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{u} \cdot \vec{r}\right) dt, \quad (35)$$

и вместо (30) и (34) получим соответственно

$$\langle I \rangle = I_0 \frac{\sin^2 x}{x^2} \quad (36)$$

и

$$\langle I \rangle = I_0 J_0^2(x). \quad (37)$$

Функции (36) и (37) показаны на рис. 16 (кривые 3 и 4). В отличие от ранее приведенных эти функции имеют периодически повторяющиеся нулевые значения. Это означает, что точки, которые вибрируют с соответствующими амплитудами, "восстанавливаются" с голограммы с нулевой яркостью, т.е. попросту не записываются на голограмму. Они образуют на восстановленном изображении черные линии. Максимальное значение яркости убывает с ростом амплитуды вибраций, но контраст V , если пренебречь шумами, остается равным единице, поскольку $I_{\min} = 0$.

Возможность получения более высокого контраста полос является важным достоинством метода усреднения с помощью голограммы по сравнению с методом усреднения "живых" полос. Однако при наличии шумов падение контраста в первом случае оказывается более резким, и усреднение "живых" полос может обеспечить измерение вибраций в более широком диапазоне амплитуд.

В методе усреднения голограммой предельная амплитуда соответствует экстремальному значению яркости $I = I_{\text{ш}}$. Для уровня шума $I_{\text{ш}} = 0,05 I_0$.

$$x = \frac{2\pi}{\lambda} u_{0, \max} r \approx 14. \quad (38)$$

В методе усреднения "живых" полос предел измерения определится таким значением амплитуды вибраций, при котором разность между экстремальными значениями яркости составит $I_{\max} - I_{\min} = I_{\text{ш}}$. При достаточно больших значениях аргумента функция (34) хорошо аппроксимируется затухающим гармоническим колебанием с амплитудой $\sqrt{2/\pi x}$ [22]. При том же уровне шумов максимальную амплитуду вибраций получим из соотношения

$$2\sqrt{2/\pi x} = 0,05,$$

откуда

$$x = \frac{2\pi}{\lambda} u_{0, \max} r \approx 1020. \quad (39)$$

Сравнение (38) и (39) показывает, что предел измерения амплитуд вибраций при заданном уровне шумов во втором случае увеличивается более чем в 70 раз.

Что касается минимальных амплитуд вибраций, которые можно измерить, или порога чувствительности, то они также зависят от уровня шумов. Но здесь надо иметь в виду еще одно обстоятельство. При исследовании полей вибраций с очень малой амплитудой изменения яркости составляют меньше одной полосы, и приходится определять градации яркости на фоне освещенного объекта. Известно, что малые изменения больших величин трудно измерить с высокой точностью. В измерительной технике для повышения точности в таких ситуациях используется дифференциальный метод, когда основная часть измеряемой величины компенсируется образцовой мерой. Подобный принцип может быть использован и в голографических интерферометрах.

Во всех предыдущих рассуждениях считалось само собой разумеющимся, что фаза опорной волны при голографировании остается постоянной. Это было необходимым условием, поскольку иначе неясно, как интерпретировать интерференционную картину. Голограмма фиксирует разность фаз опорной и объектной волн, а какая из них при этом меняется, для нее не имеет значения.

Однако целенаправленное изменение фазы опорной волны в процессе голографирования в ряде случаев имеет смысл. В частности, при использовании методов усреднения фазовая модуляция опорной волны позволяет устранить яркий фон освещенного объекта. Если при голографировании объекта зеркало, отражающее опорную волну, вибрирует с амплитудой $0,191\lambda$, что соответствует первому нулю функции Бесселя (рис. 16, кривая 4), то неподвижные точки объекта не записываются на голограмму. Еще раз подчеркнем, что это абсолютно то же самое, что голографирование объекта, все точки которого вибрируют с амплитудой $0,191\lambda$, а фаза опорной волны постоянна. В результате неподвижные точки восстанавливаются с голограммы с нулевой яркостью. Поэтому небольшие изменения яркости, связанные с вибрациями объекта, происходят на черном фоне и могут быть измерены значительно точнее. Таким способом удастся измерить амплитуды вибраций, составляющие сотые доли микрометра и менее.

Теперь покажем, что методы усреднения и двойной экспозиции можно представить как крайние случаи более общего метода, который получил название стробоголографического. Его смысл заключается в том, что вибрирующий объект при голографировании экспонируется только в определенные моменты времени, задаваемые строб-импульсами. Если строб-импульсы достаточно узкие и задают моменты времени, соответствующие амплитудным значениям вибраций, то интерференционная картина в этом случае точно такая же, какая была бы получена методом двух экспозиций при статических деформациях со смещениями точек, равными размаху колебаний. Контраст полос максимален и одинаков по всей поверхности объекта. По мере увеличения длительности строб-импульсов падение контраста полос с ростом амплитуды вибраций становится все более существенным и когда длительность строб-импульсов оказывается равной их периоду повторения (непрерывное экспонирование), приходим к интерференционной картине, полученной по методу усреднения (рис. 18).

Итак, голографический интерферометр, в котором реализуется метод усреднения, позволяет определить поле амплитуд вибраций точек поверхности объекта. Одно урав-

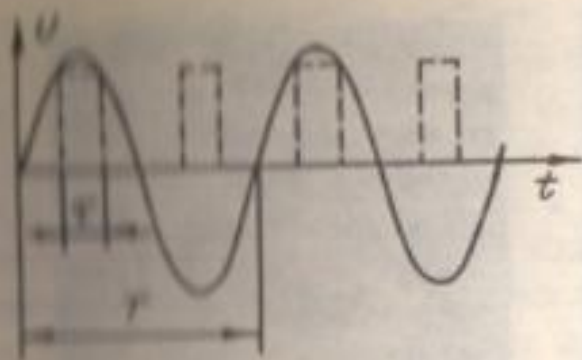


Рис. 18. Строболографический метод

нение вида (34) или (37) содержит информацию о проекции вектора амплитуды вибраций \vec{u}_0 на биссектрису угла между направлениями освещения и наблюдения \vec{r} . Для определения вектора амплитуды, как и в ранее рассмотренных методах,

необходимо иметь четыре независимых уравнения вида (34) или (37), из которых четвертое служит для установления достоверного результата из четырех возможных значений, полученных при решении системы из трех уравнений.

На первый взгляд может показаться, что в случае вибраций в четвертом уравнении нет необходимости, поскольку направление смещения меняется на противоположное каждые полпериода. Однако здесь начинают играть роль фазовые соотношения между колебаниями, соответствующими каждой проекции вектора амплитуды вибраций.

Расшифровка голографических интерферограмм, полученных методом усреднения, сводится к тому, что сначала по функциям изменения яркости (30), (34), (36), (37) или им подобным определяют параметр

$$x_i = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}_0 \vec{r}_i \quad (40)$$

где $i=1, 2, 3, 4$, а затем решают систему уравнений (40), находя значение \vec{u}_0 .

Интерференционный метод усреднения при исследовании гармонических колебаний был впервые использован Остербергом в 1932 г., а в голографическом варианте продемонстрирован Пауэллом и Стетсоном в 1965 г. После этого метод активно развивался и совершенствовался и в настоящее время является одним из мощных средств исследования вибрационных характеристик объектов.

В качестве иллюстрации приведем полученные методом усреднения голографические интерферограммы вибри-

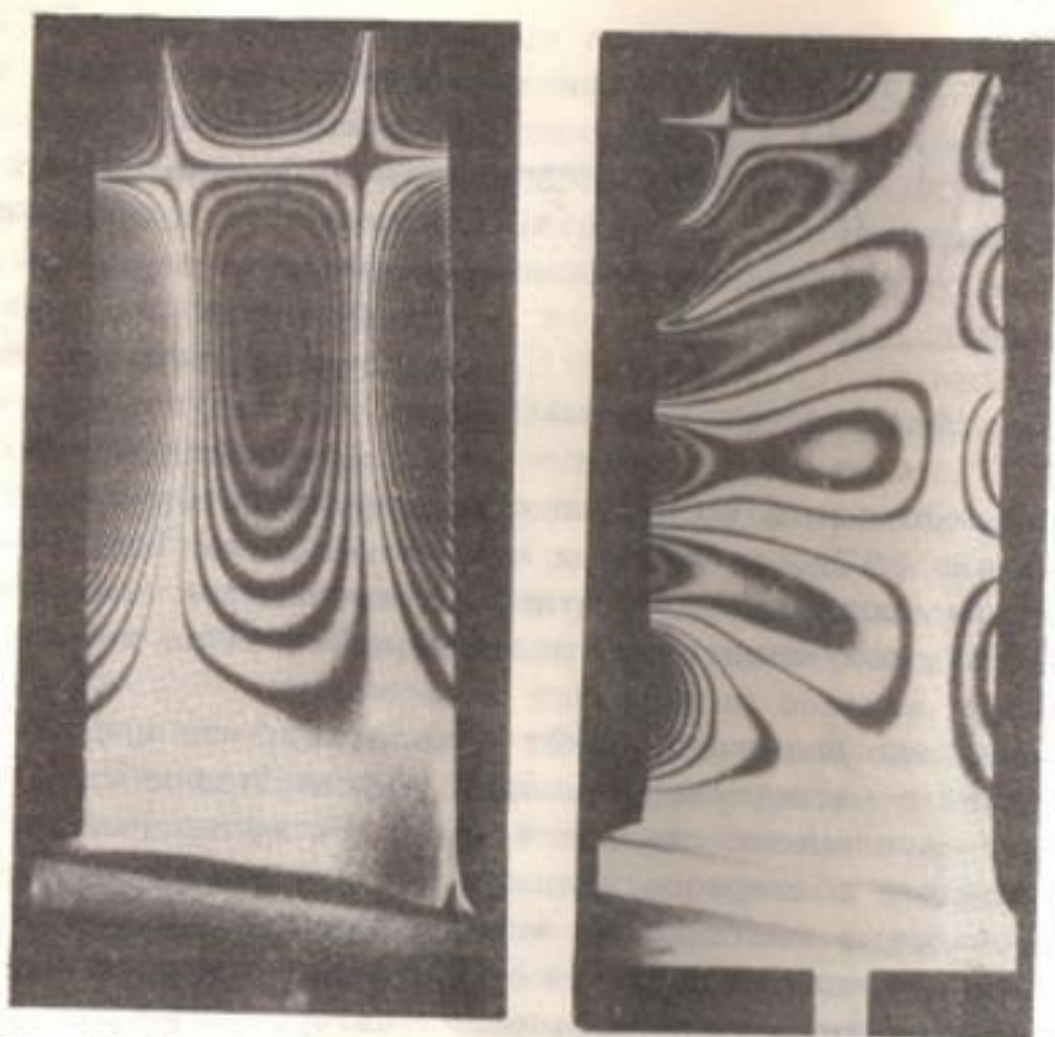


Рис. 19. Интерферограммы вибрирующей лопатки компрессора на резонансных частотах

рующей лопатки компрессора газотурбинного авиационного двигателя (рис. 19). Так как поле вибросмещений на резонансных частотах представляет собой стоячую волну, узловые линии которой соответствуют неподвижным точкам, а пучности — точкам, имеющим максимальную амплитуду, то в соответствии с выражением (37) и рис. 16 (кривая 4), точки с максимальной яркостью образуют картину узловых линий. Отсчитывая число интерференционных полос от узловых линий до исследуемых точек и получая равенство (40), определяют амплитуды вибросмещений в этих точках.

На рис. 19, а, б показаны две формы колебаний. Таких форм для одной лопатки в звуковом диапазоне частот насчитывается 20–25. Получение их традиционным спосо-

бом = сканированием вибрирующей поверхности датчиком со звуком = сопряжено с большими временными затратами и часто сопровождается ошибками и промахами. Использование голографических методов позволяет кардинальным образом облегчить и усовершенствовать эксперимент, сделать его более надежным и достоверным, что имеет первостепенную важность при испытаниях объектов на вибропрочность. Картины форм колебаний в виде голографических интерферограмм не только наглядны и информативны, но еще и красивы, особенно когда они наблюдаются на объемном изображении, восстановленном с голограммы, а не на фотографиях, как на рис. 19.

5. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ

Для получения количественной информации по голографическим интерферограммам необходимо составить систему линейных алгебраических уравнений для каждой исследуемой точки поверхности объекта, определив экспериментально коэффициенты в этих уравнениях. Коэффициенты в левой части уравнения определяются геометрией интерферометра, а в правой – числом интерференционных полос. Следовательно, источниками погрешности измерения являются неточности получения геометрических параметров и отсчета числа полос.

Решение системы линейных уравнений с неточно заданными коэффициентами таит в себе серьезную опасность получения большой ошибки результата при сравнительно малых погрешностях коэффициентов. Поясним это на простом примере. Пусть вектор смещения определяется двумя компонентами u и v , и для их вычисления получена система уравнений

$$\begin{aligned} u+v &= 2, \\ 0,1u+0,101v &= 0,201. \end{aligned} \tag{41}$$

Решая ее, находим $u=1$, $v=1$. Теперь допустим, что коэффициент в правой части второго уравнения определен с ошибкой и равен 0,2 (погрешность 0,5%), а остальные

коэффициенты остались без изменения. Тогда решение новой системы дает значения $u = 2$, $v = 0$.

Неточность задания только одного коэффициента всего лишь в 0,5% привела к настолько различным результатам, что говорить о погрешности не имеет смысла.

Такой эффект — следствие неустойчивости решения системы линейных уравнений. Задача расшифровки интерферограмм оказывается некорректной, поскольку погрешность результата может быть существенно больше погрешности определения экспериментальных данных. В этой ситуации тем более важно оценить погрешность измерения как при разном характере поля смещений, так и для различных схем интерферометров.

В простейшем случае, когда известно направление вектора смещения и требуется достоверно определить его модуль, для измерения с максимальной точностью биссектриса угла между направлениями освещения и наблюдения должна совпадать с направлением смещения. Тогда по одной интерферограмме можно найти смещение из соотношения (10). Учитывая, что абсолютная погрешность измерения $\Delta \vec{u} = \vec{u} - \vec{u}_D$, где \vec{u}_D — действительное значение смещения, в первом приближении может быть определена как полный дифференциал функции $\vec{u}(\varphi, N)$, получим на основании (10), что относительная средняя квадратическая погрешность

$$\delta u = \frac{|\Delta \vec{u}|}{|\vec{u}|} = \left[\left(\frac{1}{2} \Delta \varphi \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (42)$$

где φ — угол между направлениями освещения \vec{r}_0 и наблюдения \vec{r}_H ; $\Delta \varphi$ и ΔN — абсолютные средние квадратические погрешности измерения соответствующих величин.

При несовпадающих направлениях смещения и биссектрисы выражение (42) дает погрешность определения проекции вектора смещения.

Если векторы смещений каким-то образом распределены в угловом интервале, возникает проблема выбора направлений освещения и наблюдения. Критерием оптимальности выбора может служить минимум погрешности определения вектора смещения. Естественно стремление решить задачу как можно в более общем виде.

Пусть направление вектора смещения неизвестно заранее, т.е. оно равновероятно в интервале $[0, \pi]$. Необходимо на основании заданного критерия определить три направления биссектрис (четвертое играет дополнительную роль и только позволяет выделить достоверный результат из уже полученных при решении системы уравнений четырех значений). При полной неопределенности направления вектора смещения не имеет смысла отдавать предпочтение какому-то выделенному направлению биссектрисы. Поэтому логично выбрать биссектрисы в виде симметричной розетки векторов, которая аналогична показанной на рис. 11 в ранее рассмотренном примере. Освещение по-прежнему осуществляется по нормали, угол векторов \vec{r}_{Hi} ($i=1, 2, 3$) с осью z составляет $\lambda\gamma$, а углы между проекциями \vec{r}_{Hi} на плоскость xy равны 120° ; угол между проекцией \vec{r}_{H1} на плоскость xy и осью x , характеризующий поворот розетки вокруг оси z , обозначим через β (на рис. 11 $\beta = 0$). Для этого случая уравнения (11) принимают вид

$$\begin{pmatrix} \cos\beta\sin\gamma & \sin\beta\sin\gamma & \cos\gamma \\ -\sin(\beta+30^\circ)\sin\gamma & \cos(\beta+30^\circ)\sin\gamma & \cos\gamma \\ \sin(\beta-30^\circ)\sin\gamma & -\cos(\beta-30^\circ)\sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \frac{\lambda}{2\cos\frac{\varphi}{2}} \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{pmatrix} \quad (43)$$

Решая эту систему уравнений, находим компоненты вектора смещения:

$$u = \lambda_3 \frac{\pm N_1 \cos\beta \mp N_2 \sin(\beta+30^\circ) \pm N_3 \sin(\beta-30^\circ)}{3\sin\gamma},$$

$$v = \lambda_3 \frac{\pm N_1 \sin\beta \pm N_2 \cos(\beta+30^\circ) \mp N_3 \cos(\beta-30^\circ)}{3\sin\gamma}, \quad (44)$$

$$w = \lambda_3 \frac{\pm N_1 \pm N_2 \pm N_3}{6\cos\gamma},$$

где $\lambda_{\text{э}} = \lambda / \cos \frac{\varphi}{2}$. Если направления освещения и наблюдения совпадают ($\vec{r}_0 = \vec{r}_n$), то $\varphi = 0$ и $\lambda_{\text{э}} = \lambda$. Верхние знаки в равенствах (44) имеют место, когда все числа полос положительны.

Выражения (44) в каждом конкретном случае позволяют легко определить погрешности измерения проекций вектора смещения в зависимости от неточности определения угловых параметров и чисел полос. Сделать же какие-либо общие выводы о характере изменения погрешности в косоугольном интерферометре, об условиях получения максимальной точности измерения на основании выражений (44) не представляется возможным. Анализ этих выражений приводит лишь к тривиальному выводу, который следует из простых геометрических соображений: при углах $\gamma \rightarrow 0$ хорошо определяется нормальная компонента w , а при углах $\gamma \rightarrow 90^\circ$ интерферометр наиболее чувствителен к тангенциальным составляющим u и v .

Для более основательного анализа погрешности измерения смещения голографическим интерферометром воспользуемся результатами хорошо разработанной теории решения линейных алгебраических уравнений [23]. Она дает соотношение между погрешностью вектора-столбца искоемых величин \vec{u} , возмущением угловой матрицы $A = (a_{ij})$, обусловленным неточностью отсчета углов, и погрешностью определения вектора-столбца чисел полос \vec{N}_i , связанной с неточностью отсчета полос. Это соотношение, дающее максимальную оценку относительной погрешности измерения вектора смещения $\delta u = |\Delta \vec{u} / \vec{u}|$, выглядит таким образом:

$$\delta u \leq \frac{\nu}{1 - \nu \delta A} (\delta A + \delta N), \quad (45)$$

где δA и δN — соответственно относительные погрешности угловой матрицы A и вектора-столбца N_i , а ν — число обусловленности, характеризующее устойчивость решения уравнений (11).

Рассмотрим величины, входящие в (45). По определению

$$\Delta N = \frac{|\Delta \vec{N}_i|}{|\vec{N}_i|} = \frac{\sqrt{3}\Delta N}{(N_1^2 + N_2^2 + N_3^2)^{1/2}}, \quad (46)$$

где ΔN — абсолютная погрешность определения числа полюсов, принятая одинаковой для всех трех значений N_1 , N_2 , N_3 .

Чтобы определить величины ν и δA , необходимо вычислить согласованную с нормами $|\vec{u}|$ и $|\vec{N}_i|$ норму матрицы $\|A\|$. Для этого, поскольку векторы-столбцы ортогональны, находим матрицу $A^T A$, где A^T — транспонированная матрица, в которой строки и столбцы поменялись местами. Из уравнений (43) получаем

$$A^T A = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} \sin^2 \gamma & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} \sin^2 \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 3 \cos^2 \gamma \end{pmatrix}, \quad (47)$$

где по диагонали расположены собственные числа матрицы $A^T A$. Тогда сингулярные числа матрицы A , вычисленные как положительные корни квадратные из собственных чисел матрицы $A^T A$

$$\Lambda_{1,2} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sin \gamma, \quad (48)$$

$$\Lambda_3 = \sqrt{3} \cos \gamma.$$

Максимальное сингулярное число по определению является нормой матрицы $\|A\|$. Следовательно,

$$\|A\| = \begin{cases} \sqrt{3} \cos \gamma & \text{при } \gamma \leq \arctg \sqrt{2}, \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \sin \gamma & \text{при } \gamma \geq \arctg \sqrt{2}. \end{cases} \quad (49)$$

Обратим внимание на то, что норма матрицы не зависит от угла β . Можно было бы предположить, что на погрешность измерения не влияет поворот розетки направлений биссектрис вокруг оси z , но гораздо надежнее убедиться в этом с помощью математических выкладок.

Погрешность

$$\delta A = \frac{\|E\|}{\|A\|}, \quad (50)$$

где E - возмущение матрицы A , связанное с неточностью определения угла γ .

Матрицу E можно записать как

$$E = \left(\frac{da_{ij}}{d\gamma} \right) \Delta\gamma, \quad (51)$$

где $\Delta\gamma$ - погрешность определения угла γ . Тогда

$$\|E\| = \left\| \frac{da_{ij}}{d\gamma} \right\| |\Delta\gamma|. \quad (52)$$

Получив матрицу $(da_{ij}/d\gamma)$ и вычислив ее сингулярные числа, находим

$$\begin{aligned} \Lambda_{E1,2} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \cos\gamma, \\ \Lambda_{E3} &= \sqrt{3} \sin\gamma. \end{aligned} \quad (53)$$

Поэтому

$$\left\| \frac{da_{ij}}{d\gamma} \right\| = \begin{cases} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos\gamma & \text{при } \gamma \leq \arctg \frac{1}{\sqrt{2}}, \\ \sqrt{3} \sin\gamma & \text{при } \gamma \geq \arctg \frac{1}{\sqrt{2}}. \end{cases} \quad (54)$$

Подставляя результаты в (50), получим

$$\delta A = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} |\delta \gamma| & \text{при } \gamma \leq \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2}}, \\ |\delta \gamma| \operatorname{ctg} \gamma & \text{при } \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2}} \leq \gamma \leq \operatorname{arctg} \sqrt{2}, \\ \sqrt{2} |\delta \gamma| & \text{при } \gamma \geq \operatorname{arctg} \sqrt{2}. \end{cases}$$

На рис. 20 в соответствии с (55) построен график зависимости $\delta A/|\delta \gamma|$ от γ . Из графика видно, что погрешность δA мало отличается от погрешности $\delta \gamma$, не более чем в 1,4 раза.

Кроме погрешностей δA и δN в выражение (45) входит число обусловленности

$$\nu = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}, \quad (56)$$

где λ_{\max} и λ_{\min} — соответственно максимальное и минимальное сингулярные числа матрицы A . Тогда

$$\nu = \begin{cases} \sqrt{2} \operatorname{ctg} \gamma & \text{при } \gamma \leq \operatorname{arctg} \sqrt{2}, \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{tg} \gamma & \text{при } \gamma \geq \operatorname{arctg} \sqrt{2}. \end{cases} \quad (57)$$

На рис. 21 показана зависимость ν от γ . Она представляется важной, так как практически определяет, во сколько раз погрешность измерения вектора смещения больше, чем погрешности определения коэффициентов в исходной системе уравнений (11). Действительно, если величина δA достаточно мала, можно считать

$$\delta u \leq \nu \delta N. \quad (58)$$

Минимальное значение $\nu = 1$ имеет место при $\gamma = \operatorname{arctg} \sqrt{2} \approx 54,7^\circ$, т.е. в случае, когда направления биссектрис образуют ортогональную систему. Если проекции вектора смещения на направления этих биссектрис обозначить u' , v' , w' , то для них получим выражения, аналогичные (44), но максимально простые:

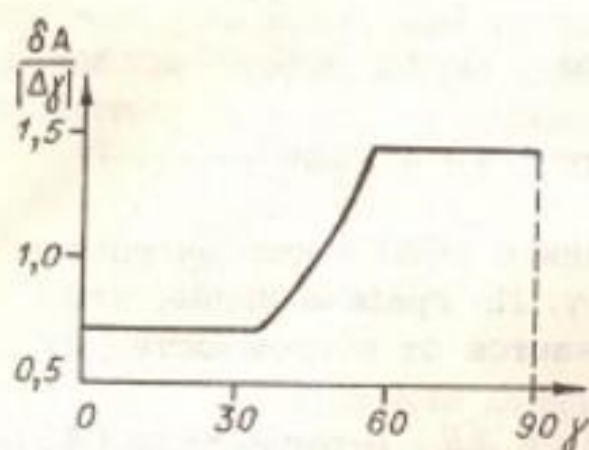


Рис. 20. Погрешность от неточности определения углов

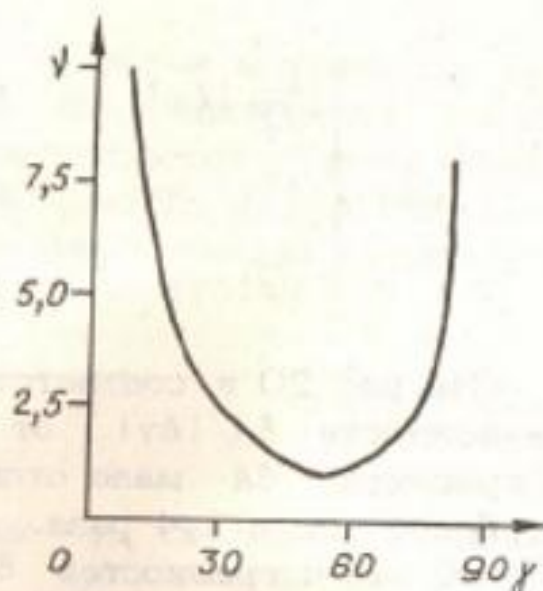


Рис. 21. Изменение числа обусловленности

$$u' = \pm \frac{\lambda_3}{2} N_1, \quad v' = \pm \frac{\lambda_3}{2} N_2, \quad w' = \pm \frac{\lambda_3}{2} N_3,$$

$$|\vec{u}'| = \frac{\lambda_3}{2} (N_1^2 + N_2^2 + N_3^2)^{1/2}.$$

(59)

В ортогональной системе не только погрешность оказывается минимальной, но и модуль вектора смещения определяется однозначно с трех направлений. Во всех других случаях для однозначного определения модуля необходимо иметь, как было показано, четвертое направление.

Из графика на рис. 21 видно, что число обусловленности существенно зависит от γ , причем эта зависимость, как и следовало ожидать, становится более резкой по мере уменьшения или увеличения угла по сравнению с оптимальным. Так, $\nu < 2$ в диапазоне $35^\circ < \gamma < 70^\circ$. Если $20^\circ < \gamma < 80^\circ$, то $\nu < 4$.

При дальнейшем расширении диапазона график круто идет вверх. Однако даже при очень малых углах $\gamma \approx 8^\circ$ $\nu \approx 10$. Поэтому практически можно считать, что устойчивость решения исследуемой системы уравнений в широком диапазоне углов γ достаточно высокая.

Таким образом, определены все величины, входящие в неравенство (45), и могут быть получены зависимости относительной погрешности измерения вектора смеще-

нии δu от угла γ . Семейство этих зависимостей для характерных значений $\Delta\gamma$ и δN показано на рис. 22 ($\Delta\gamma = 0,1^\circ; 0,5^\circ; 1^\circ$, а $\delta N = 1\%; 5\%; 10\%$).

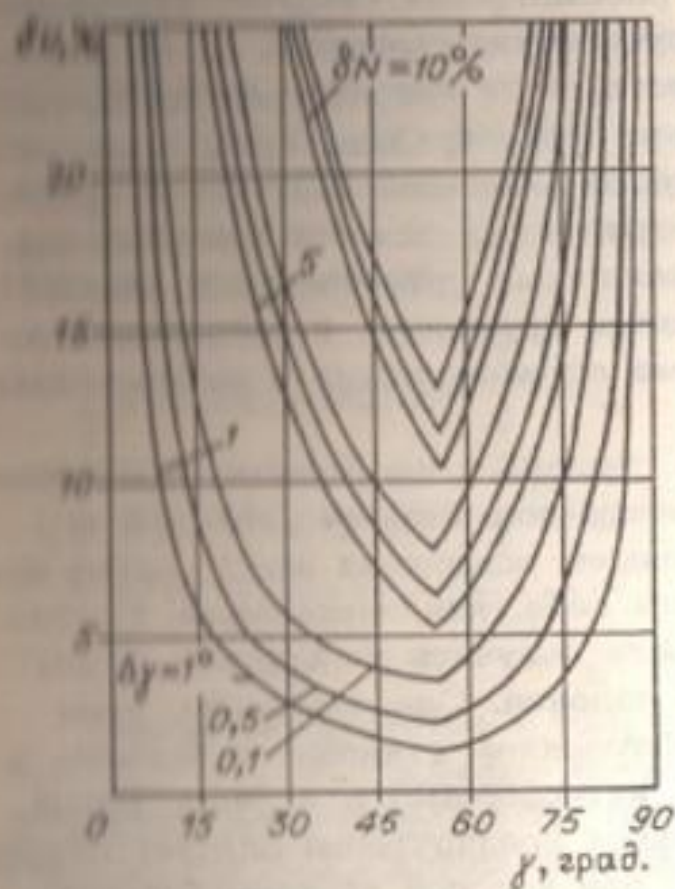


Рис. 22. Семейство зависимостей погрешности измерения смещения

Соотношение (45) и соответствующие ему графики (рис. 22) определяют взаимосвязь трех погрешностей δu , $\Delta\gamma$, δN и позволяют найти любую из них при двух других заданных.

Повторим, что значение δu является максимальной оценкой погрешности измерения вектора смещения. Оценка точности голографического интерферометра по максимальной погрешности удобна при общем подходе к анализу погрешности измерения. Она позволяет установить характерные особенности интерферометров как измерительных приборов, исследовать зависимости погрешности измерения от параметров интерферометра и от измеряемых величин. Однако в различных конкретных случаях не исключено, что погрешность может быть существенно меньше максимального значения, поэтому целесообразно ана-

Погрешность измерения, как видно из графиков, мало зависит от неточности отсчета угла $\Delta\gamma$ и в основном определяется неточностью отсчета числа полос. Уменьшение погрешности отсчета полос практически имеет смысл до значений δN , примерно равных δA . Например, при $\Delta\gamma = 1^\circ$ ($0,017$ рад) целесообразно, чтобы $\delta N \approx 1-2\%$. Какой при этом должна быть точность отсчета каждого числа полос ΔN_i , зависит от значений N_i , где $i = 1, 2, 3$.

В результате решения системы уравнений (62) находим значения проекций вектора смещения \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} . Естественно, что точность результатов тем выше, чем больше число n . Вопрос о необходимом числе уравнений n в переопределенной системе (60) решается в зависимости от допустимой погрешности измерения. По существу, он сводится к нахождению некоторого минимального числа направлений наблюдения, при котором разброс результатов находился бы в пределах допустимой погрешности измерения. Эта задача обычно решается в процессе расшифровки голографических интерферограмм.

Г л а в а 3

АЛГОРИТМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕГО АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Анализ методов получения и расшифровки голографических интерферограмм, проведенный во второй главе, показал, что голографический измерительный эксперимент содержит большой объем вычислительных операций. Для их выполнения естественно стремление использовать ЭВМ. Это приводит к созданию комплексных систем, включающих в себя 1) голографический интерферометр, преобразующий поле измеряемых величин в поле яркости интерференционной картины; 2) устройство ввода информации в ЭВМ, осуществляющее аналоговое преобразование поля яркости в электрические сигналы, а затем аналого-цифровое преобразование; 3) собственно ЭВМ с программным обеспечением обработки и расшифровки интерферограмм; 4) устройство вывода измерительной информации, представляющее результаты измерения в удобном для экспериментатора виде. Такие системы получили название голографических измерительных систем.

Проанализируем алгоритм голографического измерительного эксперимента, под которым понимается последовательность действий, приводящих к достижению поставленной цели — получению значений измеряемых величин. Как и прежде, ограничимся рассмотрением измерения полей смещений точек поверхности объекта.

Голографический измерительный эксперимент начинается с постановки задачи, при которой обсуждаются априорные данные. К ним относятся свойства исследуемого объекта: габариты; рельеф поверхности; оптические

характеристики, определяющие пропускание, поглощение, рассеяние световых волн. Важную роль играют условия эксперимента, натурные или лабораторные, а также оптические свойства окружающей среды, температура, вид нагрузки и особенности нагружающих устройств. Наконец, практически всегда есть изначальное представление о характере поля смещений, о распределении направлений векторов и примерном диапазоне значений их модулей. Постановка задачи предполагает также формулировку требований к метрологическим характеристикам аппаратуры, в первую очередь, к точности измерений.

Обсуждение перечисленных априорных данных завершается ответом на вопрос, имеет ли смысл для решения поставленной задачи использовать методы голографической интерферометрии. Может быть, более целесообразно воспользоваться тензометрией, муаровыми или поляризационно-оптическими методами. Необходимо непредвзятое сравнение существующих методов между собой и обоснованный выбор наиболее подходящего.

Нас, естественно, интересует случай, когда голографический измерительный эксперимент единственно возможен или лучше других отвечает требованиям задачи.

На следующем этапе выбирается метод получения интерференционных полос — в реальном времени, двумя экспозициями, усреднением или другие — и определяется схема интерферометра — одноголограммная или многоголограммная — с вытекающими из нее особенностями расшифровки интерферограмм.

Геометрия схем голографических интерферометров зависит как от исследуемых объектов, их светорассеивающих свойств, размеров, формы, характера движения, так и от типов голограмм, которые могут быть получены в эксперименте.

Наибольшее распространение в технических приложениях получила схема голографирования с наклонным опорным пучком (рис. 23). Луч лазера светоделительной пластиной 1 разделяется на два луча. Из одного с помощью оптической системы 2 и зеркала 3 формируется опорная волна, а из другого — зеркалом 4 и оптической системой 5 — создается волна, освещающая объект 6. Интерферен-

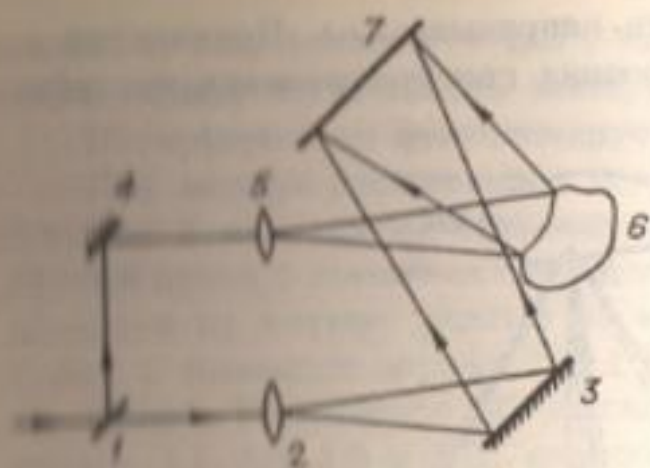


Рис. 23. Одноголограммный интерферометр

могут представлять собой линзы, микрообъективы, коллиматоры. Светоделительная пластинка 1 должна обеспечивать различный, желательного регулируемый коэффициент деления. Схема позволяет реализовать все методы голографической интерферометрии.

Естественно, что схемы голографических интерферометров усложняются, если необходимо получать две и более интерферограммы с различных направлений. Принципиально ситуация казалось бы не меняется. Отдельные голограммы всегда можно рассматривать как части одной большой голограммы, представляющей собой сферу с объектом в центре. Требуется только сформировать достаточно большой фронт опорной волны, и диаграмма рассеяния объектной волны также должна быть достаточно широкой. Однако практически такие возможности ограничены, особенно при необходимости освещения и наблюдения под малыми углами к поверхности объекта. Здесь приходится учитывать и наличие существенной зеркальной составляющей в рассеянной волне, и падение чувствительности при большом угле между направлениями освещения и наблюдения.

Как показано в предыдущей главе, в общем случае необходимо получать четыре интерферограммы. Схема интерферометра становится довольно громоздкой, и приобретает серьезное значение возможное ее упрощение и сокращение числа составляющих ее элементов. Получать каждую из четырех голограмм независимо друг от дру-

ция опорной и объектной волн регистрируется голограммой 7.

Одним из достоинств схемы является примерное равенство оптических путей опорной и объектной волн, что позволяет использовать источники с малой длиной когерентности. Оптические системы 2 и 5

га становится практически неприемлемым. Приходится искать другие пути построения голографических интерферометров.

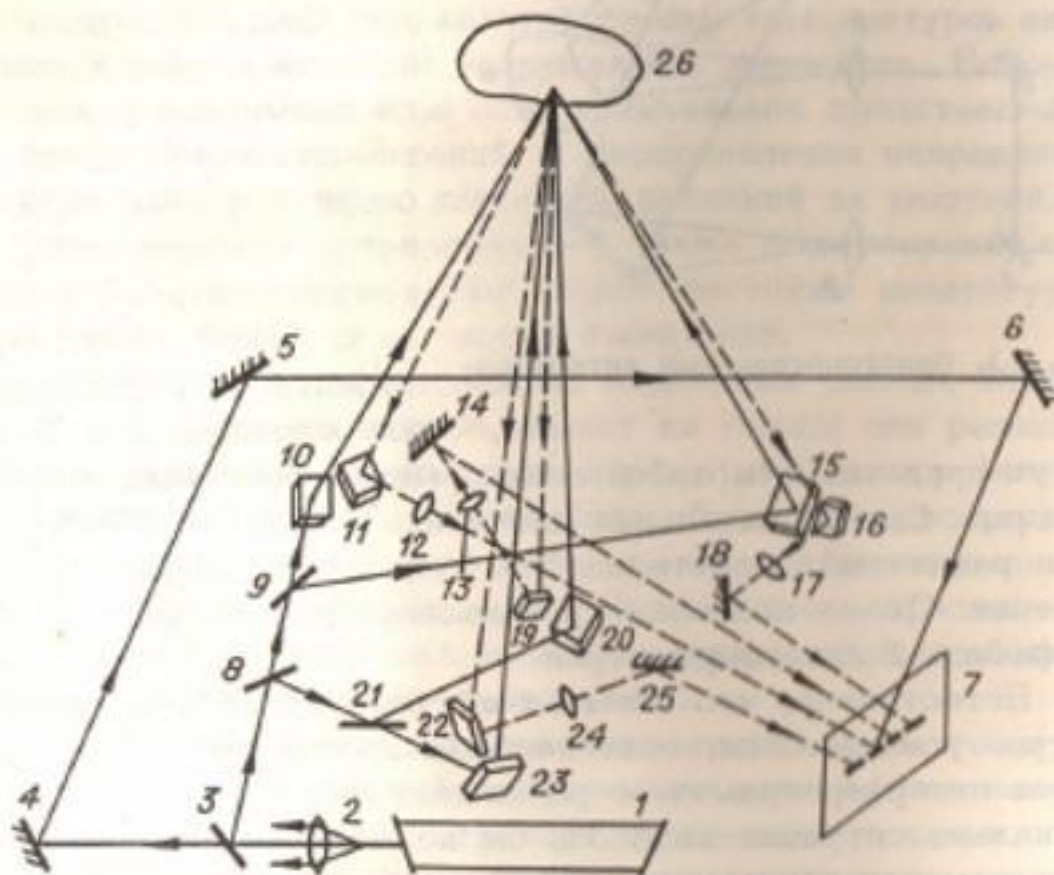


Рис. 24. Четырехголограммный интерферометр

На рис. 24 показана схема четырехголограммного интерферометра. Все оптические элементы, входящие в него, находятся в одной плоскости на голографическом столе, а исследуемый объект располагается над поверхностью стола в вершине равносторонней пирамиды. Основание пирамиды – равносторонний треугольник, на вершинах и в центре которого установлены зеркала, задающие направления освещения и наблюдения. Изменяя высоту, на которой расположен объект, можно изменять одновременно все три боковых направления освещения и наблюдения, сохраняя при этом направление по нормали к поверхности объекта неизменным. Угол между боковым и нормальным направлением может быть установлен равным опти-

мальному значению $\gamma \approx 55^\circ$, при котором получается минимальной погрешность измерения.

Интерферометр функционирует следующим образом.

Луч лазера расширяется коллиматором 2 и светоделителем 3 делится на опорный и объектный пучки. Объектный пучок с помощью светоделителей 8,9 и 21 распределяется на четыре равных по интенсивности пучка, которые с помощью зеркал 10,15,20 и 23 направляются на объект. Рассеянное объектом излучение с помощью зеркал 11,16,19 и 22, определяющих направления наблюдения, объективов 12,13,17 и 24, строящих изображения объекта, и вспомогательных зеркал 14,18 и 25 попадает на фотопластинку 7, на которой записываются четыре голограммы квазисфокусированных изображений.

Пространственное разделение голограмм осуществляется благодаря ограниченным размерам квазисфокусированных изображений. Поэтому оказалось возможным записывать все четыре голограммы на одну фотопластинку. Голографирование квазисфокусированных изображений позволяет также увеличить интенсивность объектной волны, попадающей на голограмму, что важно при значительном расстоянии от объекта до голограммы.

Оптические пути от светоделителя 3 до объекта 26 для разных направлений освещения выбраны так, что между собой они отличаются на величину большую, чем длина когерентности лазера. Суммарные же оптические пути светоделитель 3 - объект 26 - фотопластинка 7 равны между собой и совпадают с длиной пути опорного пучка, сформированного зеркалами 4,5,6. Это сделано для того, чтобы записывались голограммы для совпадающих направлений освещения и наблюдения, а другие объектные пучки не интерферировали с опорной волной.

Реализация такого четырехголограммного интерферометра требует немалого экспериментаторского искусства.

Голографический интерферометр включает в себя лазер, большое число механических подставок с регулировками, осуществляющими повороты и перемещения различных оптических элементов, и материал для регистрации голограммы.

Идеальный лазер для голографии должен излучать строго одну длину волны достаточно большой мощности. Тогда световые волны в любых точках пространства когерентны между собой и, будучи наложенными друг на друга, дают четкую интерференционную картину. Реальный лазер имеет ограниченный объем когерентности, а это, в свою очередь, накладывает ограничения на размеры голографируемых объектов, которые не могут выходить за объем когерентности. Мощность излучения также ограничивает размеры исследуемых объектов. На первый взгляд может показаться, что величина мощности не имеет значения. Все решает энергия, а ее можно увеличить за счет времени экспозиции. Однако практически время экспозиции не может быть выбрано достаточно большим из-за механических нестабильностей, тепловых потоков и других подобных причин. Обычно оно не превышает десятков секунд. В этой ситуации возможности голографического эксперимента зависят от мощности лазера и чувствительности регистрирующей среды.

Экспозиция, представляющая собой плотность энергии на голограмме

$$E = \frac{kP\tau}{S}, \quad (63)$$

где k - коэффициент передачи энергии от лазера к голограмме; P - мощность излучения; τ - время экспозиции; S - площадь голограммы.

Выбор лазеров, удовлетворяющих требованиям голографического измерительного эксперимента, пока весьма ограничен. Наибольшее распространение в практических исследованиях получил гелий-неоновый лазер, излучающий волну $\lambda = 0,63$ мкм, мощность которой 50 мВт, а длина когерентности 0,2 м. С помощью такого лазера можно исследовать небольшие по размерам объекты с хорошо отражающими поверхностями. Существенно большие возможности заложены в использовании ионных газовых лазеров. Например, аргонный лазер, разработанный в НЭТИ, излучает в одной линии $\lambda = 0,51$ мкм до 5 Вт при длине когерентности 2 м. Однако серийные аргонные лазеры имеют, к сожалению, существенно

худшие параметры. Они используются в других целях, а для голографической интерферометрии непригодны.

Выражение (63) позволяет привести в соответствие мощность излучения лазера и чувствительность регистрирующей среды.

Коэффициент k для диффузно рассеивающих объектов составляет единицы процентов. Его нетрудно определить для каждой конкретной схемы голографирования. Пусть $k = 5\%$, $P = 50$ мВт (мощность гелий-неонового лазера ЛГ-38), $\tau = 10$ с, $S \approx 100$ см² (стандартная пластинка 9x12 см). Тогда $E = 2,5$ Дж/м².

В качестве регистрирующего материала чаще всего используется галлойдосеребряная эмульсия. Все другие, "необычные" среды имеют пока существенно меньшую чувствительность, однако они постоянно совершенствуются, поскольку применение обычных фотоэмульсий ограничено из-за трудоемкости химической обработки и необратимости записи. Оптимальная экспозиция для галлойдосеребряных материалов лежит в пределах $E_0 = 0,1 - 10$ Дж/м². Сравнивая E и E_0 , приходим к выводу, что высокоразрешающие эмульсии, имеющие низкую чувствительность ($E_0 > 2,5$ Дж/м²), не могут быть использованы для записи голограмм в рассматриваемом случае. Более чувствительные эмульсии годятся для этой цели, если окажется достаточной их разрешающая способность. Таким образом, можно выяснить пригодность лазера и материала для регистрации голограммы, если известен объект исследования.

Довольно жесткие требования предъявляются к механическим характеристикам голографической установки. За время экспонирования голограммы относительное смещение элементов схемы голографирования не должно приводить к существенному изменению интерференционной картины, записываемой на голограмму. Ширина полос на голограмме может составлять единицы микрометров. Это означает, что изменение разности хода опорной и объектной волн не должно превышать значений порядка 0,1 мкм. Поэтому интерферометр собирается на амортизированной плите с пазами и отверстиями для жесткого крепления механических подставок.

Ясно, что все эти ограничения, связанные с лазером, регистрирующей средой, голографической установкой, принимаются во внимание еще при постановке задачи и обсуждении априорных данных.

Итак, определены метод измерения и схема интерферометра, которая реализована на голографической установке, включающей лазер, оптические и механические элементы, регистрирующую среду, а также устройство крепления и нагружения исследуемого объекта.

Теперь необходимо решить вопрос о целесообразности использования ЭВМ в голографическом эксперименте. Нельзя, конечно, понимать так, что только после создания установки возникает этот вопрос. Однако по логике алгоритма именно следом за созданием голографического интерферометра появляется дилемма: человек или ЭВМ.

Природа позаботилась о создании весьма совершенных устройств восприятия и обработки оптической информации. Зрение человека характеризуется пределом различимости контраста, равным 0,5%, пределом углового разрешения $1' - 2'$, временем экспозиции или накопления 0,1-0,2 с. Диапазон освещенности, в котором работает глаз, составляет 10^{11} . Такие возможности глаза в совокупности с не менее уникальными способностями мозга обрабатывать информацию делают участие человека в расшифровке голографических интерферограмм вполне оправданным и достаточным во многих практических случаях.

Если число точек, в которых измеряются смещения, невелико, и система уравнений для определения смещений достаточно проста (одно-два уравнения), то экспериментатор подсчитывает по интерферограмме числа полос N_z , составляет уравнения, решает их (не исключено, что для решения используется ЭВМ) и оценивает точность получаемого результата.

Без настоящей необходимости вряд ли целесообразно полностью автоматизировать голографический измерительный эксперимент. Понятно, что эта настоящая необходимость возникает тогда, когда недостаточными оказываются точность и быстрдействие человека.

Поскольку вычислительная машина электронная, а интерферограмма есть двумерный оптический сигнал, то необходимо устройство ввода интерферограмм в ЭВМ, преобразующее оптическую информацию в последовательность электрических импульсов. Устройство ввода в общем случае может состоять из следующих друг за другом преобразователей: оптического, осуществляющего перенос, увеличение или формирование изображения; сканатора, обеспечивающего пространственную развертку; фотоэлектрического, выполняющего главную задачу — преобразование оптического сигнала в электрический; аналого-цифрового, представляющего электрический сигнал в двоичном коде. По линии связи закодированные уровни яркости интерференционной картины поступают в ЭВМ.

Существует довольно много различных типов устройств ввода изображений в ЭВМ. Ведь "электронное зрение" развивается давно в связи с созданием телевизионных систем, фототелеграфа, аппаратуры для обработки аэрокосмической информации. Выбор того или иного типа устройства ввода опять-таки определяется требованиями эксперимента.

В качестве примера рассмотрим два характерных устройства ввода. Одно — с электромеханическим сканированием и фотоэлектронным умножителем — обеспечивает большое число элементов разложения изображения, линейность развертки, равномерность чувствительности по полю изображения. Другое — с электронным сканированием на основе диссектора — уступает электромеханическому по всем перечисленным характеристикам, но имеет существенно более высокое быстродействие.

Схема электромеханического устройства ввода в режиме сканирования действительных изображений, восстановленных с голограмм, показана на рис. 25.

Опорная волна восстанавливает действительное изображение интерференционной картины с голограммы 1. Поворотным зеркалом 2 это изображение переносится в плоскость сканирования, где расположены фотоэлектронный преобразователь ФЭП с диафрагмой 3. Зеркало 2 может поворачиваться на 90° , и тогда изображение появляется на матовом стекле 4, что необходимо для наводки на резкость и визуального контроля. Элементы 1-4 и

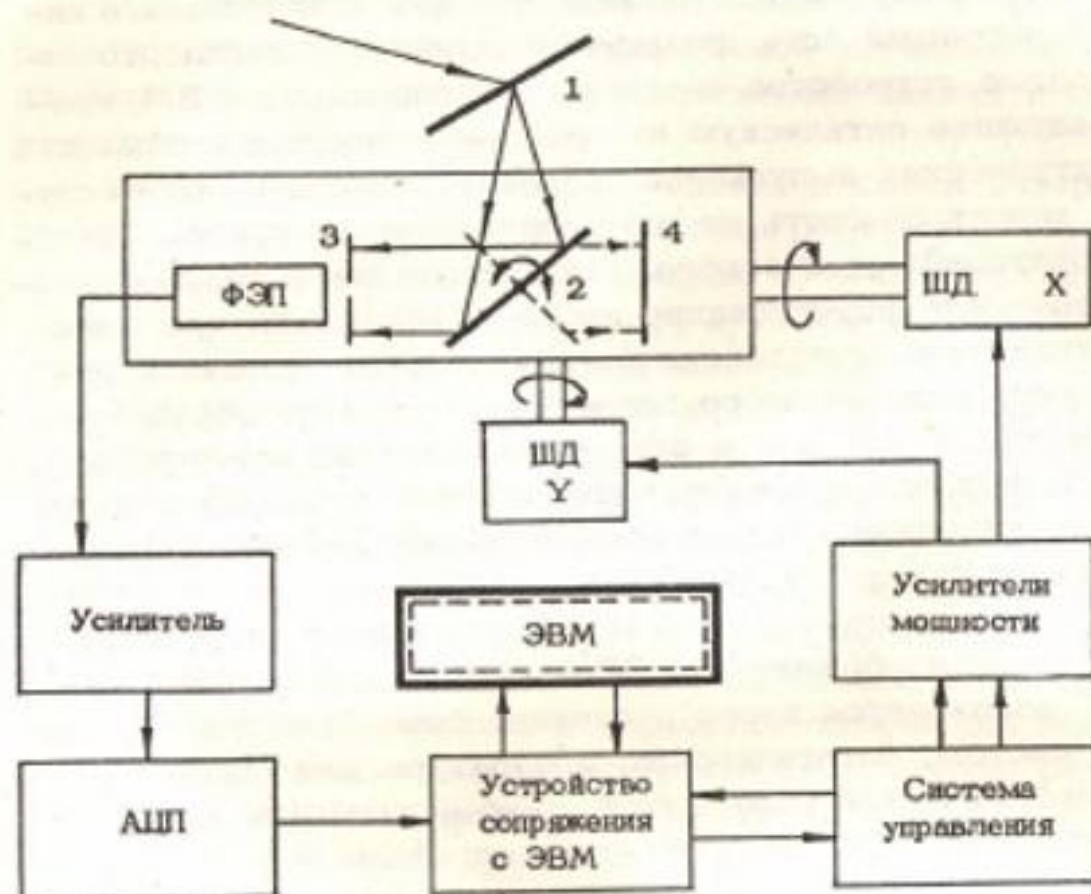


Рис. 25. Электромеханическое устройство ввода

ФЭП установлены на двухкоординатном столе. Шаговые электродвигатели с цифровым управлением ШД X и ШД Y перемещают стол, обеспечивая сканирование интерферограммы по координатам x и y . Электрический сигнал с фотоэлектронного преобразователя после усиления и аналого-цифрового преобразования поступает в ЭВМ. ЭВМ через систему управления задает режим сканирования интерферограммы.

Такое устройство ввода, разработанное и используемое в НЭТИ, имеет следующие технические характеристики: размер сканирующего поля $62,5 \times 62,5$ мм; максимальное число элементов разложения по строке и по кадру $10^4 \times 10^4$; минимальный шаг сканирования $6,25$ мкм; быстродействие - до 300 точек в секунду.

В другом устройстве ввода, как отмечалось, используется диссектор – телевизионная трубка мгновенного действия, которая одновременно осуществляет и преобразование, и сканирование интерферограммы. По существу, диссектор представляет собой электронно–оптический преобразователь и фотоэлектронный умножитель в одной трубке. Восстановленная с голограммы интерференционная картина фокусируется на фотокатод диссектора. За счет внешнего фотоэффекта катод эмитирует поток электронов, плотность которого соответствует распределению яркости интерферограммы. Магнитная отклоняющая система перемещает “электронное” изображение относительно неподвижной вырезающей диафрагмы, за которой следует фотоэлектронный умножитель для усиления сигнала. Таким образом происходит сканирование интерферограммы.



Рис. 26. Устройство ввода на диссекторе

Блок–схема устройства ввода на диссекторе показана на рис. 26. Это устройство, как и электромеханическое, разработано и применяется в НЭТИ. Оно имеет такие технические характеристики: размер рабочей поверхности фотокатода 18 x 18 мм; максимальное число элементов разложения по строке и по кадру $2^8 \times 2^8$; диаметр считывающей апертуры 50 мкм; время вывода в произвольную координату – не более 70 мкс.

Сравнивая технические данные обоих устройств, можно заключить, что число элементов разложения в электро-механическом устройстве примерно на три порядка больше, чем в электронном, но при этом быстродействие на два-три порядка меньше.

Из устройства ввода численные значения поля яркости поступают в ЭВМ и записываются в память машины. Кроме этого, в память заносятся координаты точек, в которых определена яркость, геометрические параметры интерферометра a_{ij} и цена полосы $\lambda/2\cos\frac{\varphi}{2}$.

Какие функции возлагаются на ЭВМ?

Первая и очень непростая — определение чисел полос N_i для каждой заданной точки поверхности. ЭВМ должна "понимать", что такое полоса и доля полосы, находить изменение яркости между заданными точками, выделять сигнал на фоне шумов. Шумы голографических интерферограмм могут быть весьма значительными, так как голографические изображения имеют резкоконтрастную зернистую структуру, так называемый спекл-шум. Поэтому ЭВМ должна обеспечивать возможность использования методов усреднения и фильтрации для увеличения отношения сигнал/шум.

После определения чисел полос ЭВМ для каждой точки решает систему линейных алгебраических уравнений, определяет устойчивость решений и точность полученных результатов. Если точность оказывается недостаточной, определяются дополнительно числа полос, например, с других направлений наблюдения, составляется переопределенная система уравнений и используется метод наименьших квадратов для вычисления более достоверных значений измеренных величин.

В завершение ЭВМ должна представить результаты в удобном для экспериментатора виде. Чаще всего это таблицы измеренных значений или графики. Для представления информации используются дисплеи, в которых на экран электроннолучевой трубки выводятся алфавитные, цифровые и специальные символы (алфавитно-цифровой дисплей) или еще и графические изображения (графический дисплей). Современные дисплеи позволяют выводить на экран таблицы или страницы текста, состоящие из

(20-40) x (50-80) символов или вычерчивать на экране линии со скоростью 5-10 мм/мкс. Дисплеи служат не только для вывода информации, но и для обмена данными с ЭВМ. Они снабжены клавиатурой, с помощью которой осуществляется диалог "человек - ЭВМ". Общение с машиной необходимо для анализа промежуточных результатов, своевременного обнаружения ошибок и их устранения. Удобным средством общения с машиной является световое перо, позволяющее корректировать программы, исправлять тексты, вычерчивать или убирать линии на экране.

Однако при всех своих достоинствах экранные дисплеи не дают возможности сохранить полученные результаты в виде печатной копии или изображенных на бумаге графиков, что важно для измерительного эксперимента. Поэтому измерительные системы, кроме дисплеев, комплектуются еще быстродействующими печатающими устройствами и графопостроителями.

Таким образом, на ЭВМ выпадает довольно большой объем работы. Для ее выполнения она должна иметь развитую операционную систему, совершенные периферийные устройства, большой объем памяти, дополнительное программное обеспечение, связанное со спецификой решаемой задачи.

Наиболее подходящими для голографического измерительного эксперимента являются миниЭВМ или те микроЭВМ, которые близки к ним по возможностям. В настоящее время для автоматизации экспериментальных исследований широко используется система малых ЭВМ (СМ ЭВМ). Она включает в себя ряд базовых процессоров, обеспечивающих обработку данных со скоростью 130-210 тысяч операций в секунду; запоминающие устройства различной емкости и быстродействия, позволяющие расширять память до необходимого объема; периферийные устройства ввода, вывода и отображения символьной и графической информации.

При создании измерительно-вычислительных комплексов, в том числе таких, как голографические измерительные системы, необходимо обеспечить информационную, энергетическую и конструктивную совместимость большого числа различных устройств. В этом случае, используя уже готовые наборы таких устройств и разработанное

программное обеспечение, можно легко и быстро создавать комплексы, предназначенные для решения конкретных задач. Например, магистрально-модульная система КАМАК (аббревиатура от английских слов: ЭВМ и аппаратура для измерения, автоматизации и контроля) содержит постоянно пополняющийся набор функциональных модулей, обмен информацией между которыми и их связь с ЭВМ осуществляется с помощью специальных управляющих модулей — контроллеров. Использование готовых модулей и разработка новых в стандарте КАМАК способствует значительному сокращению сроков создания голографических измерительных систем или расширению их возможностей без существенных затрат.

На рис. 27 показана структурная схема разработанной в НЭТИ универсальной голографической измерительной системы на базе миниЭВМ СМ-4. Многие вопросы построения таких систем рассмотрены в [12, 13].

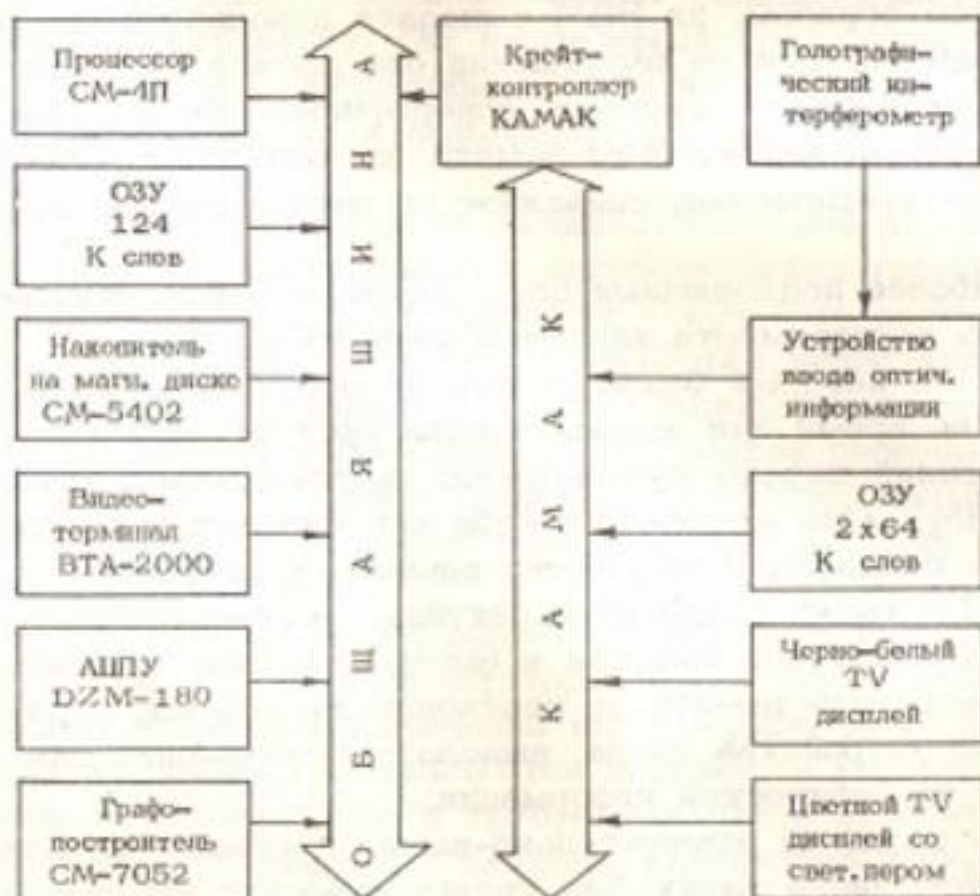
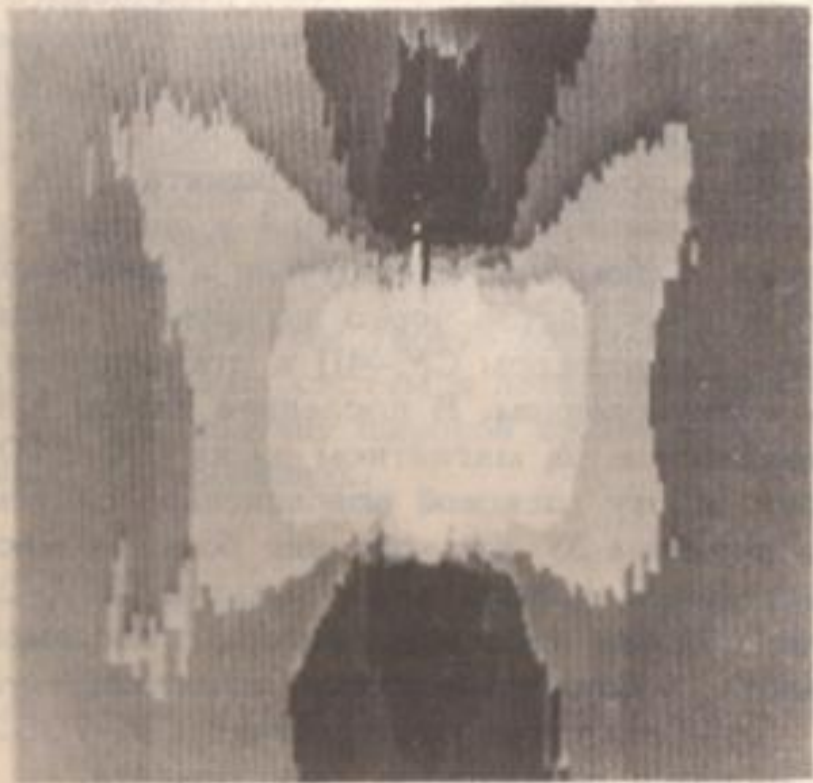


Рис. 27. Голографическая измерительная система



a)



b)

Рис. 28. Изображение поля деформации пластины на экране дисплея

Кроме упомянутых ранее голографического интерферометра и устройства ввода оптической информации, система содержит выполненные в стандарте КАМАК оперативное запоминающее устройство (ОЗУ 2 x 64 К слов), расширяющее объем оперативной памяти ЭВМ, и два телевизионных дисплея: черно-белый и цветной со световым пером. С помощью магистрали и крейт-контроллера КАМАК эти устройства через интерфейс "Общая шина" связаны с процессором СМ-4П и стандартным периферийным оборудованием. В последнее входят ОЗУ 124 К слов; накопитель на магнитном диске СМ-5402, обеспечивающий работу дисковой операционной системы и являющийся внешним ЗУ для хранения больших массивов экспериментальных данных; видеотерминал ВТА-2000 как средство общения экспериментатора с системой в режиме диалога; алфавитно-цифровое печатающее устройство АЦПУ DZM-180 и графопостроитель СМ-7052 для документирования результатов эксперимента.

Рис. 28 представляет собой фотографии с экрана дисплея. Одна фотография (рис. 28,а) показывает результаты расшифровки голографической интерферограммы, полученной при растяжении пластинки с отверстием. Области равного уровня яркости соответствуют определенным уровням деформаций в направлении растяжения. На рис. 28,б показано аналогичное поле деформаций, рассчитанное теоретически вблизи отверстия.

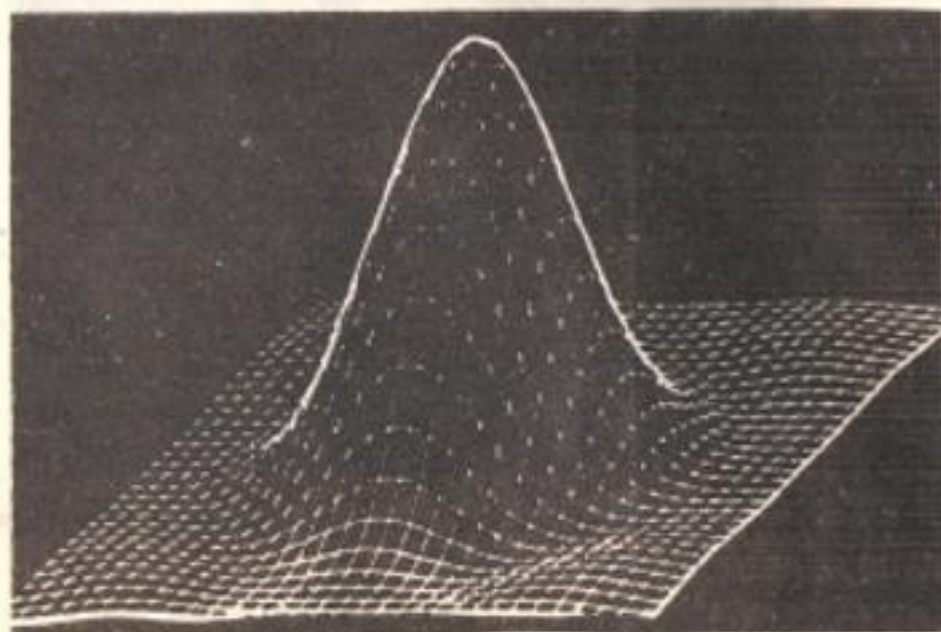


Рис. 29. Изображение прогиба мембраны на экране дисплея

На рис. 29 представлено полученное на экране дисплея по голографической интерферограмме пространственное изображение прогиба мембраны. Значения смещений могут быть выведены на экран в виде таблиц для заданных точек поверхности или в виде графических зависимостей для выбранных сечений объекта.

Результаты экспериментов (рис. 28, 29) свидетельствуют о достаточно высоком уровне создаваемых голографических измерительных систем и позволяют надеяться, что такие системы получат широкое применение в экспериментальных исследованиях.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. КОЛЬЕР Р., БЕРКХАРТ К., ЛИН Л. Оптическая голография/Пер. с англ.: Под ред. Ю.И.Островского. - М.: 1973. - 688 с.
2. ОСТРОВСКИЙ Ю.И. Голография и ее применение. - Л.: Наука, 1973. - 180 с.
3. СОРОКО Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. - М.: Наука, 1971. - 616 с.
4. ДЕ ВЕЛИС Д., РЕЙНОЛЬДС Д. Голография/Пер. с англ.: Под ред. И.А.Никольского. - М.: Воениздат, 1970. - 248 с.
5. ФРАНСОН М. Голография/Пер. с франц. - Под ред. Ю.И.Островского. - М.: Мир, 1972. - 248 с.
6. ВЬЕНО Ж.-Ш., СМИГИЛЬСКИЙ П., РУАЙС А. Оптическая голография. Развитие и применение/Пер. с франц.: Под ред. Ю.Н.Денисюка. - М.: Мир, 1973. - 212 с.
7. Оптическая голография: в 2-х томах/Под ред. Г.Колфилда. Пер. с англ.: Под ред. С.Б.Гуревича. - М.: Мир, 1982. 735 с.
8. МИЛЕР М. Голография/Пер. с чеш.: Под ред. В.И.Суханова. - Л.: Машиностроение, 1979. - 207 с.
9. БАТЕРС Д. Голография и ее применение/Пер. с англ.: Под ред. Е.П.Андреева-Андриевского. - М.: Энергия, 1977. - 224 с.
10. ОСТРОВСКИЙ Ю.И., БУТУСОВ М.М., ОСТРОВСКАЯ Г.В. Голографическая интерферометрия. - М.: Наука, 1977. - 336 с.
11. ВЕСТ Ч. Голографическая интерферометрия/Пер. с англ.: Под ред. Ю.И.Островского. - М.: Мир, 1982. - 256 с.
12. КОЗАЧОК А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике. - М.: Машиностроение, 1984. - 175 с.
13. Голографические измерительные системы/Под ред. А.Г.Козачка: Новосиб.электротехн.ин-т. - Новосибирск, 1976, вып. 1: 1978, вып. 2: 1980, вып.3.
14. ГИНЗБУРГ В.М., СТЕПАНОВ Б.М. Голографические измерения. - М.: Радио и связь, 1981. - 296 с.

15. Голография – методы и аппаратура/Под ред. В.М.Гинзбург, Б.М.Степанова. – М.: Сов. радио, 1974. – 376 с.
16. Оптическая голография – практические применения/Под ред. В.М.Гинзбург, Б.М.Степанова. – М.: Сов. радио, 1978. – 240 с.
17. Голографические неразрушающие исследования/Под ред. Р.Эрфа. Пер. с англ.: Под ред. В.А.Карасева. – М.: Машиностроение, 1979. – 448 с.
18. Голографическая интерферометрия фазовых объектов/Под ред. Г.И.Мшнина. – Л.: Наука, 1979. – 232 с.
19. КУДРИН А.Б., ПОЛУХИН П.И., ЧИЧЕНЕВ Н.А. Голография и деформация металлов. – М.: Metallургия, 1982. – 151 с.
20. ШУМАН В., ДЮБА М. Анализ деформаций непрозрачных объектов методом голографической интерферометрии/Пер. с англ.: Под ред. М.М.Бутусова, Ю.И.Островского. – Л.: Машиностроение, 1983. – 190 с.
21. Лазерные измерительные системы/Под ред. Д.П.Лукьянова. – М.: Радио и связь, 1981. – 456 с.
22. Справочник по специальным функциям/Под ред. М.А.Абрамовица и И.Стиган: Пер. с англ.: Под ред. В.А.Диткина и Л.Н.Кармазиной. – М.: Наука, 1979. – 831 с.
23. БЕКЛЕМИШЕВ Д.В. Дополнительные главы линейной алгебры. – М.: Наука, 1983. – 336 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1.	Двухвековая история интерферометрии с этюдами об ученых.....	5
Глава 2.	Голографические методы получения интерференционных полос.....	18
1.	Голография. Виды голограмм и их свойства.....	18
2.	Метод "живых" полос.....	23
3.	Метод двух экспозиций.....	27
4.	Метод усреднения.....	37
5.	Оценка точности измерения смещений голографическим интерферометром.....	45
Глава 3.	Алгоритм голографического измерительного эксперимента и возможность его автоматической реализации в голографических измерительных системах.....	
Л и т е р а т у р а.....		

Аркадий Григорьевич Козачок
Юрий Наумович Солодкин

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Темплан 1985 г., поз. 121

Редактор Л. А. Вайсер
Художник В. И. Шумаков
Технический редактор Т. К. Овчинникова

Сдано в набор 26.11.85 г. Подписано в печать
10.07.85 г. ИИ 03504. Формат 84x108/32
Усл. п. л. 5,0. Уч. изд. л. 5,0. Тираж 300 экз.
Заказ № 557. Цена 70 коп.

Институт теплофизики СО АН СССР
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1