

ЗНАНИЕ

НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

СЕРИЯ
ФИЗИКА

Л. Д. Бахрах
Г. А. Гаврилов
ГОЛОГРАФИЯ

6'79



Л. Д. Бахрах
НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

Серия
«Физика»,
№ 6, 1979 г.

Издается
ежемесячно
с 1946 г.

Л. Д. Бахрах,
член-корреспондент АН СССР

Г. А. Гаврилов,
кандидат физико-математических наук

ГОЛОГРАФИЯ

Издательство
«Знание»
Москва
1979

22.343.4
Б30

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Введение	3
Основные принципы голографии	5
Изобразительная голография	11
Голографическое кино	14
Исследование быстропротекающих процессов	18
Получение трехмерных изображений из плоских	21
Голографическая интерферометрия	22
Голографические оптические элементы	33
Динамическая голография	37
Оптическая обработка информации	39
Акустическая голография	51
Радиоголография	55
Цифровая голография	61
Регистрирующие среды для голографии	63
Литература	64

Бахрах Л. Д. и Гаврилов Г. А.

Б30 Голография. М., «Знание», 1979.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Физика», 6. Издается ежемесячно с 1946 г.)

Авторы рассказывают о последних достижениях в одной из самых молодых областей физики — голографии, об использовании ее методов в народном хозяйстве и научных исследованиях. Рассматриваются также некоторые перспективы развития голографии, в частности, одного из ее направлений, радиоголографии.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

20400

22.343.4

© Издательство «Знание», 1979 г.

ВВЕДЕНИЕ

Идея голографического метода записи волновых полей была высказана английским ученым Д. Габором в 1948 г. Голография рассматривалась Габором как средство улучшения разрешения в электронном микроскопе за счет устранения сферической аберрации электронных линз. Несмотря на то что ему не удалось достичь поставленной цели, он создал основы метода и смог получить восстановленные изображения с голограмм в видимом свете. В то время считалось, что голография представляет интерес в основном для оптиков, и она не привлекла широкого внимания специалистов других областей науки и техники. Более того, в дальнейшем технические трудности, среди которых одна из главных заключалась в отсутствии мощных когерентных источников света, привели к почти полному прекращению работ по голографии.

В Советском Союзе первые работы по голографии были выполнены Ю. Н. Денисюком, сотрудником Государственного оптического института им. С. И. Вавилова, в период с 1958 по 1962 г. Денисюк предложил наиболее общий метод голографической записи волновых полей в трехмерных средах, который позволяет восстанавливать не только сам волновой фронт, но и частоту колебаний, т. е. спектр излучения.

Отношение к голографии резко изменилось в начале 60-х годов, чему способствовали два обстоятельства. К этому времени были созданы лазерные источники света, мощность и когерентность излучения которых позволили приступить к практической реализации голографического метода. В 1962 г. американские исследователи Э. Лейт и Ю. Упатниекс получили первые высококачественные лазерные голограммы трехмерных объектов и опубликовали ряд статей, в которых давался

новый подход к голографии, основанный на методах теории связи. Эти работы вызвали очень большой резонанс и явились толчком, вызвавшим большой и длительный интерес, который не ослабевает и в настоящее время.

За прошедшие годы голография сформировалась в самостоятельное научное направление, имеющее большое число самых разнообразных практических приложений. Что же послужило питательной средой, позволившей голографии за короткий промежуток времени получить столь стремительное развитие? Этому способствовал широкий размах совместных исследований специалистов, работающих в разных областях науки и техники: физике, химии, оптике, электронике, радиотехнике и др. Но, безусловно, самым сильным стимулом явились потребности практики. А голография открыла перспективы решения задач, которые не могут быть решены никакими другими известными способами, или же позволила получить необходимые результаты более просто и эффективно, чем иными путями.

Однако, как часто бывало в истории науки и ранее, с развитием нового направления связывали надежды на решение большего числа задач, чем допускают возможности метода и уровень развития техники. Казалось близким создание истинно объемного и цветного кино и телевидения, ожидался переворот в сфере запоминающих устройств вычислительной техники, появились надежды на решение проблемы распознавания образов, обсуждались перспективы создания универсальной вычислительной машины и т. п. Оценка реальных возможностей голографии потребовала известного времени. Усилиями ученых ряд задач был доведен до практической реализации, была показана преждевременность или же бесперспективность ряда ранних проектов. В то же время продолжают исследования в тех областях голографии, в которых сохраняется надежда на успех. В последние годы возникли и новые перспективные направления, требующие развития и практической проверки.

Именно с этих позиций в данной брошюре дается обзор основных направлений голографии и ее применений. Прежде чем приступить к рассмотрению отдельных вопросов, полезно будет очень кратко рассмотреть физические основы голографического метода.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ГОЛОГРАФИИ

Голографию можно определить как метод записи, восстановления и преобразования волновых фронтов. Волновой фронт характеризуется амплитудой, фазой, частотой колебаний и поляризациями. Голографический метод в принципе позволяет оперировать всеми перечисленными параметрами и тем самым оправдывает данное ему название. «Голограмма» означает полная запись информации (от греческого слова *holos* — целый).

В частных случаях нет необходимости регистрировать все параметры волнового фронта. Так, в случае монохроматической волны бывает достаточно информации об амплитудном и фазовом распределении в некоторой области пространства. Возможность записи фазы волнового фронта является важнейшим моментом голографического метода. В оптическом и более коротковолновых диапазонах волн запись информации о фазе колебаний является наиболее трудной задачей, так как детекторы не успевают следить за высокочастотными колебаниями и регистрируют только интенсивность излучения (квадрат амплитуды).

Чтобы преодолеть эту трудность, Габор обратился к интерферометрическому принципу. Он предложил к представляющему интерес волновому фронту добавить когерентную ему волну, называемую опорной, и регистрировать образующуюся при этом интерференционную картину. Зарегистрированная на фотопластинке или любом другом материале картина интерференции волновых фронтов называется голограммой. Схема записи голограммы трехмерного рассеивающего свет объекта приведена на рис. 1, а. Комплексная амплитуда волны, рассеянной объектом (или прошедшей через него), в плоскости фотопластинки записывается в виде: $U_o(x, y) = U_o(x, y) \exp [j\varphi(x, y)]$, где U_o и φ есть амплитуда и фаза волнового фронта. Опорную волну в той же плоскости обозначим $U_r(x, y)$. Фотопластинка регистрирует интенсивность света:

$$I(x, y) = |U_o + U_r|^2 = |U_o|^2 + |U_r|^2 + U_r U_o^* + U_o U_r^*$$

где * обозначает комплексно-сопряженную величину. Видно, это последний член в выражении содержит U_o ,

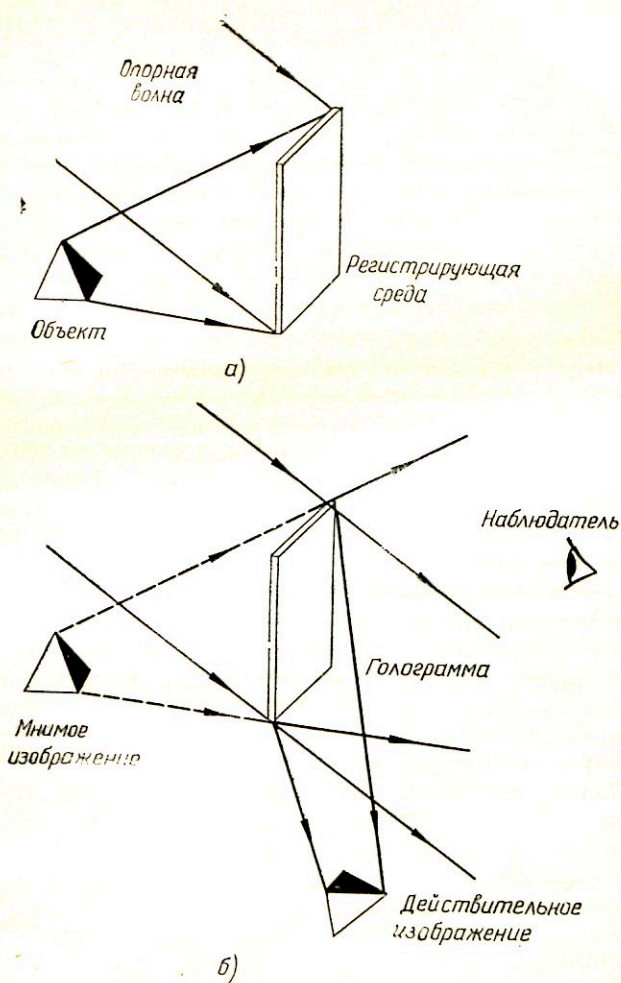


Рис. 1. Получение голографического изображения
 а — схема записи голограммы;
 б — схема восстановления изображения

т. е. информацию об объектной волне. Задача состоит в выделении этой информации.

Запись голограммы является первым этапом голографического процесса. Второй этап заключается в восстановлении волнового фронта. Предположим, что экспозиция фотопластинки и условия ее фотохимической

обработки осуществлены таким образом, что ее амплитудный коэффициент пропускания $t(x, y)$ (отношение амплитуды прошедшей волны к амплитуде падающей) пропорционален интенсивности света $t \equiv I$. Тогда, осветив голограмму восстанавливающей волной, которая является точной копией опорной волны U_r , непосредственно за голограммой получим поле:

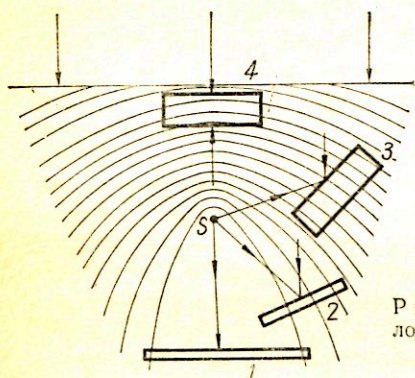
$$U(x, y) = U_r I(x, y) = U_r |U_o|^2 + U_r |U_r|^2 + U_r^2 U_o^* + |U_r|^2 U_o.$$

Обычно интенсивность опорной волны $|U_r|^2$ выбирается постоянной. Следовательно, последний член в этом выражении является не чем иным, как восстановленной волной объекта.

Заслуга Лейта и Упатникса состоит в том, что они предложили опорную волну направлять на регистрирующую волну под некоторым углом. Благодаря этому четыре волны, соответствующие четырем слагаемым в последнем выражении, разделяются в пространстве.

Схема восстановления изображения приведена на рис. 1, б. Первым двум слагаемым соответствует волна, прошедшая через голограмму без дифракции. Третий член ответствен за восстановление действительного изображения объекта. Оно фокусируется в пространстве и может наблюдаться на экране, например, на матовом стекле. Последний член описывает волну, рассеянную объектом, она формирует мнимое изображение, которое можно видеть невооруженным глазом. Это изображение наблюдается точно в том же самом месте, где находился объект при записи голограммы. Наблюдатель видит объемное изображение, он может фокусировать глаз на любую точку изображения, смещая голову, наблюдает параллакс, видит игру бликов. Изображение оказывается настолько реальным, что наблюдатель не в состоянии отличить изображение от самого объекта.

Рассмотренная схема записи голограммы является частным случаем. Вообще же схема записи голограммы зависит от способа ее регистрации. В заключение данного раздела приведем простейшую классификацию голограмм. Для этого рассмотрим интерференцию сферической волны, исходящей из точечного источника s , и плоской волны, направление которой показано на рис. 2 стрелками сверху вниз. На рисунке показано сечение се-



Р и с. 2. Интерференционные полосы, образованные плоской и сферической волнами

мейства поверхностей максимальной интенсивности возникающей интерференционной картины. Цифрами 1—4 обозначены характерные для регистрации голограмм положения фотографических пластинок. Заметим сразу же, что различают два вида голограмм — плоские и объемные. Голограмма считается тонкой, если толщина ее меньше расстояния между интерференционными полосами (1 и 2), и объемной — если ее толщина сравнима или больше расстояния между полосами (3 и 4).

Голограмма, изображенная в положении 1, носит название голограммы с осевым опорным пучком или осевой, так как обе волны распространяются вдоль одной оси. Такие голограммы требуют минимальной когерентности источников и низкой разрешающей способности регистрирующей среды. По такой схеме регистрируются голографические зонные пластинки, представляющие собой дифракционную решетку с фокусирующими свойствами.

В положении 2 голограмму называют внесосевой, или голограммой с боковым опорным пучком. При малых углах между интерферирующими волнами она ведет себя как двухмерная дифракционная решетка, т. е. оказывается тонкой. Однако с увеличением угла (положение 3) расстояние между интерференционными полосами уменьшается, и дифракционная решетка рассматривается уже как объемная.

В положении 4 интерферирующие волны падают на пластинку с противоположных сторон. По такой схеме регистрируется объемная голограмма во встречных

пучках. Открытие этого типа голограмм принадлежит Ю. Н. Денисюку. Ниже мы расскажем подробнее об их удивительных свойствах.

И наконец отметим, что голограммы подразделяются на амплитудные и фазовые в зависимости от механизма, посредством которого голограмма модулирует падающую на нее восстанавливающую волну. В амплитудных голограммах информация записывается в виде пространственного распределения коэффициента пропускания, а в фазовых — в виде изменения диэлектрической проницаемости или поверхностного рельефа регистрирующей среды.

Голограммы принято характеризовать величиной дифракционной эффективности, которая показывает, какая часть света, падающего на голограмму, участвует в формировании восстановленного изображения. Различные типы голограмм отличаются величиной дифракционной эффективности. Так, для тонких амплитудных голограмм эта величина не может превышать 6,25%, а для объемных фазовых голограмм принципиально может достигать 100%.

После знакомства с основными принципами голографии перейдем к рассмотрению основных направлений голографии и ее приложений. Практические применения голографии столь многообразны, что рассмотреть их все в одной брошюре не представляется возможным, поэтому мы остановимся только на самых актуальных, в которых используются наиболее характерные свойства метода.

Основные свойства голографии. Мы уже отмечали способность голограммы восстанавливать объемные изображения предметов, не требующие принятия специальных мер для их непосредственного наблюдения.

Голографическая запись информации отличается исключительно высокой плотностью. Для примера можно сказать, что на пластинке в несколько квадратных сантиметров может быть записано содержание большой книги. Это свойство особенно ценно, если учесть высокую надежность записи, т. е. слабую чувствительность ее к помехам, таким, как пылинки, царапины, мелкие дефекты регистрирующей среды. Регистрируемая голограммой информация обычно равномерно распределяется по всей ее площади, поэтому каждый участок голограммы восстанавливает практически все изображе-

ние объекта. Отсюда следует, что если голограмма даже будет разбита, то изображение все же может быть получено.

Равномерное распределение по голограмме света, рассеянного объектом (голограмма выглядит как засвеченная фотопластинка), не вызывает локальных переэкспозиций регистрирующего материала, как бывает в обычной фотографии при наличии в объекте больших перепадов яркости. В результате голографическое изображение может передавать интервалы яркостей в объекте на 2—3 порядка большие, чем, например, фотография.

Голографический метод позволяет записывать на одном и том же месте пластинки различные изображения и затем отдельно их восстанавливать. Одна из возможностей такой записи заключена в использовании при каждой экспозиции опорных пучков, падающих под различными углами.

Полезным свойством голограмм является их способность компенсировать искажения, которые могут возникать при голографировании объектов. К примеру, голограмма не чувствительна к турбулентностям атмосферы, если объективный и опорный пучки проходят через одну и ту же неоднородность. Введение же целенаправленных искажений в один из пучков дает широкие возможности для осуществления кодирующих операций.

Рассматривая принципы голографии, мы все время обращались к оптической голографии, т. е. записи информации в видимом диапазоне электромагнитных волн. Это было сделано только лишь с точки зрения наглядности изложения. Голография — это универсальный метод, он может быть использован для записи любых волновых процессов независимо от их природы, будь то электромагнитные колебания любого диапазона или, например, акустические волны. Конечно, в оптическом диапазоне голография имеет наибольшее число практических приложений, что нашло отражение в данной работе. Однако важные результаты были получены в радиотехнике и в акустике. Поэтому ниже мы рассмотрим вопросы радио- и акустической голографии, а также совместное использование голографии и вычислительной техники.

Итак, после знакомства с принципами голографии

перейдем к рассмотрению основных направлений голографии и ее приложений. Практические применения голографии столь многообразны, что рассмотреть их все в одной работе не представляется возможным, поэтому мы будем останавливаться только на наиболее актуальных, в которых используются наиболее характерные свойства метода.

ИЗОБРАЗИТЕЛЬНАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Начнем наш обзор с изобразительной голографии не только потому, что в последние годы она становится все более и более популярной, но и потому, что она достигла высокого уровня развития и сформировалась в самостоятельное направление, под которым понимают весь комплекс научных исследований и технику изготовления голограмм, предназначенных для демонстрации в музейных экспозициях, на выставках, в рекламном деле, а также в учебном процессе. Целесообразность использования голографии в подобных приложениях обусловлена тем, что мы не имеем других средств, воспроизводящих оригинал с точностью, которую обеспечивает голография, и одновременно обладающих широкими художественными возможностями.

В изобразительной голографии в зависимости от назначения голограммы и характера объекта могут использоваться самые различные схемы записи и методы синтеза голограмм, а также разнообразные регистрирующие материалы. Находят применение голограммы, восстанавливающие изображения в лазерном свете (монохроматические изображения), круговые голограммы, которые регистрируются на материалах, кольцом охватывающих объект, и позволяют рассматривать его со всех сторон, голограммы сфокусированных изображений и т. п.

И все же можно с уверенностью сказать, что в изобразительной голографии предпочтение должно быть отдано голограммам, которые восстанавливают изображение в белом свете при использовании обычных нелазерных источников. При этом играют важную роль не только соображения доступности и низкой стоимости таких источников, но и то, что в этом случае не наблюдается эффект зернистости изображения, присущий лазерному излучению.

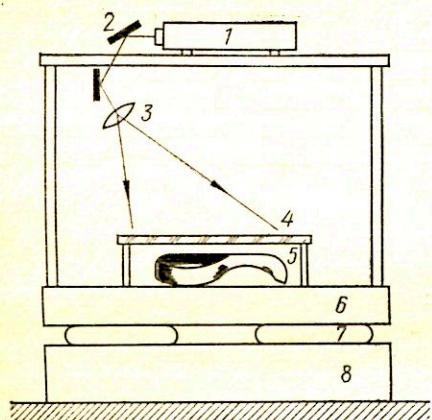


Рис. 3. Установка для записи голограммы

Наибольшее распространение в изобразительных целях получили отражательные объемные голограммы, регистрируемые во встречных пучках по методу Ю. Н. Денисюка. Схема установки, используемой для получения голограмм большого размера (до 1—2 м²), приведена на рис. 3. Процесс получения голограмм прост по идее, но технически довольно сложен и требует высокой квалификации экспериментатора. Рис. 3 в некоторой степени отражает характерные особенности лабораторных голографических установок. Луч света от лазера 1 с помощью зеркал 2 и расширяющего пучок объектива 3 освещает фотопластинку 4 и расположенный за ней голографируемый предмет 5. Падающий на пластинку свет является опорным пучком, а рассеянный предметом — объектным.

Угол между направлениями опорного и объектного пучков близок к 180°. Такая схема по рассмотренной ранее классификации соответствует размещению пластинки в положении 4 на рис. 2. Геометрические места интерференционных максимумов образуют слои, ориентированные параллельно плоскости фотопластинки. Расстояние между интерференционными полосами определяется соотношением:

$$d = \frac{\lambda}{2n} \sin \frac{\Theta}{2} ,$$

где λ — длина волны света, n — коэффициент преломления фотографической эмульсии, Θ — угол между

объектным и опорным пучками. Поскольку $\theta \cong 180^\circ$, то $d \approx \lambda/2n$, т. е. меньше чем половина длины световой волны. Отсюда следует, что для регистрации таких голограмм необходимы материалы с очень высокой разрешающей способностью и что схема голографирования очень чувствительна к вибрациям. Поэтому схемы, в которых используются непрерывные лазеры, обычно собираются на каменных или металлических плитах 6 с пневматическими амортизаторами 7 и на массивном основании 8. Толщина эмульсии фотопластинок, обычно применяемых для голографирования во встречных пучках, составляет 10—20 мкм, при этом в слое располагается 20—40 интерференционных плоскостей, которые после фотохимической обработки превращаются в полупрозрачные отражающие поверхности.

Форма этих поверхностей согласована с волновым фронтом, рассеянным объектом. На этапе восстановления свет, отраженный от каждой из поверхностей, суммируется синфазно только для волн одной частоты, которые формируют только одно восстановленное изображение.

Изображение восстанавливается в свете, длина волны которого совпадает с излучением лазера, использовавшегося при записи голограммы. Фотохимическая обработка всегда сопровождается усадкой фотоматериала. Специальными средствами можно регулировать величину усадки, тем самым меняя расстояние между интерференционными плоскостями d , и управлять таким образом цветом восстановленного изображения.

Не видно принципиальных трудностей для получения с помощью объемных голограмм многоцветных изображений. Такие голограммы должны регистрироваться в свете лазеров с несколькими длинами волн. На этапе восстановления каждая система интерференционных плоскостей выделяет из спектра восстанавливающего источника свою собственную длину волны. Уже были получены первые цветные изображения с таких голограмм, подтвердившие перспективность этого направления.

В изобразительной голографии находят применение так называемые «радужные голограммы». С помощью специальных приемов на такой голограмме регистрируется действительное изображение, восстановленное с обычной двухлучевой лазерной голограммы. Синтези-

рованная таким образом голограмма позволяет восстановить изображение в белом свете. Такое изображение отличается высокой яркостью, что вместе с присущей голограмме радужной окраской производит приятное впечатление на зрителя.

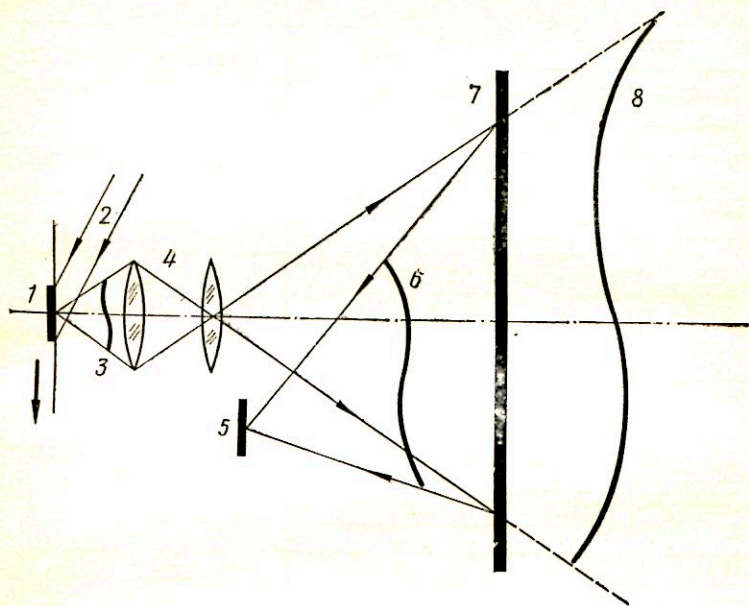
Объектами для изобразительной голографии обычно являются произведения искусства, исторические и археологические ценности, реликвии революционной, боевой и трудовой славы советского народа. Интерес, проявляемый к изобразительной голографии художниками, скульпторами, архитекторами, позволяет надеяться, что в ближайшее время будут созданы высокохудожественные голографические произведения, расширяющие арсенал изобразительных средств искусства.

Уже сейчас накоплено достаточно большое количество высококачественных голограмм уникальных экспонатов из различных музеев нашей страны. В связи с этим появилась возможность организации выставок голограмм для демонстрации широкому кругу зрителей. Трудно переоценить значение таких выставок, дающих возможность знакомства с копиями уникальных произведений искусства людям, живущим в самых отдаленных уголках нашей страны. Такие воспроизведения позволяют обогатить экспозиции других музеев, сделать более разнообразным обмен экспонатами с зарубежными музеями.

Первые выставки изобразительных голограмм пользуются большой популярностью, превзошедшей все ожидания. С большим удовлетворением можно отметить, что голограммы, получаемые советскими специалистами, считаются лучшими в мире. Советские специалисты получают большое число приглашений принять участие в зарубежных выставках голограмм. Наши голограммы с неизменным успехом демонстрировались в социалистических странах, а также в США, Франции, Японии, ФРГ. Такие выставки знакомят посетителей с историей и культурой нашей страны, являются яркой демонстрацией достижений советской науки.

ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ КИНО

Столь же заманчивыми, как и в изобразительной голографии, представляются перспективы использования голографического метода в создании истинно объемного



Р и с. 4. Схема голографического кинематографа

кинематографа. Проблема голографического кинематографа оказалась чрезвычайно сложной.

Для голографического массового кинематографа необходимо найти решение, позволяющее демонстрировать фильм в больших залах одновременно большому числу зрителей.

Трудно ожидать, что в голографическое кино будут перенесены из изобразительной голографии приемы наблюдения восстановленного изображения через голограмму как через «окно». Для этого потребовалось бы создать голографические фильмы или специальные экраны для воспроизведения голограмм больших размеров. Даже при ограниченном числе зрителей такие экраны должны иметь размеры 1 м² и более, что в ближайшем будущем представляется пока невыполнимой задачей. Такое решение, по-видимому, может оказаться приемлемым лишь для голографических киносистем индивидуального пользования, например, в самолетных тренажерах, используемых для обучения летчиков, в системах слепой посадки самолетов и т. п.

Не менее сложным представляется решение задачи получения голографии натуральных сцен в условиях, исключающих возможность подсветки когерентным излучением. В настоящее время существует только один приемлемый путь решения этой задачи. Голограмма, воспроизводящая объемное и цветное изображение, должна быть синтезирована из последовательности обычных снимков сцены, зарегистрированных с различных точек зрения — ракурсов. Такая голограмма называется композиционной. На первом этапе ее создания формируются ракурсы сцены. Наиболее естественный способ получения системы ракурсов — регистрация объектов по методу интегральной фотографии Липпмана с помощью растра, состоящего из периодически повторяющихся линз. На втором этапе интегральная объемная фотография переводится в голографическую запись, т. е. создается композиционная голограмма.

В Научно-исследовательском кинофото-институте были разработаны принципы голографического кинематографа с цветным объемным изображением, которые позволяют преодолеть указанные выше трудности. В основе их лежат следующие четыре момента:

— применение объективов с большим зрачком (около 200 мм) для съемки и проекции киноизображений, чтобы получить широкие зоны видения;

— использование точечно-фокусирующих множительных голографических экранов для проекции изображений одновременно большому количеству зрителей;

— использование объемных голографических регистрирующих сред для записи и воспроизведения цветных изображений;

— комбинированная киносъемка голографических фильмов: в помещении с использованием лазеров по крайней мере трех длин волны (синий, зеленый, красный) или съемка при обычном свете с последующим получением композиционных голограмм и включение в единый голографический фильм кадров, снятых обоими способами.

Выполнение указанных принципов позволит создать голографический кинематограф, передающий объемные изображения реальных объектов. На рис. 4 показана упрощенная схема проекции голографического кинофильма с помощью точечно-фокусирующего голографи-

ческого кинофильма с помощью точечно-фокусирующего голографического экрана. Голографический фильм 1 освещается пучком света 2, который соответствует опорной волне при записи голограммы. На схеме показан только один пучок, для восстановления же цветного изображения их должно быть три. Восстановленное изображение 3 с помощью оптической системы 4 формирует увеличенное объемное изображение 8, которое отражается и размножается точечно-фокусирующим множительным голографическим экраном на большое число изображений 6. Каждое из них наблюдается зрителем из своей зоны видения 5 (на рисунке показана только одна зона). Отражательный голографический экран представляет собой объемную голограмму большого числа точечных источников, зарегистрированную во встречных пучках.

На первом этапе развития голографического кино, по-видимому, целесообразно некоторое упрощение системы, основанное на особенностях восприятия объемного изображения. Например, можно использовать только горизонтальные параллаксы, что естественно для зрителей, сидящих в зале и не имеющих возможности перемещать голову по вертикали. Можно ожидать, что такие упрощенные системы будут заметно превосходить по качеству изображения современные системы стереоскопического кинематографа.

Следует отметить, что голографическая система кинематографа может быть совместимой с системами стереокино и обычного кино. Для этой цели фильмы двух последних систем должны быть пересняты на голограммы.

В 1976 г. в нашей стране была осуществлена первая экспериментальная демонстрация системы голографического кинематографа, построенного на рассмотренных принципах. Демонстрация объемного изображения осуществлялась с помощью голографического экрана размером $0,6 \times 0,8$ м, фильм был записан на пленке шириной 70 мм, продолжительность демонстрации была около 2 мин. Этот эксперимент подтвердил возможность создания голографического кино, позволил получить ценные сведения, необходимые для дальнейшего совершенствования системы. Однако для того чтобы голографический кинематограф прочно вошел в нашу

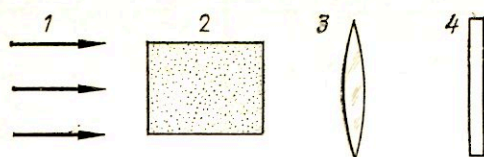
жизнь, потребуется продолжительная и напряженная работа большого числа специалистов в области техники кино и голографии.

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

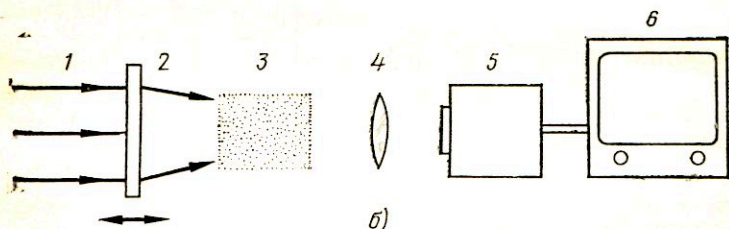
Регистрация объемных изображений быстропротекающих процессов и нестабильных во времени объектов является исключительно важной и трудной технической задачей. Поэтому не удивительно, что использование голографии для анализа пространственного распределения микрочастиц явилось одним из первых практических приложений метода. В этом применении ясно видны преимущества голографического метода перед фотографическим методом регистрации и перед непосредственным наблюдением частиц. Поскольку исследуемые частицы малы (несколько микрометров в диаметре), для их наблюдения требуется достаточно большое увеличение микроскопа, что приводит к уменьшению глубины резкости изображаемого пространства. Поэтому фотографическим способом возможна регистрация распределения частиц только в одном из сечений исследуемого объема. Голограмма же позволяет за одну экспозицию зарегистрировать частицы во всем объеме.

На рис. 5,а приведена схема установки, которая была использована для анализа аэрозольных частиц. Исследуемый объем с частицами 2 освещается светом импульсного лазера 1. Обычно в импульсной голографии используются рубиновые лазеры, работающие в режиме модулированной добротности. Типичные параметры импульсов света: длительность 20—30 нс, энергия в импульсе 20—30 мДж. На голограмме 4 регистрируется картина дифракции света на частицах, а в качестве опорной используется нерассеянная часть света. Такая схема голографирования называется однолучевой (пластинка в положении 1 на рис. 2). Ее достоинства заключаются в простоте, низкой чувствительности к механическим воздействиям, минимальных требованиях к пространственно-временной когерентности лазера и разрешающей способности фотоматериала.

На рис. 5,б показана схема восстановления изображения частиц в свете непрерывного лазера 1. Голограмма восстанавливает изображение частиц в объеме 3.



а)



б)

Рис. 5. Схема установки для анализа аэрозольных частиц: а — схема записи голограммы микрочастиц: 1 — излучение импульсного лазера; 2 — исследуемый объект; 3 — голограмма; б — схема восстановления изображения частиц: 1 — излучение гелий-неонового лазера; 2 — голограмма; 3 — изображение частиц; 4 — объектив; 5 — телевизионная камера; 6 — телевизионный монитор

Объектив 4 проецирует одно из сечений этого объема на передающую телевизионную трубку 5. Для удобства наблюдателя изображение выводится на экран телевизора 6. Смещение голограммы вдоль оси позволяет последовательно исследовать все сечения изображения частиц.

В качестве примеров задач, в которых требуется исследовать пространственное расположение частиц, их размеры и скорости, можно назвать следующие: исследование процессов в паровых турбинах, двигателях внутреннего сгорания, форсунках для распыления жидкого топлива, а также изучение кавитаций, аэрозолей в атмосфере и т. п. В настоящее время голография является, пожалуй, единственным средством получения необходимой информации в подобных исследованиях.

Следует отметить, что голографическая регистрация пространственных ансамблей частиц является достаточно сложной задачей, особенно при увеличении числа частиц в объеме до 10^3 — 10^6 см⁻³ и размере частиц порядка единицы микрометров и глубине поля зрения в несколько десятков сантиметров. Рассеяние све-

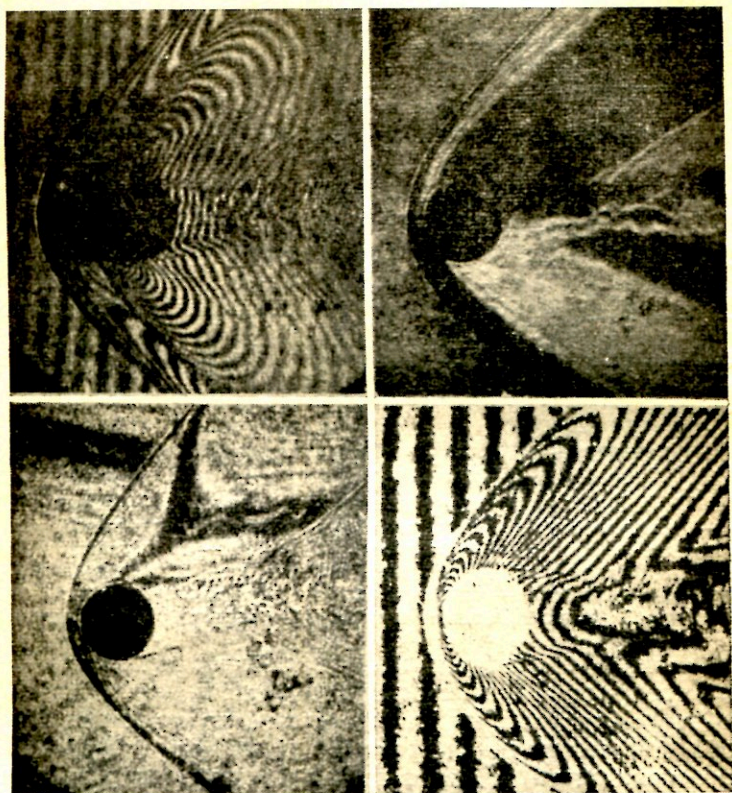


Рис. 6. Изображения, восстановленные с голограммы быстролетящего тела

та на частицах создает сильный фон, затрудняющий получение качественных изображений.

Голограмма быстропротекающего процесса даст исследователю возможность получения максимально возможного количества информации в результате апостериорной обработки результатов. Восстановленный волновой фронт может быть исследован всеми известными способами, как если бы этот фронт исходил непосредственно от объекта. В обычных условиях для каждого способа потребовался бы отдельный эксперимент.

В качестве примера сошлемся на применение голографии в трудоемком и дорогостоящем эксперименте

на аэробаллистических трассах. Одна единственная голограмма быстро летящего тела позволяет получить практически любое число снимков, выявляющих детали и особенности процесса в различных точках объекта. На рис. 6 приведено несколько фотографий с результатами обработки волнового фронта с одной голограммы, полученной в аэробаллистическом эксперименте.

Интересным применением импульсной голографии является получение объемного портрета человека. Как и в изобразительной голографии, предпочтительно получать портреты на отражательных объемных голограммах, восстанавливающих изображение в белом свете. Такие портреты получены в лабораторных условиях, однако с художественной точки зрения они требуют улучшения. По-видимому, монохроматичность света при записи, исключительно короткая экспозиция приводят к тому, что изображение выглядит недостаточно живым. Отметим, что голографирование человека предъявляет самые высокие требования к источнику излучения — лазеру: энергии импульса света, когерентности, а также к характеристикам регистрирующего материала. В принципе уже сейчас эти проблемы решены. И мы вправе надеяться, что в будущем будут созданы ателье, где можно будет заказать объемный цветной и высокохудожественный голографический портрет.

ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗ ПЛОСКИХ

В различных областях науки и техники обстоятельства требуют трехмерного представления исследуемого объекта, в то время как исходная информация о нем имеется в виде двухмерных снимков.

Так, в медицинской практике двухмерные рентгеновские изображения не могут дать полной информации об исследуемом объекте. Повысить диагностическую ценность рентгеновских снимков и значительно облегчить работу врачей позволяют голографические методы получения трехмерных изображений по серии разноракурсных плоских снимков.

Исходным для синтеза голограммы является набор снимков объекта, полученных с различных ракурсов. Эти снимки последовательно помещаются в оптическую схему и голографируются на одной фотопластинке в

виде полос, расположенных вплотную друг к другу. Рассматривая такую голограмму, наблюдатель видит трехмерное изображение. Перемещая глаз от одной полосы к другой, можно рассматривать изображение объекта практически со всех сторон и даже с обратной стороны. Конечно, изображение не является истинно объемным, как даваемое обычной голограммой, оно не имеет вертикального параллакса и эффекта аккомодации. Однако трехмерность, как и в случае стереоизображений, позволяет правильно оценить пространственное расположение деталей объекта.

Достоинством рассматриваемого метода является простота и доступность используемой техники, для получения исходных снимков не требуется разработка специальной аппаратуры, вся необходимая информация может быть получена с помощью существующих рентгенографических устройств.

Метод синтеза трехмерных изображений представляет практический интерес не только в медицине, но и в других областях, например, в технике промышленной рентгеновской или ультразвуковой дефектоскопии.

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

Голографическая интерферометрия является одной из наиболее полно разработанных областей голографии, которая имеет многочисленные практические применения в научных исследованиях и технике. Существует много разнообразных методов голографической интерферометрии, однако в основе их всех лежит принцип сравнения двух волновых фронтов, причем один из них или оба записываются и восстанавливаются голографическим методом.

Основную идею голографической интерферометрии можно объяснить с помощью рис. 1. Пусть после экспонирования и соответствующей обработки голограмма устанавливается на прежнее место. Освещая ее опорной волной, мы можем одновременно наблюдать восстановленное изображение (рис. 1, б) и объект, который остался на своем месте. Обе волны (от реального объекта и восстановленной голограммы) абсолютно одинаковы, и мы будем видеть только один объект.

Если под действием каких-либо причин объект изменит состояние, в котором он находился во время реги-

страции голограммы, то волновые фронты от объекта и с голограммы уже оказываются различными. Поскольку эти волновые фронты когерентны, они интерферируют. Наблюдатель видит систему интерференционных полос, положение и вид которых связаны с изменением в состоянии объекта.

Наблюдение интерференционной картины через голограмму может осуществляться одновременно с воздействием, оказываемым на объект (нагрев, смещение, механическое воздействие и т. п.). Поэтому такой метод называется голографической интерферометрией в реальном времени. Этот метод позволяет исследовать динамику происходящего процесса и часто используется на практике.

Другим широко распространенным методом является метод двух экспозиций. В этом случае на одной голограмме за две экспозиции регистрируется объект в двух различных состояниях. При восстановлении изображения наблюдается картина интерференции двух волн, существовавших в различные моменты времени.

Остановимся кратко на некоторых свойствах метода голографической интерферометрии, которые послужили основой его широкого распространения.

Во-первых, метод голографической интерферометрии является дифференциальным. Интерферируют между собой волны, прошедшие по одному и тому же пути, хотя и в различные моменты времени, поэтому интерференционная картина определяется только изменениями, произошедшими с объектом. Это свойство позволяет снизить требования, предъявляемые к качеству используемых оптических элементов. При наличии дефектов в оптике обе волны претерпевают одинаковые искажения, что не отражается на виде интерференционной картины. В классических интерферометрах обычно волна от объекта и волна сравнения идут по разным каналам, поэтому чтобы элементы системы не вносили искажений, качество их должно быть очень высоким. Это приводит к большой стоимости классических интерферометров.

Следствием того, что в голографических интерферометрах могут использоваться элементы сравнительно низкого оптического качества, является практически неограниченная возможность увеличения размеров исследуемых объектов. В настоящее время уже созданы рен-

табельные установки для контроля качества крупногабаритных промышленных деталей.

Во-вторых, в голографической интерферометрии сравниваемые волны могут быть сформированы в различные моменты времени, соответствующие различным состояниям объекта (в обычной интерферометрии они существуют одновременно). Эти волны повторяют друг друга в мельчайших деталях, за исключением интересующих нас изменений, поэтому интерференционными методами возможно исследовать объекты произвольной формы и с любым качеством поверхности. Напомним, что в классической интерферометрии возможно сравнение объектов только простой формы и с оптическим качеством поверхности, так как в противном случае формирование волны сравнения становится неразрешимой задачей.

В-третьих, голограмма исследуемого объекта может иметь достаточно большие размеры и восстанавливать волны, рассеянные объектом в разных направлениях. Таким образом, восстанавливая картину интерференции волн с различных участков голограммы, можно получить необходимые сведения об оптических свойствах объектов, не обладающих осью симметрии, или о деформациях объектов сложной формы.

В-четвертых, голографическая интерферометрия позволяет наблюдать интерференцию световых волн, которые восстановлены с двухэкспозиционной голограммы одного и того же объекта, причем каждая экспозиция осуществляется в свете своей длины волны, λ_1 и λ_2 соответственно. В результате интерференции двух волн, восстановленных с такой голограммы, на изображении объекта наблюдаются полосы, являющиеся контурами сечения объекта. Таким образом получают топографическую карту исследуемой поверхности объекта.

Соответствующим выбором длин волн можно изменять расстояние между соседними секущими плоскостями Δh от микрометров до миллиметров:

$$\Delta h = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2|\lambda_1 - \lambda_2|} .$$

Существуют разновидности этого метода, когда при записи голограммы используются два смещенных источника, освещающих объект, или погружение объекта в

иммерсионную ванну с двумя различными показателями преломления жидкости.

Голографическая интерференция находит применение в исследованиях как прозрачных, так и отражающих свет объектов. Различия, имеющиеся в исследовании объектов этих двух типов, не носят принципиального характера. Однако все же обычно исследование прозрачных фазовых неоднородностей выделяют в отдельное направление голографической интерферометрии. Это объясняется типичностью характера вносимых такими объектами фазовых искажений, спецификой используемых схем и методов интерпретации результатов. Однако существуют объекты, вносящие слабые и сильные фазовые возмущения. К числу первых относятся газовые потоки, ударные волны, пламена, плазма, тонкие пленки. Вторую группу составляют оптические элементы — линзы, призмы, плоскости и т. п.

Как правило, различны и задачи исследований объектов этих двух групп. Голографическая интерферометрия слабых фазовых неоднородностей ставит своей конечной целью по распределению показателя преломления определить плотность газа, концентрацию атомов и электронов, температуру и т. п. Исследование же оптических элементов, как правило, ставит целью проверку их качественных характеристик.

Голографическая интерферометрия слабых фазовых неоднородностей. Интерференционный метод исследования фазовых неоднородностей позволяет непосредственно измерять абсолютные значения изменения показателя преломления. В этом заключается его преимущество перед известными методами наблюдения фазовых неоднородностей, такими, как шлирен-метод и теневой, дающими информацию о первой и второй производных распределения показателя преломления.

Обычно исследуемые процессы являются быстропременными, поэтому в исследованиях используются импульсные лазеры. В данном случае полностью реализуются возможности голографии для исследования процессов и явлений, происходящих в некотором объеме с возможностью апостериорной обработки результатов.

Характерным примером эффективного использования голографической интерферометрии является диагностика плазмы. Как известно, плазма имеет сложный состав и содержит большое количество разных частиц:

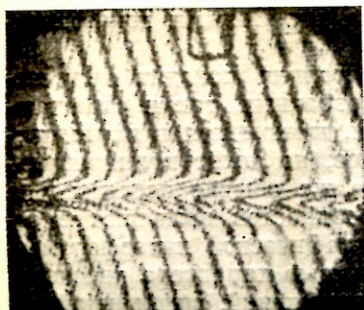


Рис. 7. Голографическая интерферограмма плазмы нейтрального токового слоя (диаметр 10 см)

электронов, атомов и ионов в различных состояниях. Поэтому исследование плазмы представляет собой весьма сложную техническую задачу. На голограмме регистрируется волна, прошедшая плазму и претерпевшая как фазовые, так и амплитудные искажения, поэтому имеется возможность измерять распределение не только показателя преломления плазмы, но и ее коэффициентов поглощения, что позволяет получить ценные результаты.

На рис. 7 приведена голографическая интерферограмма плазмы. Для исследования слабых фазовых неоднородностей необходимо резкое увеличение чувствительности голографической интерферометрии. Возможности для этого имеются.

Кратко перечислим возможные способы увеличения чувствительности голографической интерферометрии. Некоторые из них известны из обычной интерферометрии, например, использование многократного прохождения света через исследуемую неоднородность, другие возможны только в голографии.

Тонкая голограмма восстанавливает два изображения и недифрагированную волну (волны ± 1 -го и нулевого порядков). Волны ± 1 -го порядков — комплексно сопряженные, они имеют обратный фазовый рельеф, поэтому при их интерференции чувствительность метода может быть повышена вдвое.

Дальнейшее повышение чувствительности связано с использованием нелинейных эффектов при регистрации голограммы. Если регистрирующая среда имеет нелинейную характеристику, то при восстановлении изображения с такой голограммы наблюдаются, кроме нуле-

вого и первого порядка, волны более высоких порядков. Фазовый рельеф волны n -го порядка в n раз отличается от фазового рельефа волны первого порядка. Если осуществить интерференцию волн $+n$ -го и $-n$ -го порядка, то выигрыш в чувствительности будет $2n$ раз. В одной из работ было достигнуто 14-кратное увеличение чувствительности.

Значительный выигрыш в чувствительности может быть достигнут благодаря резонансной интерферометрии. Известно, что вблизи линии поглощения рефракция соответствующих атомов резко, на несколько порядков, возрастает по сравнению с рефракцией вдали от линии. Таким образом, для увеличения чувствительности интерферометрических измерений необходимо выбрать соответствующую длину волны света. В этом плане большие возможности открывает использование лазеров на красителях, позволяющих плавно изменять длину волны излучения.

Голографические методы исследования вибраций. Исследование вибрации явилось одним из первых практических приложений голографической интерферометрии. В 1965 г. Пауэлл и Стетсон предложили простой и эффективный метод получения голограмм вибрирующих поверхностей. Голографирование вибрирующего объекта осуществляется по обычной схеме с боковым опорным пучком, причем время экспозиции существенно превышает период колебаний. Поэтому метод получил название записи голограммы с усреднением во времени. Вибрирующий объект практически останавливается в двух крайних положениях. Временем остановки можно считать интервал Δt , за который объект сместится на величину порядка $\lambda/8$. Таким образом, за одну экспозицию регистрируются сразу две голограммы, соответствующие крайним положениям объекта. В промежуточных положениях скорость движения объекта велика и стационарная голограмма не регистрируется, увеличивается только постоянная засветка фото-материала.

Контраст голограммы, а следовательно, и яркость светлых полос на изображении падают с уменьшением времени записи голограммы Δt , что имеет место при увеличении амплитуды вибраций.

Изображение объекта, восстанавливаемое с такой голограммы, наблюдается одновременно с интерферен-

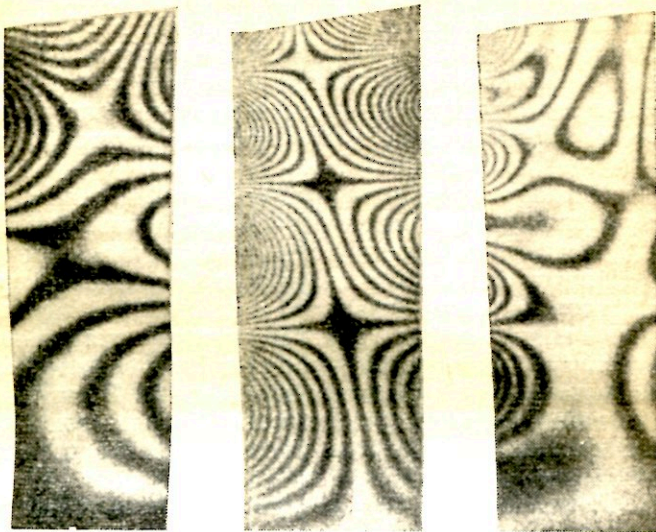


Рис. 8. Интерферограммы турбинной лопатки, полученные стробоголографическим методом: частота вибраций 4520, 5650, 6300 Гц

ционными полосами, проходящими через точки объекта, колеблющиеся с одинаковой амплитудой.

Недостатком метода является быстрое уменьшение видимости интерференционных полос при увеличении амплитуды вибраций, а также невозможность наблюдения за объектом в реальном времени.

Метод с усреднением во времени используется при амплитуде вибраций не более 5λ .

Эти недостатки отсутствуют в стробоголографическом методе исследования вибраций. При стробоскопическом освещении объекта короткими импульсами можно исследовать вибрации в любой фазе колебаний, а также колебания сложной формы. Измеряемая амплитуда колебаний возрастает в десятки раз.

На рис. 8 приведены изображения вибрирующих турбинных лопаток, полученные стробоголографическим методом. Этот метод позволяет наблюдать интерференционные полосы в реальном времени. Вибрирующий объект наблюдается в этом случае через голограм-

му неподвижного объекта при стробоскопическом освещении объекта.

Голографические методы исследования деформаций. Голографическая интерферометрия находит широкое применение при исследовании деформаций. Для этой цели могут использоваться как методы реального времени с записью динамики изменения картины интерференционных полос на киноплёнку, так и метод двух экспозиций. Обычно для определения напряжений в исследуемом объекте используется метод двух экспозиций. Количественный анализ напряжений по интерференционной картине представляет собой довольно сложную задачу. Дело в том, что система интерференционных полос, возникающих при деформациях поверхностей, в общем случае не совпадает с ней. Поверхность, на которой видность интерференционных полос максимальна, называется поверхностью локализации. Ее положение зависит от различных причин: от освещения предмета, вида деформации, а также от направления освещения.

Голографические методы исследования деформаций применяются для решения большого числа практических задач. К ним тесно примыкает применение метода для изучения изменения показателя преломления прозрачных твердых тел при различных напряжениях.

Голографическая дефектоскопия. Голографическая интерферометрия находит широкое применение при исследовании деформаций. С этой целью снимаются две голограммы одного и того же объекта, находящегося в различных состояниях. Конечной целью таких исследований является определение напряжений в исследуемом объекте. В общем случае задача расшифровки интерферограмм очень сложна. Трудность заключается в том, что картина интерференционных полос зависит не только от величины деформации, но и от направления освещения и наблюдения.

Однако в ряде случаев необходимая информация может быть получена без расшифровки системы интерференционных полос. Имеется широкий круг задач, в которых вся требуемая информация содержится в положении полос на объекте, в их аномальной концентрации, в характерных точках объекта и т. п. Такие особенности интерференционной картины могут свидетельствовать о наличии дефектов в промышленных деталях

и указывать на их местоположение. Голографическая дефектоскопия позволяет обнаружить в деталях области пониженной прочности, дефекты соединений, внутренние дефекты структур и т. п.

Для получения интерферограмм используются методы двойной экспозиции и реального времени при соответствующей «нагрузке» объекта.

Для надежного обнаружения дефектов исследуемые объекты должны быть «нагружены» оптимальным образом, так, чтобы аномалия в расположении полос проявлялась в наиболее наглядном виде. Обычно применяют следующие способы воздействия на объект:

- термическое (нагрев, охлаждение),
- механическое (сжатие, изгиб, кручение),
- вибрационное.

Любые аномалии в исследуемом объекте вызывают либо резкие изломы в ходе интерференционных полос, либо приводят к более тесному расположению их. Эти изменения легко обнаруживаются даже не тренированным наблюдателем.

Имеются сообщения о промышленном выпуске голографических установок для контроля качества крупногабаритных деталей. В одной из установок, предназначенных для контроля деталей корпуса самолета, могут исследоваться панели размером до $1,2 \times 5$ м. Время, затрачиваемое на исследование такой детали, не превышает 1 ч. Используется метод реального времени, деталь исследуется по участкам, размер каждого из которых 0,9 м. Голограмма обрабатывается на месте. Нагрузка объекта между экспозициями осуществляется путем нагрева. Другой пример — голографическая установка для контроля качества пневматических шин. Используется метод двух экспозиций. Для полного анализа шины требуется снятие четырех голограмм, которые регистрируются на 35-миллиметровой фотопленке. Полное время исследования шины 1,5 мин. Высокая скорость анализа достигнута благодаря использованию малогабаритной голографической камеры, которая обследует шину со всех сторон. Интерференционные картины позволяют визуализировать практически все виды внутренних дефектов.

Контроль качества оптических поверхностей. К области голографической дефектоскопии можно отнести и методы контроля качества оптических элементов. Тре-

бование высокого качества особенно существенно для деталей асферической оптики, так как только в этом случае полностью реализуются все их преимущества (уменьшение размеров и веса, повышение светосилы и т. д.). Отсюда становится ясной важность разработки методов контроля, которые бы обеспечивали необходимую точность изготовления оптических элементов. Голографические методы позволяют решить эту проблему практически для всех видов оптических поверхностей.

Идея использования голографии для контроля оптических поверхностей заключается в преобразовании фронта волны от контролируемой поверхности с помощью голограммы-компенсатора и в последующем анализе результирующего фронта с помощью обычных, например, интерферометрических методов.

Голограмма-компенсатор может быть изготовлена с использованием эталонной поверхности, если такая имеется. Однако кардинальным решением оказалось применение искусственных голограмм, которые рассчитываются на ЭВМ по заданному уравнению асферической поверхности.

Голограмма рассчитывается таким образом, что при прохождении через нее волнового фронта от идеальной поверхности выходящая волна имеет простую форму — сферическую или цилиндрическую. По отклонению формы волны от ожидаемой можно судить о качестве исследуемой поверхности.

При исследовании различных типов голографических асферометров наилучшие результаты были получены с одноосевыми голограммами. Для поверхностей вращения такие голограммы представляют собой системы концентрических окружностей, а для цилиндрических поверхностей — системы прямых полос. Соответственно проще оказываются расчет голограмм, процесс юстировки асферометра и сама операция контроля.

Для изготовления искусственных голограмм разработана прецизионная аппаратура. В одном из вариантов такого устройства автоматическое нарезание полос или колец производится на тонком слое алюминия, нанесенном на стеклянную подложку. Диаметр голограмм, изготавливаемых таким способом, более 100 мм, максимальная пространственная частота — 100 мм^{-1} . Голограммы с такими параметрами обеспечивают воз-

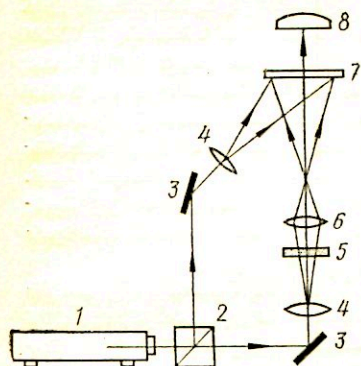


Рис. 9. Схема голографического интерференционного микроскопа: 1 — лазер; 2 — расщепитель пучков; 3 — зеркало; 4 — линза; 5 — объект; 6 — объектив; 7 — голограмма; 8 — окуляр

возможность контроля практически всех видов асферических поверхностей с точностью $0,1\lambda$. Размер контролируемых поверхностей может достигать 10 м и более. Можно надеяться, что голографические методы контроля найдут широкое применение на предприятиях оптико-механической промышленности и обеспечат возможность производства высококачественных оптических элементов практически всех видов.

Голографический интерференционный микроскоп. При рассмотрении голографического метода анализа микрочастиц мы познакомились с установкой, которая, по существу, является голографическим микроскопом (рис. 9). Такая система может оказаться полезной и для решения других задач. Когда микрочастицы прозрачные, как, например, биологические объекты, более подходящим прибором для исследований является голографический интерференционный микроскоп.

Голографические микроинтерферограммы обладают всеми достоинствами голографической интерферометрии. Сравнение волнового фронта от реального объекта может осуществляться с волновым фронтом, восстановленным с заранее полученной голограммы и таким образом интерференционная карта может наблюдаться в реальном времени. Возможно также сравнение волновых фронтов одного и того же объекта, полученных в различные моменты времени.

На примере схемы рис. 9 рассмотрим принцип действия голографического интерференционного микроскопа. Луч света от лазера 1 делится расщепителем 2 на два

луча, из которых с помощью зеркал 3 и линз 4 формируются объектный и опорный пучки света. Объектный пучок проходит через исследуемый образец 5, объект 6 и падает на фотопленку 7, где интерферирует с опорным пучком. На первом этапе на фотопленке 7 регистрируется голограмма в отсутствие объекта. После фотохимической обработки такая голограмма устанавливается на место и освещается опорным пучком. При наличии одновременно объектной волны наблюдатель видит через окуляр результат интерференции двух волновых фронтов. Наблюдение интерферограмм возможно в полосах бесконечной и конечной ширины.

Имеются сообщения о применении голографических микроинтерферометров для исследования самых разнообразных объектов: пятен масла, искусственных кристаллов, биомедицинских объектов, оптических волокон, оптических линзовых растров, а также процессов деления клеток и роста кристаллов и т. п.

Для широкого внедрения голографической интерферометрии в научные исследования и в технику необходим серийный выпуск голографических микроскопов. Отечественная промышленность уже выпускает первый прибор такого типа — голографический интерференционный микроскоп МГИ-1. Прибор предназначен для интерферометрических измерений в реальном времени или методом двух экспозиций и для регистрации голограмм прозрачных подвижных микрообъектов и наблюдения восстановленных изображений. Он может работать с лазером — как с импульсным, так и непрерывного действия. Микроскоп МГИ-1 является достаточно универсальным прибором и может найти большое число самых различных применений.

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Голограммы, на которых записаны волновые фронты специальной формы, находят применение в качестве оптических элементов самого различного назначения. С их помощью возможна коррекция аберраций оптических систем, в данном случае голограммы выступают в качестве составных элементов сложных оптических приборов. Голограммы используются и как самостоятельные оптические элементы.

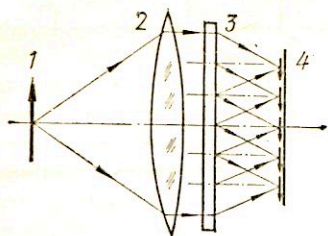


Рис. 10. Схема голографического мультипликатора

Хорошо известны фокусирующие свойства зонных пластинок, представляющих собой голограммы точечного источника и плоской опорной волны (см. рис. 2, положение голограммы 1). Зонная пластинка во многом подобна линзе, но она имеет меньший вес и более компактна. Одним из перспективных применений голографических линз являются фокусирующие устройства ввода и съема информации в голографических запоминающих устройствах.

На одной фотографической пластинке может быть записано большое число зонных пластинок, причем их размер может даже превышать расстояние между соседними элементами. Такие голограммы обладают необычным свойством образования одновременно большого числа одинаковых изображений. Проблема получения мультиплицированных изображений одного шаблона занимает важное место в технологии производства полупроводниковых приборов и интегральных схем. Обычно эта процедура выполняется последовательной печатью изображения шаблона на фотопластинку, что занимает длительное время и не обеспечивает высокой точности совпадения координат отдельных изображений в различных фотошаблонах.

На рис. 10 представлена схема для мультиплицирования изображений. Объект 1 освещается светом лазера (возможно также использование ртутной лампы). Линза 2 коллимирует излучение от объекта и освещает голографический мультипликатор 3, в фокальной плоскости которого формируются размноженные изображения 4. Принятие специальных мер (использование диафрагм для устранения фоновых засветок, сканирование изображения, оптимизация записи голограмм и т. д.) позволяет получить множественные изображения протяженных объектов с сохранением высокого контраста

и разрешения. Так, на поле 40×40 мм было получено $26 \times 26 = 676$ изображений шаблона с разрешением 2 мкм. Следует отметить, что использование голографического мультипликатора в принципе позволяет отказаться от изготовления фотошаблона и производить бесконтактное экспонирование большого числа изображений непосредственно на фоточувствительный слой, нанесенный на полупроводниковую пластинку.

Из голографических оптических элементов наибольшее распространение получили дифракционные решетки. Голографическая дифракционная решетка представляет собой зарегистрированную на фоточувствительном материале картину интерференции двух световых волн. Изменяя форму поверхности, на которой регистрируется решетка, а также геометрию схемы записи, можно в широком диапазоне варьировать параметры таких голографических решеток. В случае падения двух параллельных пучков на фоточувствительный слой под углом α расстояние между интерференционными полосами определяется как $d = \lambda/2 \sin \alpha$. Видно, что при увеличении угла $\alpha \rightarrow 90^\circ$ и уменьшении длины волны света λ расстояние между штрихами уменьшается в пределе $d = \lambda/2$. Имеются сообщения о промышленном выпуске голографических дифракционных решеток с пространственной частотой до 6000 линий/мм. Трудно предположить, что решетки с такой высокой частотой могут быть изготовлены каким-либо другим методом.

Достоинством голографического метода является и то, что решетки могут быть изготовлены весьма больших размеров, например 600×400 мм. Голографические решетки превосходят обычные нарезаемые механическим способом по таким параметрам, как максимальная пространственная частота и размеры, отношение сигнал/шум, возможность коррекции аберрации и т. п. Они несколько проигрывают в величине эффективности, однако можно ожидать, что успехи в создании регистрирующих сред позволят со временем ликвидировать этот недостаток.

Голографические дифракционные решетки традиционно используются для спектрального анализа. В последнее время они находят широкое применение в качестве элементов связи, обеспечивающих введение световых волн в тонкие пленки.

Голографическая компенсация искажений. Гологра-

фический метод регистрации изображений дал ряд новых возможностей для получения изображений в условиях, когда абберации оптической системы или условия распространения света оказывают сильное искажающее влияние на волновые фронты.

В некоторых случаях голограмма позволяет восстановить неискаженное изображение даже без принятия специальных мер. Например, если объект и голограмма находятся на сравнительно большом расстоянии, а искажающая оптическая неоднородность сосредоточена вблизи голограммы, то оба пучка, объектный и опорный, проходят практически через одни и те же участки неоднородности. Поскольку искажения обоих пучков одинаковы, они никак не отразятся на записываемой голограмме, а следовательно, и на качестве восстановленного изображения. Такая ситуация может иметь место, например, при получении изображений космических объектов через неоднородную атмосферу.

В других случаях неискаженное изображение может быть получено, если использовать специальные голографические компенсаторы. Один из возможных методов заключается в том, что на первом этапе записывают голограмму волнового фронта от точечного источника, прошедшего через среду с фазовыми неоднородностями, используя для этого неискаженную опорную волну. Если затем поместить голограмму на прежнее место относительно искажающей среды, то волновой фронт от объекта, исказившись при прохождении через среду, будет исправлен голограммой и таким образом может быть получено неискаженное изображение. Данный метод успешно применяется для компенсации аббераций линз.

Большие трудности представляет проблема получения изображений в когерентном свете с использованием для передачи волновых полей стекловолоконных жгутов и шайб. Дело в том, что стекловолокно вносит в волновой фронт сильные фазовые искажения, в результате чего без принятия специальных мер информация от объекта в таком фронте полностью теряется. Исследования показывают возможность существенного улучшения изображения, переданного через стекловолокно с помощью голографии. Использование голографической коррекции оказывается полезным для реализации медицинского эндоскопа. В одном из вариантов

предполагается передавать излучение, рассеянное объектом, по жесткой волоконной детали и на выходе ее корректировать вносимые волокном фазовые искажения с помощью голограммы. На таком принципе можно создать эндоскоп, работающий в реальном времени и обеспечивающий разрешение до 100 мм^{-1} в пределах поля зрения 1—2 мм. Диаметр световода не более 3 мм и длина около 300 мм позволяют создать эндоскоп — иглу для обследования внутренних тканей организма человека.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Интенсивные исследования ученых над созданием обратимых регистрирующих сред для регистрации голограмм и записи на них голограмм привели к возникновению нового направления — динамической голографии. Динамической называют голограмму, в которой запись и считывание происходят одновременно. Очевидно, что в этом случае записывающее поле и характеристики динамической голограммы взаимосвязаны. Именно обратное воздействие голограммы на поле является основной особенностью динамической голографии, которая открывает широкие перспективы для голографического преобразования волновых полей в реальном времени.

Динамическая голограмма формируется в результате воздействия на регистрирующий материал двух пучков света: опорного и объектного, но в отличие от классической стационарной голографии восстановление информации осуществляется теми же двумя пучками, т. е. тем же самым полем, создающим систему интерференционных полос (решетку).

Наиболее существенным моментом взаимодействия записывающего интерференционного поля с голограммой являются фазовые соотношения между ними, которые зависят от типа решетки и механизма записи голограммы. С практической точки зрения для динамической голографии наибольший интерес представляют фазовые объемные решетки, для которых дифракционная эффективность теоретически может достигать 100%.

Уникальным свойством динамической голограммы

является перекачка интенсивности между возникающими при дифракции пучками света вплоть до сложения двух падающих пучков в один выходящий. Наиболее интересен случай, когда перекачка осуществляется в направлении от сильного пучка к слабому, т. е. наблюдается усиление слабого пучка. Этот эффект оказывается наиболее сильным, когда между интерференционным полем и голографической решеткой имеется фазовый сдвиг (оптимальная величина сдвига $\Phi_0 = \pi/2$).

Сдвиг решетки может быть достигнут различными способами: например, можно смещать среду или записывающее поле в направлении, перпендикулярном к штрихам решетки. Смещение решетки может быть механическим или же под действием скрещенных электрического и магнитного полей. Оригинальным способом записи смещенных решеток является использование бегущих волн интенсивности, которые возникают в результате интерференции двух волн с различными частотами. В этом случае наблюдается не только преобразование интенсивностей взаимодействующих пучков, но и их частот.

Сдвиг решетки может быть получен также при нестационарной записи голограммы, когда время релаксации голограммы больше или равно времени изменения записывающего поля, $\tau \leq \Delta t$. В этом случае решетка отстает от поля. Такой сдвиг существует только при различной интенсивности записывающих пучков.

Для динамической голографии могут использоваться различные среды, отличающиеся величиной инерционности. Например, широко применяемые сегнетоэлектрики типа ниобата лития имеют большую инерционность — $10-10^3$ с, жидкие растворы красителей — $10^{-6}-10^{-3}$ с (тепловые решетки). Еще менее инерционными являются решетки на свободных носителях в полупроводниках.

По-видимому, для практического применения в настоящее время наиболее пригодны сегнетоэлектрики и полупроводники. На принципах динамической голографии могут быть созданы системы постоянной и оперативной памяти, корректоры излучения лазеров, усилители изображений, устройства управления лазерным излучением и т. д. Динамическая голография открывает и новые возможности для исследования физических характеристик различных сред.

Надо сказать, что исследования в динамической голографии интенсивно продолжаются и мы в праве ожидать в этой области дальнейших успехов.

ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Методы голографии существенно дополнили средства и расширили возможности оптической обработки информации. Оптические системы, обладающие (в отличие от электронных) двумя степенями свободы, позволяют одновременно обрабатывать большие массивы информации, поступающей в виде изображений, осуществлять многоканальную обработку одномерных сигналов. Быстродействие оптических систем очень высоко и ограничивается практически только скоростью ввода и съема данных.

Оптические методы обработки информации являются аналоговыми и в принципе уступают цифровым методам в точности. Однако не всегда достижение высокой точности является неременным требованием. Например, в задачах распознавания образов превышение выходным сигналом некоторого порогового уровня оказывается достаточным для принятия правильного решения. К тому же преимущества оптических методов в скорости обработки становятся более очевидными по мере увеличения объема входных данных. В тех случаях, когда точность обработки не очень существенна, современные электронные машины уступают оптическим процессорам. Так, для выполнения преобразования Фурье над изображением, состоящим из 1000×1000 элементов, даже при использовании быстрых алгоритмов обработки современные ЭВМ затрачивают несколько часов работы, в то время как оптический процессор выполняет эту операцию практически мгновенно.

Голография нашла непосредственное применение в ряде важных областей когерентной обработки информации: в распознавании образов (корреляционная обработка изображений); для улучшения качества оптических изображений в обработке сигналов радиолокационных станций с синтезированным апертуры, а также для хранения информации в устройствах памяти.

Голографические пространственные фильтры. Когерентные системы оптической обработки информации ис-

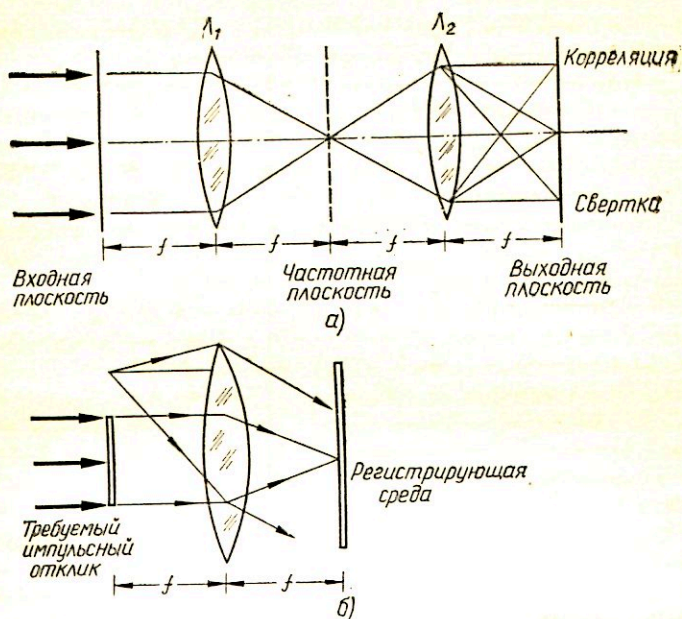


Рис. 11. Схема получения фильтра Ван дер Люгта: а — схема когерентной системы обработки информации; б — схема записи голографического фильтра

пользуют положительное свойство линзы осуществлять операцию двумерного преобразования Фурье. На рис. 11,а приведена схема когерентной оптической системы обработки информации. Поместим в переднюю фокальную плоскость линзы L_1 транспарант с амплитудным коэффициентом пропускания $s(x, y)$ и осветим его плоской волной света. Линза L_1 осуществляет Фурье-преобразование, и распределение амплитуды света в задней фокальной плоскости линзы соответствует Фурье-образу входного транспаранта, т. е. его спектру:

$$F[s(x, y)] = S(v_x, v_y).$$

Здесь F — символ Фурье-преобразования. Помещая в эту плоскость транспарант-фильтр с амплитудным коэффициентом пропускания, пропорциональным $H(v_x, v_y)$, можно изменять амплитуду и фазу спектральных составляющих S . Пространственные частоты v_x и v_y связаны с координатами в частотной плоскости x_f и y_f соотношениями $v_x = x_f / \lambda f$; $v_y = y_f / \lambda f$, где λ — длина

волны света и f — фокусное расстояние линзы. Амплитуда света, прошедшего фильтр-транспарант, пропорциональна произведению FH . Линза L_2 осуществляет обратное преобразование Фурье, и в выходной плоскости наблюдается отфильтрованное изображение:

$$F^{-1}[SH] = g(u, v).$$

В общем случае передаточная характеристика пространственного фильтра может быть комплексной:

$$H = |H| \exp j\varphi(v_x, v_y),$$

где $|H|$ — модуль и φ — фаза передаточной характеристики.

Это и вызывает практические трудности в реализации такого фильтра, который должен иметь амплитудную и фазовую составляющие.

Проблему реализации комплексных фильтров удалось решить Ван дер Люгту, который предложил использовать для этих целей голографию. Пусть необходимо создать фильтр, импульсный отклик которого $h(u, v)$. Напомним, что импульсный отклик представляет собой отклик системы на точечный входной сигнал, и он связан с передаточной характеристикой H системы преобразованием Фурье:

$$F[h] = H(v).$$

Функция h на практике часто имеет довольно простой вид, она может быть рассчитана теоретически или получена экспериментально. Второй способ нахождения h во многих случаях оказывается удобнее. Так, для обычной изображающей системы h есть не что иное, как распределение амплитуды света в изображении точечного источника.

Схема для реализации требуемого фильтра приведена на рис. 11,б. Транспарант с амплитудным коэффициентом пропускания h помещается в передней фокальной плоскости преобразующей линзы L . В задней фокальной плоскости линзы помещается фотопластинка, на которую, кроме $H = F(h)$, падает наклонная плоская волна $\exp [j2\pi\alpha y]$. Здесь $\alpha = (\sin\Theta)/\lambda$, где Θ — угол наклона плоской волны, которую можно рассматривать как опорную. Для получения этой волны в передней фокальной плоскости линзы расположен точечный источник.

Таким образом, на фотопластинке регистрируется интерференционная картина двух волн, т. е. голограмма, которая часто называется линзовой голограммой Фурье транспаранта h .

Если амплитудный коэффициент пропускания фотопластинки пропорционален интенсивности падающего на нее света, то на пластинке будет записан сигнал:

$$t(x_f, y_f) = |\exp(-j2\pi a y_f) + H|^2 = \\ = 1 + |H|^2 + H \exp(j2\pi a y_f) + H^* \exp(-j2\pi a y_f). \quad (*)$$

Видно, что третий член в выражении*, если не учитывать экспоненциальный множитель, пропорционален H , т. е. удовлетворяет требуемой передаточной функции фильтра.

Пусть на вход оптической системы (см. рис. 11,а) подано изображение $g(x, y)$, а в частотную плоскость помещен голографический фильтр $t(x_f, y_f)$. Линза L_2 осуществляет Фурье-преобразование поля, прошедшего фильтр в выходной плоскости системы. Вблизи оптической оси формируется изображение входного транспаранта, прошедшее через фильтр с передаточной функцией $1 + H^2$. Эта часть не представляет практического интереса. Два других распределения света, соответствующих третьему и четвертому членам выражения, представляют собой результаты фильтрации входного изображения: первое с передаточной функцией H , второе — с комплексно-сопряженной передаточной функцией H^* . Экспоненциальный множитель в выражениях (*) показывает, что первое из распределений смещено от оси по вертикали на величину $-\alpha\lambda f$, а второе смещено в другую сторону от оси на величину $+\alpha\lambda f$. Соответствующим выбором несущей частоты α , т. е. выбором угла наклона опорной волны Θ при записи фильтра можно добиться раздельного наблюдения сигналов.

Голографические фильтры успешно используются в решении двух важных задач, решаемых с помощью оптической обработки информации: распознавание образов и улучшение качества изображений.

Распознавание образов. В проблеме распознавания образов важную роль играет понятие фильтра, согласованного с сигналом. Фильтр называется согласованным с сигналом $s(x, y)$, если его импульсный отклик $h(x, y)$ является функцией, комплексно сопряженной сигналу $h = s^*$, а передаточная функция фильтра $H = S^*$.

Если обратиться к схеме получения фильтра Ван дер Люгта (см. рис. 11), то видно, что, поместив на вход сигнал $s(x, y)$, мы автоматически синтезируем фильтр, одна из составляющих которого соответствует требуемой передаточной характеристике S^* (см. выражение (*)).

Предположим теперь, что на вход системы фильтрации поступает сигнал s , а в частотной плоскости находится согласованный с ним фильтр s^* (см. рис. 11,а). Распределение поля, падающего на фильтр, пропорционально s , а за фильтром — ss^* . Эта величина действительна, поэтому за фильтром наблюдается плоская волна, которую линза L_2 фокусирует в задней фокальной плоскости в яркую точку, положение которой смещено от оптической оси на величину $\alpha\lambda f$. Интенсивность свечения соответствует автокорреляции сигнала $s(x, y)$.

Если же на вход системы поступает сигнал, отличный от s , то фильтр не компенсирует кривизну волны, падающей на него, и волна S_1S^* не будет плоской, она не сфокусируется в точку в выходной плоскости. Интенсивность этого распределения соответствует величине кросс-корреляции.

Таким образом, мы показали, что согласованный пространственный фильтр осуществляет параллельный корреляционный анализ входного изображения. В том случае, когда на вход коррелятора поступает сигнал, на который согласован фильтр, на выходе мы имеем сигнал функции автокорреляции. Поскольку величина функции автокорреляции всегда превосходит величину функции кросс-корреляции сигналов, по этому признаку и осуществляется распознавание образов.

Пространственная согласованная фильтрация относится к числу линейных пространственно-инвариантных операций. Величина отклика такой системы не зависит от изменения места нахождения объекта во входной плоскости, меняется только положение отклика в выходной плоскости.

С помощью оптических корреляторов с голографическими согласованными фильтрами успешно решались различные задачи анализа сигналов и изображений, распознавания печатных букв, навигации летательных аппаратов, исследования скорости движения облаков, интегральный контроль качества печатных плат и многие другие.

Чтобы проиллюстрировать применение согласованной фильтрации для решения практических задач, рассмотрим исследование скорости движения облаков по фотоснимкам земной поверхности, принимаемых с метеоспутника. Фотоснимки облаков над одним и тем же участком поверхности делались с интервалом в 20 мин. На первом снимке выбираются фрагменты, представляющие интерес для метеорологов, и на эти фрагменты делаются голографические согласованные фильтры. Считается, что за 20 мин изображения облаков в выбранных фрагментах не успевают существенно измениться, но смещаются в пространстве. Сравнивая фотографии с согласованными фильтрами, отмечают в выходной плоскости смещение координат корреляционных типов для каждого из фрагментов. По величине смещения ярких точек на выходе фильтра нетрудно определить скорость и направление перемещения облаков.

Высокая чувствительность согласованной фильтрации к различиям во входном сигнале и сигнале, который использовался для изготовления согласованного фильтра, в некоторых случаях создает серьезные практические трудности. По экспериментальным данным для аэрофотоизображений изменение масштаба входного изображения на 2—3% или поворот его на 3—5° относительно эталонного изображения приводит к резкому снижению интенсивности корреляционного отклика фильтра.

Для повышения устойчивости распознающих систем к допустимым изменениям входного сигнала предлагались различные решения. Можно с помощью механических устройств изменять масштаб входного изображения, вращать его и т. п., добиваясь совпадения входного и эталонного изображений. Очевидно, что такая процедура увеличивает время анализа. Другой путь заключается в использовании сложных согласованных фильтров, например, в записи на одном фотоматериале нескольких фильтров, соответствующих разным масштабам входного изображения, с использованием опорных пучков, падающих под разными углами, чтобы впоследствии можно было пространственно разделить отклики. Но это не дает радикального решения, так как при многократной записи голограмм на один участок материала дифракционная эффективность каждой из них уменьшается пропорционально квадрату их числа.

Для решения проблемы устойчивости оптических корреляторов к изменениям или деформациям входных изображений предлагалось использовать пространственно-зависимые методы оптической фильтрации. Сама по себе разработка и реализация этих методов, т. е. создание фильтров, отклик которых зависит от положения сигнала во входном зрачке системы, — задача весьма сложная.

Однако имеется класс систем, которые могут быть реализованы практически. В таких системах используется преобразование координат входного изображения, т. е. в него вводятся геометрические искажения. Закон преобразования координат выбирается так, чтобы после введения преобразования входная функция отличалась от эталонной только величиной сдвига.

Например, для входного изображения, отличающегося масштабом, необходимо логарифмическое преобразование координат; для повернутого изображения необходимо преобразование изображения в полярную систему координат и т. п. Были выполнены эксперименты по созданию корреляторов, инвариантных к масштабу, повороту и смещению входного изображения. Однако нельзя говорить, что все проблемы уже решены. Методу присущи определенные недостатки, такие, как возможность обработки только действительных функций, трудности сохранения фазовой информации, низкая помехоустойчивость и ряд других.

Улучшение качества оптических изображений. Обычно с достаточной во многих практических случаях точностью системы формирующие изображения можно изучать с помощью теории линейных систем. Если система может рассматриваться как пространственно-инвариантная, то изображение на ее выходе $g(u, v)$ описывается интегралом свертки:

$$g(u, v) = \iint s(x, y) h(u-x, v-y) dx dy,$$

где $s(x, y)$ — изображение на входе системы, $h(x, y)$ — импульсный отклик системы.

Если вследствие несовершенства оптической системы или под действием различных факторов, таких, как расфокусировка или движение объекта, импульсный отклик системы сильно отличается от δ -функции, то качество выходного изображения может оказаться неудовлетворительным. Несмотря на то что изображение вы-

глядит размытым, это не означает полной потери информации. На самом деле «истинное» изображение оказывается закодированным в размытом изображении в форме интеграла свертки. Утверждение справедливо и для изображений, получаемых в результате сканирования объекта пучком конечных размеров, как в телевидении, в электронной микроскопии.

Апостериорная фильтрация изображений позволяет улучшить качество изображений, повысить их контраст и разрешение, если известен импульсный отклик изображающей системы.

Известно, что интеграл свертки в частотной области записывается в виде произведения:

$$G = S \cdot H,$$

где G , S и H — Фурье-образы g , s и h — соответственно, H — передаточная функция оптической системы. Очевидно, что для получения «истинного» изображения необходима следующая операция фильтрации:

$$G[H]^{-1} = S \cdot H \cdot |H|^{-1} = S,$$

и с помощью обратного Фурье-преобразования от S легко получить неискаженное изображение $F^{-1}|S| = s$. Отсюда следует, что задача улучшения качества изображения решается средствами пространственной фильтрации и сводится к синтезу фильтра с передаточной характеристикой $|H|^{-1}$. Такой фильтр называется инверсным и может быть реализован в виде $|H|^{-1} = |H = H^*|^{-2}$. Он состоит из двух частей: голографического фильтра H^* , полученного по схеме рис. 11,б, и амплитудного фильтра $|H|^{-2}$.

Практическая трудность заключается в том, что динамический диапазон такого фильтра очень велик и составляет 3—4 порядка, что намного превышает возможности известных регистрирующих материалов. Однако эту проблему удастся преодолеть путем схемных решений и использованием специальной обработки материалов, на которых обычно записывается фильтр.

С помощью описанного метода было решено большое число задач по улучшению качества изображений: повышение контраста, устранение дефокусировки и смаза. Одним из наиболее эффективных применений метода явилось улучшение изображений в электронном микроскопе. Была устранена дефокусировка, вводимая для

наблюдения прозрачных биологических объектов. Улучшенные изображения имели высокий контраст и разрешение, близкое к предельному.

Голографические запоминающие устройства. Непрерывный прогресс в вычислительной технике предъявляет всевозрастающие требования к запоминающим устройствам, которые осуществляют функции записи, хранения и считывания информации. Наиболее жесткие требования предъявляются к таким важнейшим характеристикам памяти, как емкость и быстродействие. В современных ЭВМ используется сложная иерархическая структура памяти. В ее состав входят быстрые оперативные устройства малой емкости и медленные запоминающие устройства большой емкости. Наличие иерархической памяти является основной причиной сложности математического обеспечения вычислительных систем.

На современном этапе остро стоит задача создания такого устройства памяти, которое имело бы емкость 10^9 — 10^{10} бит со временем произвольной выборки порядка 1 мкс. Такие параметры далеко превосходят возможности известных видов запоминающих устройств, они могут быть реализованы только на основе новых физических принципов. В этом плане большие надежды связывают с голографией.

Голографический метод позволяет записывать информацию с высокой плотностью — до 10^7 бит/см². Такая плотность эквивалентна записи содержания большой книги (около 10^9 бит информации) на голограмме размером всего 10×10 см². Избыточность голографической записи обеспечивает высокую помехоустойчивость и надежность хранения информации (нечувствительность к царапинам, пыли и т. д.). Достоинством метода является параллельность записи и считывания информации большими массивами — страницами. Каждая страница, содержащая примерно 10^4 бит, записывается на отдельной субголограмме, имеющей диаметр около 1 мм; набор таких голограмм составляет матрицу.

Исследования принципов и схемных решений построения голографических запоминающих устройств показали, что они могут выполнять функции как оперативных, позволяющих осуществлять перезапись информации, так и постоянных устройств архивного типа.

На пути создания оперативной памяти необходимо

решить ряд сложных проблем. Прежде всего должны быть созданы соответствующие среды для записи голограмм, обладающие высокой чувствительностью, реверсивностью, не требующие химической обработки, обладающие высокой дифракционной эффективностью. Серьезные трудности стоят и перед разработчиками пространственно-временных модуляторов света, на которых оперативно формируется страница информации, предназначенная для записи на голограмму. Эти проблемы еще ждут своего решения.

По оценкам специалистов, учитывающих прогресс в области запоминающих устройств обычного типа, голографическим запоминающим устройством ЭВМ на первом этапе отводится роль преимущественно внешней архивной постоянной памяти объемом до 10^{12} — 10^{13} бит. Ожидается, что стоимость хранения одного бита информации в таких системах будет на 2—3 порядка ниже, чем в магнитных и полупроводниковых устройствах одинаковой емкости.

Память электронных вычислительных машин — это не единственная сфера применения голографических запоминающих устройств. Огромные и всевозрастающие потоки научно-технической информации, например патентной, остро ставят задачу создания архивных устройств хранения информации (страницы текста, таблицы, фотографии и рисунки, графики и т. п.), которые бы имели небольшие габариты, обеспечивали удобный и сравнительно быстрый доступ к хранимым данным и представляли их в виде, удобном для потребителя.

В одной из моделей ГЗУ голограммы диаметром $1 \div 2$ мм, содержащие буквенно-цифровую информацию, записываются на диске диаметром 400 мм. На таком диске помещается 100 000 голограмм. В устройстве отсутствуют лазерные сканирующие устройства, радиальное и азимутальное перемещение дисковой матрицы осуществляется скоростными шаговыми двигателями. Информация с выбранной голограммы считывается лазерным пучком, изображение может наблюдаться на экране или же регистрироваться на фоточувствительном материале.

Насколько перспективны такие системы, можно судить по тому, что десяток дисков способен охватить практически весь патентный фонд авторских свидетельств в стране (600 тыс.), а несколько сотен дисков

вместят весь фонд зарубежных патентов (10 млн.). Создание комплексной системы ГЗУ на дисковых матрицах, управляемой от ЭВМ, позволило бы реализовать оперативный доступ к документам и в случае необходимости получение их копий, что в настоящее время требует больших затрат времени.

Пространственно-временные модуляторы света (ПВМС). В рассмотренных примерах когерентной оптической обработки информации изображения, предназначенные для обработки или хранения, вводятся в оптическую систему с помощью пространственного модулятора света (ПМС). ПМС — это материалы или устройства, которые управляют характеристиками светового потока в соответствии с записанной на них информацией. В простейшем случае в качестве модуляторов света может быть использована фотографическая пленка. Однако фотопленка требует времени для фотохимической обработки и не позволяет осуществлять перезапись информации, она не пригодна для работы в реальном времени. В тех случаях, когда информация вводится в систему и обрабатывается практически в тот же момент, например, в темпе телевизионной передачи — 25 кадров в секунду, используются устройства, называемые пространственно-временными модуляторами света (ПВМС).

Можно выделить два класса ПВМС: фоточувствительные и электронно-чувствительные. Различие между ними заключается в способе записи на них информации. В первых запись осуществляется либо сканирующим и модулированным лазерным пучком, либо оптической проекцией изображения. Во вторых информация записывается либо сканирующим модулированным электронным пучком, либо матрицей электродов, нанесенных на поверхность преобразователя. ПВМС, на которых записывается оптическое изображение в некогерентном свете, например, объекты или сцены, освещенные естественным светом, часто называют преобразователями некогерентного света в когерентный. Достоинством приборов с записью сканированием или с помощью матрицы электродов является удобство согласования их с ЭВМ, в результате чего могут создаваться гибридные процессоры, наилучшим способом использующие свойства аналоговой оптической и цифровой машинной обработки.

В основе принципов работы ПВМС могут лежать самые различные физические эффекты, изменяющие оптические показатели модулирующей свет среды, такие, как фотохромные, электрооптические, магнитооптические, акустические и многие другие. В коротком параграфе не представляется возможным даже перечислить известные типы ПВМС. Поэтому мы назовем только те из них, которые по своим параметрам и возможностям являются наиболее перспективными приборами для систем оптической обработки информации.

Когерентные оптические преобразователи на кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, известные как PROM (Pockels Readout Optical Modulator), а также приборы на кристаллах KD_2PO_4 («Фототитус» и «Титус») используют для модуляции однородного считывающего когерентного пучка света линейный продольный электрооптический эффект (эффект Поккельса).

Электрическое поле, приложенное к кристаллу в направлении распространения считывающего света, изменяет его показатель преломления. В результате амплитуда света, прошедшего через кристалл и скрещенные входной поляризатор и выходной анализатор, зависит от пространственного распределения напряжения, приложенного к кристаллу. Управление же распределением потенциального рельефа осуществляется либо светом, либо электронным пучком.

Не вникая в детали и особенности работы приборов, отметим, что их основные параметры (чувствительность, разрешение) позволяют уже сейчас использовать эти приборы для решения практических задач, таких, как распознавание образов, восстановление акустических голограмм, обработка радиосигналов и др.

В настоящее время разработано большое число различных вариантов ПВМС с термопластическим носителем. На термопластик наносится потенциальный рельеф, соответствующий записываемому изображению. Способы нанесения и образования потенциального рельефа могут быть самые разные, например, с помощью электронного луча. Возможно использование слоистых структур, таких, как фотополупроводник-термопластик, в этом случае поверхностное распределение потенциала создается оптической проекцией изображения. Общим для всех термопластических ПВМС является тепловое проявление. Под действием тепла термопластический

носитель размягчается и его поверхность деформируется под действием электростатических сил. Информация оказывается записанной в виде поверхностного рельефа.

ПВМС с термопластическим носителем имеют высокую чувствительность, хорошее разрешение, просты конструктивно и надежны. Они являются весьма перспективными приборами для практического использования.

Большие успехи достигнуты в разработке ПВМС на основе жидких кристаллов. Жидкими кристаллами называют промежуточное состояние вещества между твердой кристаллической и жидкой изотропной фазами. Жидкие кристаллы изменяют свои оптические характеристики под действием электрического поля. Оптически управляемые транспаранты обычно создаются на основе структуры жидкий кристалл — фотополупроводник. Уже сейчас достигнутые параметры ПВМС на жидких кристаллах по чувствительности, разрешению и инерционности позволяют рассматривать такие устройства, как одни из наиболее перспективных.

- Для обработки одномерных сигналов, например радиосигналов, в основном используются акустооптические ПВМС. Поступающий на вход такого ПВМС электрический сигнал преобразуется в световой в результате модуляции светового пучка, дифрагирующего на ультразвуковой волне, возбужденной сигналом в жидкостном или твердотельном звукопроводе. ПВМС применяются в радиоэлектронике для решения широкого круга задач обработки информации: гармонического спектрального анализа, голографической записи сигналов, согласованной фильтрации, обработки сигналов фазированных антенных решеток. С помощью ПВМС сигнал может обрабатываться по трем координатам: время и две пространственные координаты оптической системы. С их помощью могут быть реализованы алгоритмы обработки, которые практически не возможны в электрических системах. В простейшем случае одно устройство может совмещать в себе несколько десятков параллельных каналов, в каждом из которых осуществляется независимая обработка сигналов.

АКУСТИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Голографические методы регистрации и обработки информации открыли новый подход к получению изобра-

жений акустических полей. Как уже отмечалось, универсальность голографического метода позволяет применять его к любым волновым процессам, в том числе и акустическим. Основная идея акустической голографии заключается в перенесении пространственной модуляции с несущих изображение невидимых акустических волновых полей на световые волны с тем, чтобы сделать их видимыми.

Отметим сразу же трудности, стоящие перед акустической голографией при получении трехмерных изображений. Дело в том, что для восстановления неискаженного изображения размер акустической голограммы должен быть уменьшен в $m = \frac{\lambda_a}{\lambda_c}$ раз, где λ_a и λ_c — длины акустической и световой волн. В противном случае будут искажены предельные размеры восстановленного изображения. Поскольку величина m имеет порядок 10^4 — 10^6 , то восстановленное изображение может оказаться очень маленьким. Если же воспользоваться оптическим увеличением, то вновь возникают продольные искажения. Поэтому получение объемных акустических изображений выглядит несколько проблематичным.

Цель использования голографии в акустике состоит в получении изображений, качество которых выше, чем у изображений, получаемых обычными традиционными методами визуализации акустических полей.

Акустическая голография основывается на тех же принципах, что и оптическая, но она имеет и свои особенности как при регистрации акустических волн, так и при восстановлении изображений. В акустике нет проблемы с когерентными источниками (как это было в оптической голографии), так как практически все акустические источники, используемые для получения изображений, являются когерентными. В связи с тем что скорость распространения акустических волн сравнительно низка, для регистрации информации наряду с квадратичными детекторами, которые чувствительны к интенсивности колебаний, используются и линейные детекторы, реагирующие на амплитуду колебаний. Это позволяет использовать отличные от оптических способы записи акустических голограмм, например, можно отказаться от реальной акустической опорной волны и вводить ее искусственно уже в электрическом канале,

Наличие двух типов детекторов приводит к существованию двух основных способов регистрации акустических голограмм. Первыми появились голограммы на пространственных носителях, чувствительных к интенсивности. В данном случае аналогия с записью оптических голограмм полная. Звуковая волна, прошедшая через объект или отраженная им, вместе с опорной волной падает на регистрирующую среду, на которой и записывается голограмма. Такими средами могут быть фотоматериалы, смоченные проявителем, жидкие кристаллы, термочувствительные носители и т. д. Но наибольшее распространение получила регистрация голограмм на поверхности раздела между жидкостью и газом. На поверхности жидкости под действием акустических волн формируется рельеф, представляющий собой голограмму, которая при освещении ее светом восстанавливает изображение.

Использование линейных детекторов (микрофонов или гидрофонов) предполагает получение информации об акустическом поле в плоскости голограммы другим путем. Если это поле стационарно, то чаще всего используется механическое сканирование по апертуре голограммы. Более высокие скорости формирования голограммы возможны при использовании многоэлементных детекторов. Процесс регистрации голограммы осуществляется в два этапа. На первом этапе звуковая волна преобразуется в электрический сигнал. На втором этапе после обработки, включающей в себя усиление сигнала, имитацию взаимодействия с опорной волной и др., сигнал воспроизводится на ПВМС, с которого и восстанавливается изображение. Возможно также получение оптической копии голограммы путем пересъемки ее с экрана электронно-лучевой трубки.

В акустической голографии чаще используются линейные детекторы, так как они обладают лучшей чувствительностью (чем квадратичные пространственные), позволяют применять различные алгоритмы обработки электрических сигналов.

В настоящее время усилия специалистов направлены на создание голографических систем, позволяющих получить высококачественные изображения акустических полей. Сложность этой задачи заключается в необходимости синтезирования акустических голограмм больших размеров. Обычно размер апертуры должен

быть не менее 100λ , где λ — длина зондирующей волны. Малые апертуры не позволяют получить хорошее разрешение, и кроме того, изображение оказывается зернистым.

Другая сложность состоит в том, что при больших длинах волн поверхность исследуемых объектов представляется зеркально отражающей, это затрудняет интерпретацию полученных результатов. Серьезные трудности связаны и со сложностью исследуемых объектов, для которых характерны многократные внутренние отражения.

Акустическая энергия может распространяться в твердых и жидких средах на большие расстояния без существенного затухания, поэтому акустическая голография может оказать неоценимую помощь геологии и геофизике при исследовании физических свойств и состава веществ, не доступных для непосредственного наблюдения, находящихся на глубине десятков километров ниже поверхности земли.

Акустическая голография позволяет также исследовать строение земной коры, упругие свойства пород, вулканические образования (ходы лавы) и т. д. Отработка методик и создание комплекса аппаратуры для быстрой визуализации акустических полей позволят в будущем обнаруживать местоположение нефтяных слоев, залежей угля, минералов.

В настоящее время в ряде стран мира ведутся интенсивные разработки по созданию акустических голографических систем, пригодных для практического использования и исследования физики моря, морского дна и для гидролокации.

Целесообразность применения методов акустической голографии в неразрушающем контроле и дефектоскопии вытекает из того, что большинство природных веществ и конструкционных материалов непрозрачны для световых волн оптического диапазона, и, следовательно, их внутренняя структура недоступна для визуального наблюдения. Для ультразвука соответственно подобранной частоты сплошная среда непрозрачна; при прохождении ультразвука через вещество за счет взаимодействия с различными неоднородностями (трещинами, раковинами, инородными включениями и др.) на выходе системы может быть зарегистрирована информация о структуре и свойствах исследуемого объекта.

Вследствие относительной безвредности акустических колебаний умеренной мощности перспективно применение акустической голографии в биологии и медицине. Голографическим методом можно получать изображения анатомических структур — костных и мягких тканей, наблюдать функционирование внутренних органов неанатомированных живых объектов, регистрировать патологические изменения внутренних органов и т. п.

Несмотря на сложность задачи, результаты исследований, выполненных в последние годы, позволяют надеяться, что будут найдены решения, позволяющие преодолеть все проблемы, стоящие перед акустической голографией.

РАДИОГОЛОГРАФИЯ

Первые эксперименты по записи голограмм и восстановлению изображений в микроволновом диапазоне волн были проведены в середине 60-х годов. Они представляли собой прямую аналогию методов оптической голографии. Изображения, восстановленные с микроволновых голограмм, были в то время весьма несовершенны. Только после того как удалось существенно снизить шумы и повысить разрешающую способность голограмм, микроволновую голографию начали применять на практике (в антенной технике, в интерферометрических испытаниях изделий без разрушения, для восстановления изображения предметов, скрытых оптически непрозрачным диэлектриком, и др.).

Кроме методов, аналогичных методам оптической голографии, применяются также так называемые квазиголографические методы (синтезирование апертуры, сжатие частотно-модулированных импульсов, обработка сигналов антенной решетки и др.), которые были известны еще до появления микроволновой голографии, но, как впоследствии выяснилось, по существу, являются голографическими по основным идеям и по математическому описанию. Близость этих методов к голографии становится особенно очевидной, когда их реализуют на практике с помощью когерентных оптических устройств. Именно эти методы привлекают к себе в последнее время особое внимание специалистов в области радиоэлектроники.

Особенностью радиоголографии является использование электромагнитных волн сравнительно большой длины. Этим объясняется определенная специфика радиоголографии, прежде всего в области регистрации радиоголограмм и воспроизведения изображений. Следует отметить, что с точки зрения методики радиоголография имеет много общего с акустической голографией.

Технические предпосылки для создания радиоголографических систем имеются уже давно: во-первых, в радиодиапазоне существуют мощные генераторы когерентного излучения, во-вторых, современный уровень развития радиотехники полностью обеспечивает создание радиоголографической аппаратуры.

Регистрация микроволновых голограмм. В микроволновом диапазоне волн голографический процесс, как и в оптическом диапазоне, сводится к двум этапам: к получению и реконструкции голограммы. Меняются только технические средства, используемые на каждом этапе.

Для регистрации микроволновых голограмм применяются непрерывные среды и радиоприемные устройства. Регистрация радиоголограмм при помощи непрерывных сред осуществляется в схемах, подобных оптическим. В качестве непрерывных сред используются пленки холестерических жидких кристаллов, растворы некоторых веществ, тонкие пленки жидкостей, специально обработанные фотоматериалы, фотохромные пленки, люминофоры, пленки антимионда индия и т. п. Оптические свойства названных материалов (цвет, толщина, показатель преломления, плотность почернения, интенсивность свечения) зависят от температуры и могут меняться локально под действием тепла, выделяющегося при поглощении микроволнового излучения. Для регистрации микроволновых голограмм используются матрицы газоразрядных диодов, светящихся под воздействием микроволнового поля.

Оптическая голограмма, необходимая для реконструкции изображения в видимом свете, получается фотографированием поверхности материала в соответствующем масштабе. Некоторые из материалов позволяют реконструировать изображение без промежуточной фоторегистрации голограммы.

При регистрации микроволновых голограмм с помо-

шью радиоприемных устройств волна, рассеянная или излученная объектом, принимается приемной антенной (зондом) и подается на нелинейный преобразователь (детектор). В голографических схемах с радиоприемными устройствами применяются два способа формирования опорной волны. Первый, называемый естественным, при котором опорная волна формируется так же, как и в оптической голографии, и существует в пространстве одновременно с волной, рассеянной объектом, образуя с ней интерференционную картину; второй, так называемый искусственный, при котором в пространстве существует только поле объекта, а опорный сигнал подается в тракт зонда. Опорная волна имитируется путем изменения фазы в тракте опорного сигнала.

В случае непрерывного изменения фазы опорного сигнала образуется голограмма, свойства которой аналогичны свойствам голограммы с естественным формированием опорной волны в пространстве. Фазу опорной волны можно менять дискретно.

Для регистрации микроволновых голограмм применяются системы с одиночным сканирующим зондом и многоэлементные системы.

Голографические методы моделирования и измерения параметров антенн. В антенной технике применение методов голографии оказалось весьма плодотворным. Это не случайно, так как именно для антенной техники характерно преобразование волновых полей, использование опорной фазы — все то, что является сущностью голографии, органически свойственно ей. Развитие радиоголографии стимулировало решение таких важных задач антенной техники, как оптическое моделирование антенн (включая и их синтез), разработка новых эффективных методов измерения параметров антенн в ближней зоне, создание многоканальных антенн с оптической обработкой и т. д. Потребность моделирования микроволновых антенн в оптическом диапазоне вызвана тем обстоятельством, что это чрезвычайно трудно осуществить в радиодиапазоне; кроме того, оптическое моделирование антенн позволяет быстро определить пространственную диаграмму направленности моделируемой антенны. Оптические транспаранты, соответствующие моделируемым распределениям поля вблизи антенн, практически можно записывать только голографическим методом. Весьма пер-

спективны и уже в настоящее время получили распространение голографические методы определения параметров антенн в ближней зоне. Дело в том, что в традиционной схеме измерения характеристик индикаторная антенна должна располагаться в дальней зоне испытываемой антенны. Для остронаправленных современных антенн расстояние до границы дальней зоны может составлять иногда десятки километров. Проводить измерения на таких расстояниях затруднительно, а в некоторых случаях вообще невозможно. Поэтому весьма заманчиво определять требуемые характеристики антенн путем обработки данных измерения ближнего поля антенны. Под ближними понимаются поля, формируемые антенной в зоне Френеля вплоть до полей в непосредственной близости от антенны.

Идея использования для этих целей методов голографии и оптического моделирования антенн заключается в следующем. На некотором расстоянии от антенны регистрируются распределение СВЧ-поля, радиоголограмма, далее изготавливается в определенном масштабе ее оптическая модель, т. е. транспарант (оптическая голограмма), при помещении которой в когерентное световое поле образуется распределение, подобное измеренному. Получаемое поле преобразуется системой линз, расположенных так, что в некоторой плоскости на выходе получается распределение, соответствующее диаграмме направленности. Описанный метод прошел экспериментальную проверку по определению диаграмм направленности антенн, работающих в сантиметровом диапазоне волн.

Перспективным методом измерения параметров антенн в настоящее время является и метод машинного моделирования диаграмм направленности антенн по радиоголограмме поля вблизи антенны. От оптического метода моделирования диаграмм направленности он отличается тем, что обработка результатов измерения поля в раскрыве в радиоголограмме производится на ЭЦВМ.

Радиолокаторы с синтезируемой апертурой (РСА). Принцип синтезированной апертуры лежит в основе получения сверхвысокого разрешения в диапазоне радиоволн.

Небольшая антенна, входящая в состав активной или пассивной радиолокационной системы, принимает

сигналы от объекта по мере взаимного перемещения исследуемого объекта и приемной антенны. Эти сигналы записываются в виде радиоголограммы. Если антенна была установлена на самолете, то угловое разрешение в изображении местности будет определяться длиной пути, пройденного самолетом, а не размерами самой антенны. Радиоголограмма перекодируется в обычную оптическую голограмму, и реконструированное изображение дает детальную картину объекта — земной поверхности.

Разрешение на местности, получаемое в радиолокационных системах с синтезируемой апертурой, сравнимо с разрешением систем аэрофоторазведки. Замечательное свойство метода синтезируемой апертуры заключается в том, что линейное разрешение на местности не зависит от расстояния до радиолокатора, который производит синтезирование.

Метод синтезирования апертуры позволяет создать бортовые голографические радиолокационные системы для получения изображения местности (в том числе и объемного) со сверхвысоким разрешением. С помощью синтезируемой апертуры могут быть созданы наземные голографические радиолокационные системы для получения со сверхвысоким разрешением радиолокационных изображений объектов в воздушном и космическом пространстве, если известны их траектории.

Радиолокаторы с синтезируемой апертурой перспективны в геологии, где они позволяют лучше, чем по аэрофотоснимкам, оценить контрастность различных горных пород, четко выявить структурные сбросы и т. д. Воздушное наблюдение с помощью самолетных радиолокаторов синтезируемой апертуры позволяет получить топографическую и другую информацию обширных труднодоступных областей земли, включая и важную информацию о природных ресурсах. Особое значение приобретают системы РСА для исследования космических объектов. Недавно на «Аполлоне-17» использовался метод синтезированной апертуры при облете Луны для определения профиля лунной поверхности и получения другой информации о лунной поверхности. Синтезирование проводилось на трех волнах: 60, 20 и 2 м. Предполагается с помощью РСА, расположенных на нескольких космических кораблях, картографировать поверхность Венеры. Проводились и будут прово-

даться в дальнейшем исследовании планет методом обращенного синтеза, т. е. путем голографирования вращающейся планеты, перемещающейся относительно Земли. Таким образом, была осуществлена удачная попытка получить высокое разрешение в изображении Венеры в радиодиапазоне.

При работе РЛС на двух несущих частотах можно получить контурное отображение линий равных высот рельефа местности.

Помимо использования радиоголографии для изучения объектов, удаленных на большие расстояния, ее целесообразно применять и для получения изображения объектов, расположенных на малых расстояниях, но скрытых оптически непрозрачными диэлектрическими средами. Например, поиск металлических неоднородностей в неметаллических материалах, грунте и т. д.

Одно из последних применений радиоголографии — определение расположения отражающих участков в тропосфере. В последние годы стало развиваться новое направление, так называемая длинноволновая голография. Ее разновидность — модуляционная голография, основана на использовании СВЧ-модуляции интенсивности светового потока. При этом использование световой несущей на несколько порядков уменьшает необходимое для передачи по каналам связи количество информации о больших объемных сценах.

В заключение этого раздела отметим перспективность голографических методов для обработки собственно радиосигналов.

Например, сжатие радиолокационных импульсов с помощью голографии представляет большой интерес, так как при этом устройства становятся дешевыми и компактными. Использование радиотехнических фильтров весьма актуально при необходимости работ в условиях эффекта Доплера, так как позволяет сравнительно просто реализовать многоканальный фильтр, где каждый из каналов соответствует определенной несущей частоте.

Значительный практический интерес имеет применение голографии для обработки сигнала больших антенных решеток, а также многоэлементных облучателей больших размеров. Это направление представляет прямой интерес для космической связи и навигации.

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ

В последнее время методы реализации голографического процесса или его отдельных частей с помощью ЭВМ сформировались в самостоятельное направление, получившее название цифровая голография. Объективной основой для применения цифровой техники в голографии явилось наличие разработанного математического аппарата описания волновых полей, большого опыта расчета волновых полей на ЭВМ, эффективных методов расчета, в частности алгоритма быстрого преобразования Фурье. При этом возможности цифровой техники позволяют значительно расширить круг преобразований волновых полей, которые не могут быть выполнены чисто оптическими средствами. Цифровая голография позволяет реализовать высокую точность обработки, гибкость изменения параметров и самого алгоритма обработки, осуществить сложные нелинейные и логические операции.

К настоящему времени определились и практические приложения цифровой голографии. Машинные голограммы применяются при оптической обработке изображений в качестве пространственных фильтров для улучшения качества изображений и распознавания образов, в оптическом приборостроении для контроля качества оптических поверхностей. Методы цифровой голографии оказались очень полезными для восстановления изображений в акустической и радиоголографии. Следует заметить, что цифровые методы получения голограмм и восстановления с них изображений широко используются для изучения самих голографических процессов путем моделирования их на ЭВМ. Такой подход к голографическому процессу, подверженному целому комплексу трудноконтролируемых воздействий, позволяет детально исследовать его основные звенья, возникающие эффекты и в конечном счете качество выходного изображения.

Синтез голограммы на ЭВМ осуществляется на основе математической модели предмета, на которой рассчитывается световая волна в плоскости регистрации голограммы:

$$A(x, y) \exp [i\varphi(x, y)],$$

где x, y — пространственные координаты в плоскости

голограммы, A и φ — амплитуда и фаза волны. Проблема заключается в отображении результатов расчетов на некотором материальном носителе.

В принципе возможен прямой способ записи комплексной функции $f(x, y)$ в виде двух транспарантов. На первом записывается $A(x, y)$ в виде изменения амплитудного коэффициента пропускания, а на втором — $\varphi(x, y)$ в виде, например, соответствующего изменения толщины материала транспаранта. Изготовление второго транспаранта очень сложно, поэтому такой метод не получил распространения.

Обратим, однако, внимание на довольно очевидный момент. Если голографируемый объект освещен рассеянным светом, то амплитуда света в плоскости голограммы распределена более или менее равномерно, поэтому почти вся информация от объекта может быть восстановлена лишь со второго транспаранта, на котором записана фаза $\varphi(x, y)$. Такой способ записи фазовой информации получил название киноформы. Киноформа обладает полезным свойством почти весь свет, падающий на него, дифрагировать в изображение. Следует отметить, что киноформа совершенно не похожа на обычную фазовую голограмму, она не имеет точных физических аналогов.

Для записи синтезированной голограммы были предложены оригинальные способы, не требующие изготовления специального фазового транспаранта. Цифровые методы предусматривают дискретизацию в пространстве и квантование по амплитуде обрабатываемых сигналов. Поскольку в голографии надо передать не только действительную, но и мнимую составляющую сигнала, то предложенные способы требуют увеличения числа элементов разрешения носителя. В одном из способов записи синтезированной на ЭВМ голограммы модуль комплексной величины передается размером отверстия на носителе, а фаза — сдвигом этого отверстия относительно узлов некоторой фиксированной решетки. Для этого способа число элементов разрешения превышает количество отсчетов голограммы в NM раз, где N и M — количество уровней квантования амплитуды и фазы соответственно.

Синтез цифровой голограммы обычно заканчивается оптическим уменьшением голограммы, полученной на выходном устройстве ЭВМ.

РЕГИСТРИРУЮЩИЕ СРЕДЫ ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ

Рассмотрим один из важнейших вопросов голографии, который определяет дальнейшее развитие метода и практическую реализацию его применений. Речь пойдет о регистрирующих средах для голографии. Насколько это важный вопрос, можно судить по тому, что почти все наиболее яркие достижения голографии, которые мы имеем на сегодняшний день, связаны с успехами в создании регистрирующих сред.

Традиционными средами для регистрации голограмм являются галогенидосеребряные фотоматериалы. Советскими учеными разработан большой ассортимент голографических фотоматериалов, среди которых можно назвать фотопластинки типа ВРЛ, ПЭ, ЛОИ, а также фото пленки типа ФПГ и ряд других. Эти материалы обладают широкой гаммой характеристик и в основном удовлетворяют специфическим требованиям, предъявляемым голографическим процессам. Фотоматериалы для голографии регистрируют весьма тонкую интерференционную структуру световых волн, поэтому они должны быть особо мелкозернистыми и высокоразрешающими и иметь при этом относительно высокую светочувствительность. Наиболее жесткие требования предъявляются к фотоматериалам, предназначенным для голографирования во встречных пучках. В таких материалах средний размер эмульсионных зерен достигает единиц нанометров, а разрешающая способность — выше $10\,000\text{ мм}^{-1}$. Созданные в нашей стране галогенидосеребряные материалы для изобразительной голографии не имеют аналогов за рубежом, и этот факт является одной из причин, по которой советские голограммы по своему качеству превосходят зарубежные.

В последние годы получен ряд важных результатов в области изыскания, исследования свойств и использования новых сред для регистрации голограмм. На этих средах возможна регистрация качественных голограмм с высокой дифракционной эффективностью. Ценным свойством ряда таких материалов является возможность многократной перезаписи информации. Отсутствие фотохимической обработки позволяет использовать некоторые из них практически в реальном времени.

Такие среды, как оптические кристаллы, термопла-

стические, фотохромные и магнитооптические материалы, жидкие кристаллы, фоторезисты и ряд других, уже нашли применение в голографии, многие находятся на стадии исследования.

Широкое внедрение новых регистрирующих сред зависит от того, насколько полно будут удовлетворены предъявляемые к ним требования, среди которых достаточная светочувствительность, длительное хранение информации, возможность многократной записи и стирания, достаточно простая технология изготовления материала и т. д.

По-видимому, не следует ожидать, что может быть найден один материал, оптимальным образом удовлетворяющий всем требованиям одновременно. Однако в зависимости от того, насколько близко удастся приблизиться к поставленной задаче, будет зависеть дальнейший прогресс в голографии.

ЛИТЕРАТУРА

- Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970.
Кольер Р. Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М., «Мир», 1973.
Голография. Методы и аппаратура. Под ред. В. М. Гинзбург и Б. М. Степанова. М., «Сов. радио», 1974.
Островский Ю. И. и др. Голографическая интерферометрия. М., «Наука», 1977.
Ярославский Л. П., Мерзляков Н. С. Методы цифровой голографии. М., «Наука», 1977.
Оптическая голография и ее применения. Под ред. В. М. Гинзбург и Б. М. Степанова. М., «Сов. радио», 1978.
Гуревич С. Б. и др. Передача и обработка информации голографическими методами. М., «Сов. радио», 1978.

Лев Давидович Бахрах
Геннадий Андреевич Гаврилов

ГОЛОГРАФИЯ

Гл. отраслевой редактор В. П. Демьянов. Редактор К. А. Кутузова. Мл. редактор Н. А. Львова. Обложка художника В. И. Кузьмина. Худож. редактор Т. С. Егорова. Техн. редактор А. М. Красавина. Корректор В. В. Каничкина.
ИБ № 1690

Т 07949. Индекс заказа 94006. Сдано в набор 12.03.79 г. Подписано к печати 7.05.79 г. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 1. Бум. л. 1.0. Печ. л. 2.0. Усл. печ. л. 3.36. Уч.-изд. л. 3.44. Тираж 47 060 экз. Издательство «Знание». 191835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 481. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 34.
Цена 11 коп.

