

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

535.4

ГОЛОГРАФИЯ *)

Д. Габор, У. Кок, Дж. Струок

Голография, которую иногда называют трехмерной**) безлинзовой фотографией, представляет способ «замораживания» (freezing) световой волны в фотопластинке с помощью дополнительного (опорного) пучка и ее восстановление при освещении лазерным или белым светом. Объект воссоздается трехмерным одноцветным или в своих естественных цветах. Две волны могут быть «заморожены» поочередно, а восстановлены одновременно. Это позволило на основе голографической интерферометрии разработать новый способ исследования вибраций и напряжений.

Голография представляет новый метод фотографического хранения информации, позволяющий записывать несколько сотен изображений в эмульсии, в то время как в обычной фотографии записывается только одно. Другие применения голографии касаются способа и характера распознавания, новых методов микроскопии, изготовления спектроскопических решеток чрезвычайно высокого качества, улучшения несовершенных фотографий, наблюдения через турбулентную среду, объединения изображений отсутствующих объектов, новых методов кассетного телевидения (которое имеет преимущество благодаря нечувствительности голограмм к царапинам и пыли) и кинопроекции трехмерных изображений.

Принципы голографии применимы к волновым явлениям больше, чем к корпускулярным. Микроволновая голография успешно развивалась уже в течение длительного времени, когда была открыта звуковая голография. Возможным ее применением может быть новый, похожий на рентгеновский, ультразвуковой звукорадиограф для использования в медицинской диагностике.

Голограмма представляет фотографическую запись интерференционной картины, образованной на фотографической пластинке при интерференции двух групп когерентных лазерных световых волн. Одна из этих групп действует как опорная волна, а другая (когерентная) отражается для записи от объекта (рис. 1, а и 2, а). Когда эта фотографическая запись будет проявлена и снова освещена лазерным светом опорного пучка,

*) Dennis G a b o r, Winston E. K o c k, George W. S t r o k e, Holography, Science 173 (No. 3991), 11 (1971). Перевод В. Е. Прокопенко.

Доктор Д. Габор — научный руководитель лабораторий CBS в Стэмфорде, Коннектикут, доктор У. Кок — вице-президент и ведущий ученый «Бендикс корпорейшн» в Саутфилде, Мичиган, доктор Дж. Струок — директор электрооптической научной лаборатории Университета штата Нью-Йорк, Стоун-Брук, и приглашенный профессор Гарвардского университета.

**) Термин «трехмерный» используется в статье применительно к изображению (или процессу, в котором оно формируется) и выражает пространственную идентичность с оригинальным объектом.

наблюдателю представится первоначальный объект в виде восстановленного изображения (рис. 1, б и 2, б). Это изображение оказывается настоль-

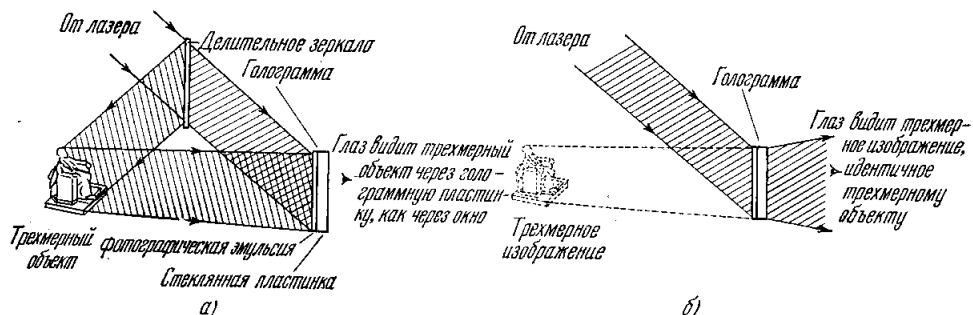


Рис. 1. Схемы записи голограммы (а) и восстановления голографического изображения (б).

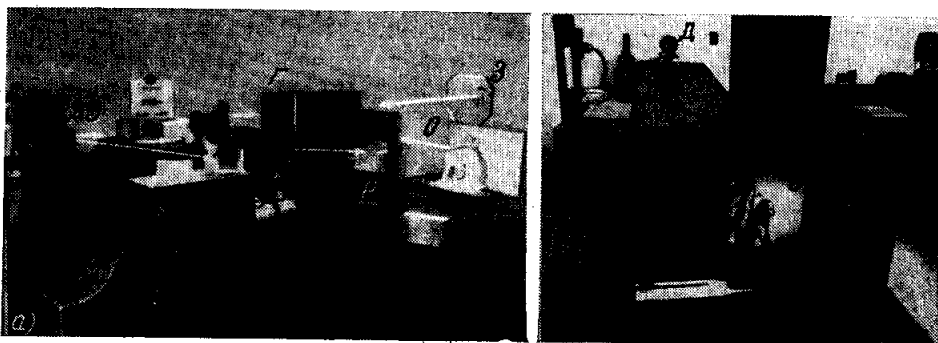


Рис. 2. а) Экспериментальная установка для записи трехмерных голограмм; б) изображение, наблюдаемое через голограмму Г, записанную в установке а) (по 1а). Л — лазер, ДЗ — делительное зеркало, З — зеркало опорного пучка, Р — рассеиватель для диффузного освещения объекта О, Г — голограмма (фотографическая пластинка).

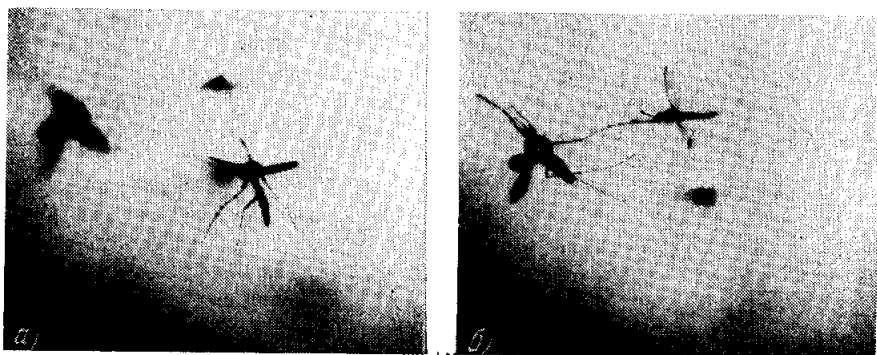


Рис. 3 Восстановление с помощью гелий-неонового лазера голограммы полета москитов, полученной в изучении рубинового лазера с модулированной добротностью. При пересъемке картин а) и б) фокусировка репродукционной камеры отличалась на 60 м.м, 1/2. (Воспроизводится с согласия Р. Вюркера и его сотрудников; TRW Systems.)

ко реалистичным, что наблюдателю хочется потянуться и дотронуться до объекта съемки. Голограмма (фотографическая пластинка) подобна окну, за которым снимаемый объект виден во всей своей глубине. Наблю-

датель может смотреть через нее в любом направлении. Для того чтобы заглянуть за объект, находящийся на переднем плане, он просто поднимает голову или сдвигает ее влево или вправо. На рис. 3 показаны две другие фотографии (два вида) через освещенную лазером голограмму; если сфокусировать объектив через голограмму, то можно сделать резкой интересующую часть рассматриваемой картины.

Габор предложил голографию в 1947 г.^{2а} и в то же время ввел слово «голограмма», от слов «holo» (полный) и «gram» (сведения). К сожалению, адекватный источник специального когерентного света, необходимый для демонстрации всех возможностей голографии, в то время отсутствовал, и в течение многих лет только скромные результаты подтверждали эту идею. В 1963 г. Лейт и Упатниекс использовали в голографии лазер³, последовавшие результаты, полученные Лейтом и Строуком (см. 1а), с их сотрудниками, привели к громадному ускорению развития голографии, ускорению, в основе которого лежала своеобразная схема работы Лейта и Строука (Мичиганский университет в Энн-Арборе *).

КОГЕРЕНТНОСТЬ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Световые волны, генерируемые лазером, необычны тем, что они чрезвычайно регулярны, и тем, что они являются в высшей степени монохроматическими волнами (одна длина волны). Лазерный свет очень когерентен, и поэтому интерференционные эффекты между прямым пучком света и светом, отраженным от объекта, легко наблюдаемы. Когда одна группа когерентных волн встречается со второй группой таких же волн, наблюдаются эффекты сложения (усиление интерференции) и эффекты вычитания (гашение интерференции).

ПОЛУЧЕНИЕ ГОЛОГРАММ

Две группы световых волн интерферируют, образуя голограмму (рис. 1). Одна группа волн — отражаемая сценой (очень сложная группа), другая — опорная волна (обычно простая группа плоских волн). При восстановлении ранее зарегистрированной сцены проявленная фотографическая пластинка (голограмма) освещается плоской волной света, аналогичной опорной, под тем же углом, который был при получении голограммы. На рис. 1, а свет от одного лазера используется одновременно для освещения сцены (трехмерный объект) и в качестве плоских опорных волн (в верхней части рисунка). После экспозиции фотографическая пластинка проявляется и фиксируется. В результате получается голограмма. Если голограмму осветить первоначальной опорной волной, как на рис. 1, б, то наблюдатель увидит объект в трех измерениях.

Простым примером фотографически записанной интерференционной картины, с помощью которой можно воссоздать изображение первоначальной сцены, является выполненная фотографическим способом решетка. Такая решетка может быть получена записью суммарного действия двух групп когерентных плоских волн, как показано на рис. 4, а. Усиление волн наступает в тех местах фотографической пластинки, где амплитуды групп волн *A* и *B* складываются (обозначено ++). Гашение волн происходит в тех местах, где максимум одной волны складывается с минимумом (—) другой (обозначено +—). В тех местах, где происходит увеличение интенсивности света, пластинка оказывается проэкспонирована более сильно, и параллельные полосы в эмульсии в этом случае представляются

*) Отдельные места этой статьи и несколько рисунков заимствованы из книги 4а.

как фотографическая решетка. Если решетку осветить горизонтально распространяющейся плоской волной (рис. 4, б), то часть энергии волны пройдет через нее, не изменяя направления (компонента нулевого порядка), другая же часть энергии отклонится (дифрагирует) как вверх, так

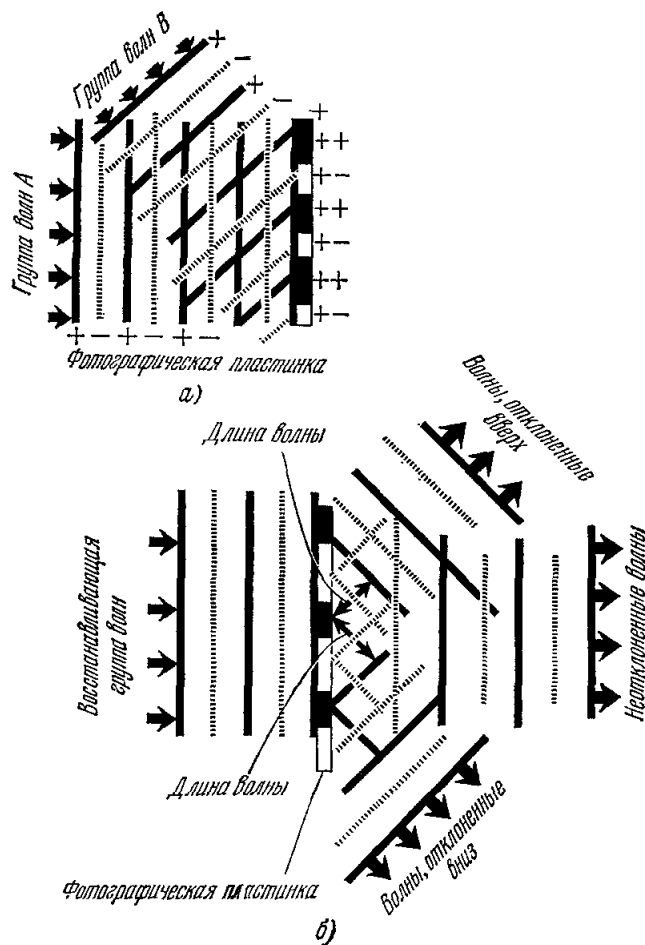


Рис. 4. а) При наложении двух групп монохроматических плоских волн наступает интерференция (в местах совпадения максимумов и минимумов волн претерпевает изменения; в местах, где максимум одной волны совпадает с минимумом другой, происходит гашение волны). б) Если линейную структуру, записанную по схеме а), освещать горизонтально распространяющейся, аналогичной опорной группой плоских волн, то на выходе голограммы образуются две группы отклоненных и одна группа неотклоненных плоских волн (одна из отклоненных групп волн распространяется в том же направлении, в котором приходила опорная группа волн) (по^{4а}).

и вниз (дифракционные компоненты 1-го порядка). Дифрагированный вниз пучок на рис. 4, б сохраняет точное направление первоначального пучка В на рис. 4, а, который участвовал в формировании решетки. Соответственно наблюдателю, находящемуся внизу справа от рис. 4, б и, следовательно, на пути этих восстановленных волн, будет казаться, что источник, который генерировал первоначальный пучок В на рис. 4, а, все еще находится за фотографической решеткой (голограммой). Следовательно, голограмма способна регенерировать зарегистрированные вол-

ны после того, как их первоначальный источник прекратил существование. Голографическую решетку может также образовать лазерный свет, исходящий из двух соседних «точечных» источников. Если один из «точечных» источников заменить более сложным «объектом», голограмма все еще остается решеткой, хотя и отчасти более сложной формы. В действительности голограмма теперь представляет суперпозицию решеток, по одной для каждой «точки» объекта (сцены). Примером этого является безлинзовая голограмма Фурье ^{1а} слова *holography* на рис. 5.

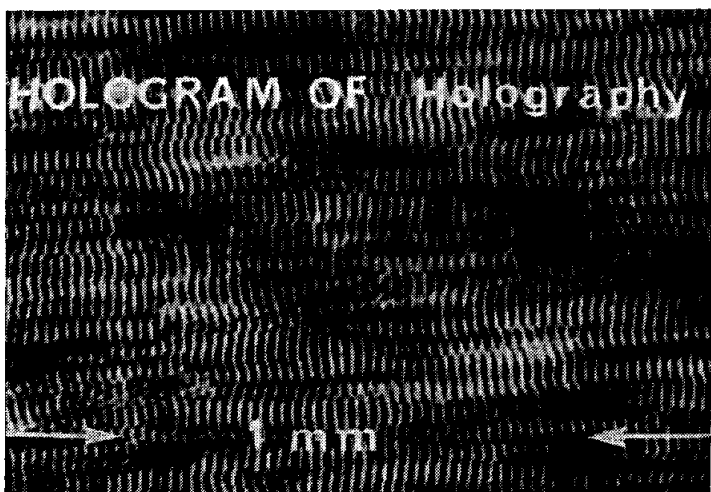


Рис. 5. Голограмма слова *holography*, записанная методом безлинзового фурье-преобразования (по 16).

Интерференционные полосы, характеризующие голограмму, записаны от точечного опорного источника, расположенного вблизи объекта, имеющего решетчатую структуру. Полосы имеют достаточно большой период (около 80 полос на миллиметр), получены на расстоянии 600 мм от объекта с источником, расположенным примерно в 15 мм от объекта.

Вторым примером фотографически записанной интерференционной структуры, которая может воссоздавать первоначальное изображение, является интерференционная структура, образованная при взаимодействии плоской и сферической волн. Вновь наблюдается сложение и вычитание частей волны, но теперь образуется круговая структура и запись получается идентичной хорошо известной оптической зонной пластинке ⁵. Фотографическая запись такой интерференционной структуры приведена на рис. 6. Если эту круговую структуру осветить плоскими волнами, то вновь будут генерироваться три группы волн. На рис. 7, иллюстрирующем это явление, показана фотографически сделанная зонная пластинка, воссоздающая три изображения белого квадрата ⁶.

Полный двухступенчатый процесс получения и восстановления голограммы зонной пластинки показан на рис. 8. Здесь булавочное отверстие в непрозрачной карточке слева является как бы объектом съемки (точечным источником сферической волны). На фотографической пластинке сферическая волна интерферирует с плоской опорной волной, приходящей слева. Записывается верхняя часть круговой интерференционной структуры, и если эту фотографическую зонную пластинку проявить и отфиксировать, а затем расположить, как показано на рис. 8, б, на пути плоских волн, аналогичных опорным, то в сопряженной фокальной точке F_c образуется изображение (мнимое) светового источника в виде исходного була-

вочного отверстия. Наблюдателю сверху справа будет казаться, что он видит свет исходящим из булавочного отверстия. (Действительное изображение, которое образуется в действительной фокальной точке F , не используется при обычном наблюдении голограмм.)

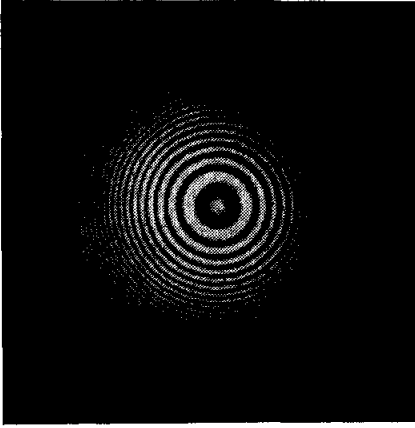


Рис. 6. Фотография интерференционной картины, образованной при взаимодействии когерентных плоской и сферической волн, имеет очень большое сходство с зонной пластинкой.

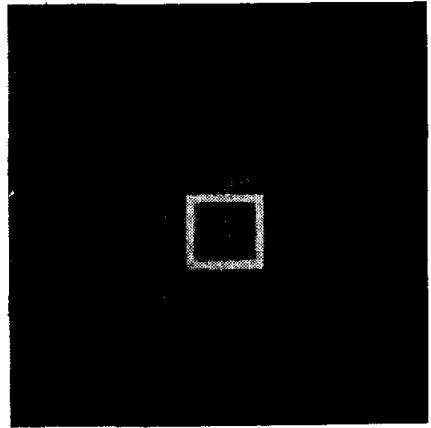


Рис. 7. Эффект совмещенных изображений, получающийся при взаимодействии образованных зонной пластинкой сходящейся и расходящейся волн (по ^{4a}).

Для получения этой фотографии использовалась зонная пластинка диаметром 5 см, полученная в результате интерференции на фотографической пластинке сферической и плоской волн. Объект изображения — белая квадратная рамка — показан в центре. Зонная пластинка сдвигалась относительно оси для частичного разделения трех компонент. Одно из двух слабоосвещенных изображений образовано сходящимся пучком волн зонной пластинки, другое — расходящимися волнами. Если бы зонную пластинку продолжали сдвигать дальше, то три дифрагированные компоненты были бы полностью разделены.

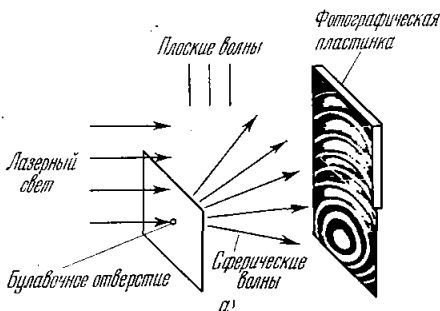
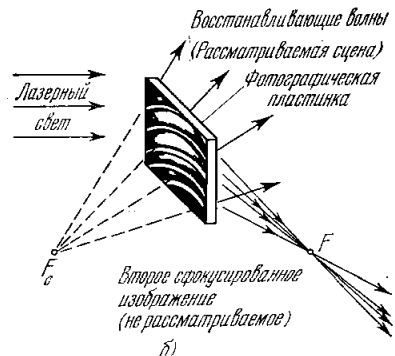


Рис. 8. Круговые интерференционные полосы, образующие зонную пластинку, создаются при интерференции плоских волн, приходящих слева, и сферических волн, выходящих из булавочного отверстия (по ^{4a}).

Если часть интерференционной картины записать на фотографическую пластинку, то получится голограмма. При ее освещении будут генерироваться волны, а восстановленное изображение будет казаться находящимися на первоначальном месте булавочного отверстия.



Представим, что первоначальный объект съемки на рис. 8 состоит не из одного булавочного отверстия, а из нескольких точечных источников

света, каждый из которых расположен на различной высоте и на различном расстоянии от фотографической пластинки. Тогда каждый из этих источников в сочетании с плоскими опорными волнами образует свою собственную зонную структуру на фотографической пластинке, а при повторном освещении вверх будет излучаться несколько групп волн.

Аналогично будут сформированы мнимые изображения каждого исходного булавочного отверстия, так что наблюдателю будет казаться, что он видит несколько точечных источников света, расположенных в прежнем порядке и занимающих прежнее положение в пространстве.

В любом объекте съемки, который освещается лазерным светом, всегда имеются точки, которые являются источниками отраженного света. Каждую отражающую точку можно рассматривать как точечный источник лазерного света. При наличии опорной лазерной волны каждый источник может формировать на соответствующим образом расположенной фотографической пластинке свою собственную зонную структуру. Суперпозиция всех этих зонных пластинок образует, конечно, очень сложную интерференционную структуру, но после того, как эта зарегистрированная голограмма будет проявлена, отфиксирована и повторно освещена, будет наблюдаться восстановление изображения (подобно тому, как изображено на рис. 8). Свет будет дифрагировать на совокупной зонной структуре, так что все зарегистрированные источники света сохраняют свое прежнее местоположение. При этом обеспечивается полная иллюзия реалистичности и объемности первоначальной сцены.

СВОЙСТВА ГОЛОГРАММ

Голограммы отличаются от обычных фотографий в нескольких отношениях. При обычной фотосъемке темные и светлые места негативного изображения соответствуют светлым и темным местам позитивного изображения снимаемого объекта. Позитивные и негативные варианты обычной голограммы будут восстанавливать совершенно идентичные трехмерные изображения. Эта особенность является следствием подобия между голограммами и зонными пластинками; свойства зонных пластинок остаются неизменными, если темные (непрозрачные) и светлые (прозрачные) области на них поменять местами. Второе отличие голограмм от фотографий заключается в необходимости фотопластинки. Если обычную голограмму рассматривать на свету, то, в противоположность фотографическому негативу, она представится в виде обычного серого листа, на котором с трудом можно будет рассмотреть какие-то структуры, ничего общего с изображением зарегистрированного объекта съемки, не имеющие.

Следующее отличие между голографией и фотографией состоит в том, что в голографии изображение всего объекта съемки можно восстановить даже с части голограммы.

Рис. 9 иллюстрирует, как это происходит.

Показана зонная пластинка $ABCD$, после прохождения которой часть энергии излучения фокусируется в точку f , а другая часть расходящимся пучком распространяется вверх от f_c . Но если даже использовать меньшую часть $ABCD$, то по-прежнему часть энергии будет сходиться в точке f , а другая — расходиться от f_c . Это свойство объясняется тем, что голограмма представляет суперпозицию многих зонных пластинок. Следствием использования для восстановления малой части голограммы является уменьшение разрешающей способности и отношения сигнала к шуму.

При получении первых лазерных голограмм Лейт и Упатниекс использовали призму для обеспечения интерференции опорной волны с волнами, отраженными от объекта³. Эти голограммы обычно называются двухпучковыми или внеосевыми. В первоначальной габоровской схеме использовался единственный пучок света, а свет, который проходил вне объекта, использовался в качестве опорной волны. Габоровская однопучковая схема может также обеспечивать разделение двоек изображений, если запись голограммы делается соответствующим образом⁷. Установка на рис. 8 работает по такой схеме.

Можно показать^{1а}, что период d интерференционной картины голограммы определяется соотношением $d = (\lambda/2) \sin(\alpha/2)$, где α — угол между средним направлением объектного пучка

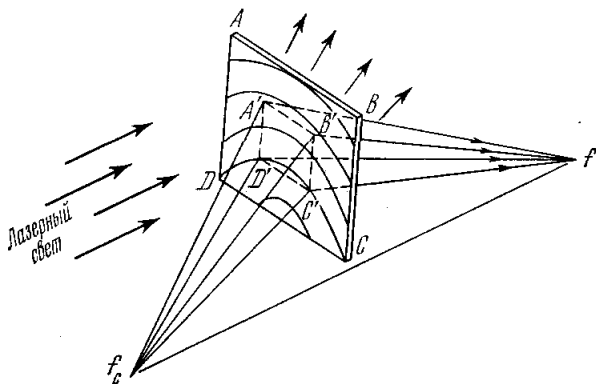


Рис. 9. Для восстановления изображения всей сцены достаточно части голограммы (по 4а).

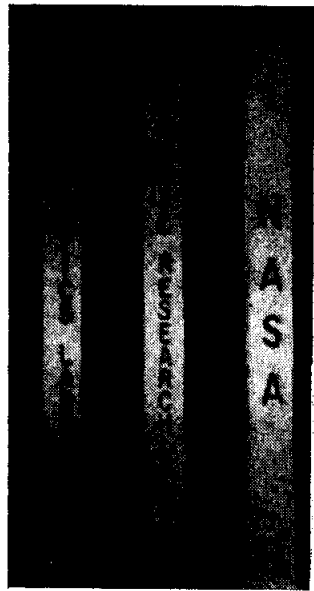


Рис. 10. Фотография, полученная с помощью камеры, использующей 5-см зонную пластинку рис. 7 в качестве единственной линзы (по 4а).

с направлением опорного пучка, а λ — длина волны света. Вследствие малости длины световой волны для записи интерференционной структуры требуются фотопленки с высокой разрешающей способностью. При получении большинства голограмм используются внеосевые опорные пучки, а периоды зон, при больших углах между опорным и объектным пучками, приближаются к длине волны света. Для длины волны лазера (гелий-неонового) в рассматриваемом случае на миллиметр уложится примерно 1500 таких периодов. К счастью, имеются специальные фотопленки с высоким разрешением, с помощью которых можно решить эту задачу.

Голограмма зонной пластинки может действовать⁶ как линза (рис. 10). Фотографически сделанная зонная пластинка (голограмма) может использоваться в качестве легкой линзы в различных применениях, таких, как космическая связь, астрономия и исследование космоса. Для таких применений зонную пластинку можно выполнить фотографическим путем на тонком, легком листе пластика, который может укладываться в небольшую кассету на корабле, а после его выхода в космос полностью разворачиваться. Они могут использоваться для фокусировки пучков в лазерной связи или применяться в качестве легких фотографических линз⁸.

РЕАЛИЗМ ТРЕХМЕРНОСТИ

Иллюзия трехмерности, обеспечиваемая голограммой, очень наглядна, и наблюдатель ясно осознает, насколько больше информации о регистрируемом объекте несет голограмма по сравнению с другими фотопроцессами, такими, как стереофотография или трехмерные растровые фотографии. При восстановлении голограммы, как мы видели на рис. 3, наблюдатель может рассматривать трехмерный объект не с одного направления, как в стереофотографии, а с многих направлений, и способен аккомодировать глаз на любых частях объекта.

Наблюдатель, смотрящий через голограмму, обычно старается сдвигать голову в сторону или вверх и вниз, чтобы наблюдать эффект, называемый параллаксом. В реальной действительности кажется, что более удаленные объекты движутся вместе с наблюдателем, в то время как ближние — нет. Этот эффект особенно заметен человеку, едущему в поезде: близко расположенные опоры телефонной линии быстро сдвигаются назад, в то время как далекие горы кажутся перемещающимися вперед вместе с едущим. Таким образом, параллакс, присущий голограмме, составляет одно из наиболее убедительных доказательств объемности восстановленного изображения. Если включить линзу в схему записи⁹, то можно наблюдать другой пример реалистичности голограммы. В этом случае при боковом движении наблюдателя, движении вперед или назад по отношению к голограмме, наблюдается ожидаемое увеличение или уменьшение объекта, расположенного за линзой.

На демонстрационных голограммах часто записывают хрустальные объекты в соответствующем окружении. В реальных условиях блики света отражаются от хрусталя, и эти блики то появляются, то исчезают по мере того, как наблюдатель смещает свою голову. Этот эффект также присущ восстановленному с голограммы изображению и особенно важен тем, что иллюстрирует наличие зеркального отражения у зеркалоподобных объектов при освещении их когерентным коллимированным излучением. Это явление также характерно для многих объектов, когда они рассматриваются в ультразвуковом излучении методом звуковой голографии.

Другое интересное применение линз в голографии было предложено Розеном¹⁰ в 1966 г. По его методике, часто называемой голографией сфокусированного изображения, голограмма, воссоздающая действительное изображение группы объектов, располагается за линзой. Фотографической пластинкой может даже осуществляться продольное смещение действительного изображения реального объекта, так что изображение одного объекта может располагаться за фотографической пластинкой, а изображение другого объекта — впереди голограммы. Когда эта голограмма будет проявлена и соответствующим образом освещена, наблюдатель увидит один объект за голограммой, а другой — висящим в пространстве впереди голограммы¹¹.

ПСЕВДОСКОПИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО
ИЗОБРАЖЕНИЯ

Мы видели, что голографические зонные пластинки могут функционировать как собирающие линзы и что образуемые ими действительные изображения могут быть зарегистрированы фотопленкой подобно тому, как их может зарегистрировать камера с объективом. Восстанавливаемое с голограммы действительное изображение сцены может быть замечено при помещении белой карточки в фокальную область (f на рис. 8). Если регистрируемая сцена трехмерна, то восстановленное с голограммы

действительное изображение также трехмерно, но будет значительно отличаться от формируемого линзой истинного вида той же самой трехмерной сцены (рис. 11). Если объект смещается влево от фокальной точки линзы, например от точки B к A (рис. 11, а), то положение восстановленного изображения также смещается влево, т. е. от точки B' к точке A' . В этом сформированном линзами изображении объекты A' и B' сохраняют такое же взаимное положение по отношению к наблюдателю справа, как и реальные объекты A и B .

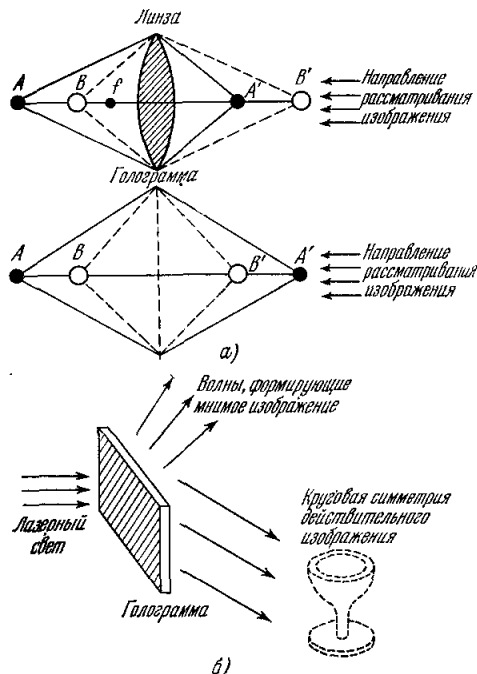


Рис. 11. Диаграммы, иллюстрирующие явление псевдоскопичности (по 4а).

а) Изображения объектов, формируемых линзами, сохраняют свое первоначальное взаимное положение. При получении голограммы каждый объект формирует свою собственную зонную пластинку. В процессе восстановления действительное и мнимое изображения оказываются эквидистантными относительно голограммы. Кроме того, наблюдается явление псевдоскопичности, или «выворачивания», изображения. б) Круговое симметричное изображение, образующееся впереди голограммы, очень реалистично, несмотря на псевдоскопичность, характерную для действительного голографического изображения.

же взаимное положение по отношению к наблюдателю справа, как и реальные объекты A и B .

Для голографического действительного изображения это не так. В процессе записи светлый объект A формирует свою собственную зонную пластинку, которая после проявления и освещения воссоздаст действительное изображение в эквидистантной точке A' . Аналогично, объект B создаст собственную зонную пластинку, которая сформирует его действительное изображение в эквидистантной точке B' . Для наблюдателя справа действительные изображения объектов, реально находящихся на заднем плане, оказываются на переднем плане, и наоборот. Это взаимное изменение положения ближних и удаленных объектов на обратное называется псевдоскопией, а изображение называется псевдоскопическим. Так как такое изображение достаточно необычно, часто голографическое действительное изображение не используется для наблюдения. Однако в одном эксперименте для целей голографирования использовался полностью симметричный объект (фужер для шампанского *). При восстановлении этой голограммы наблюдатель видит действительное изображение, расположенное впе-

реди голограммы, как показано в правой части рис. 11, б. Из-за симметрии фужера замена его ближних деталей дальними и наоборот не имеет значения, и наблюдателю представляется нормальное, не псевдоскопическое изображение.

Такое же преобразование изображения можно осуществить и другими путями, например голографией сфокусированного изображения, о которой мы говорили выше. Следующая возможность заключается в получении второй голограммы с псевдоскопического действительного изображения и повторном восстановлении изображения. В этом случае действительное изображение второй голограммы получается дважды псевдоскопичным

*) Эта голограмма, полученная Н. Мэсен и Э. Шампанем из «KMS Industries», была показана на заседании секции Американского оптического общества в Энн-Арборе, Мичиган, 27 января 1968 г.

(дважды обращенное изображение), что эквивалентно обычному изображению. По этой методике в качестве объекта съемки можно использовать любые сцены, в том числе и несимметричные ¹².

ГОЛОГРАФИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЕ

Голограммы обеспечивают наблюдателю большой объем информации о снимаемой сцене, в том числе информацию о ее объеме. Этот громадный объем информации, к сожалению, ограничивает использование голограмм во многих интересных случаях. К ним следует отнести объемное кино и объемное телевидение, которые значительно выигрывали бы в реалистичности при использовании голограмм. Большой объем информации, содержащийся в голограмме, — следствие наличия чрезвычайно мелких деталей в ее интерференционной структуре. Эти детали (примерно 1500 линий на миллиметр) значительно превышают возможности современных телевизионных систем, которые воспроизводят значительно более грубые линейные структуры. В соответствии с этим перспектива использования голограмм в телевидении остается все еще неясной.

Предложено несколько методов уменьшения объема информации голограммы без существенной потери ее наиболее ценных свойств, ^{46, 2}, но этот путь очень сложен. Телевизионное изображение в США имеет примерно 500 вертикальных линий и 500 горизонтальных точек. Одно телевизионное изображение, которое соответствует одному кадру транслируемого фильма, соответственно содержит объем информации в $(500)^2$ или 250 000 точек. Голограмма площадью 200 мм² (8 дюймов²) с ее множеством наложенных друг на друга зонных решеток требует разрешения в 1500 интерференционных полос (линий) на миллиметр, что эквивалентно произведению 1500 на 200, или 300 000 вертикальных линий и 300 000 горизонтальных точек с суммарным объемом информации, соответствующим 90 миллиардов точек. Отношение между потенциальным объемом информации, содержащемся в голограмме площадью 8 дюймов², и тем, которое заключено в телевизионном изображении США, относится как 360 000 : 1. Разработка метода уменьшения информации голограммы до приемлемого для телевидения объема будет представлять замечательное достижение.

МИКРОВОЛНОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Хотя габоровская концепция оптической голографии, предложенная им в 1948 г., почти не развивалась до 1963 г., когда исследователи Мичиганского университета Лейт, Упатниекс и Строук проявили инициативу, приведшую к обширным исследованиям во многих странах мира, тем не менее другая электромагнитная форма голографии привлекла к себе пристальное внимание еще в 50-х годах. Значение этого открытия, известного как радиолокационная станция с синтезированной (когерентной) антенной, впервые исследованной Катроной и его группой в Мичиганском университете ¹³, было признано сразу же.

Впрочем, до недавнего времени связи между когерентной радиолокационной станцией и голографией не признавали ^{47, 14}, но несколько понятий, впервые примененных в радиолокационной станции бокового обзора, позднее были использованы в голографии. Наиболее важное из них — схема, в которой используется дополнительный пучок (в голографии это относится к двухлучевой схеме записи).

На рис. 12 приведена часть записи когерентной радиолокационной станции (форма микроволновой голограммы). Сильно отражающие точки на местности образуют одномерную структуру зонной пластинки (вместо-

обычной двумерной пластинки оптических голограмм), которая появляется в нижней центральной части экрана регистрирующего устройства ^{4д}.

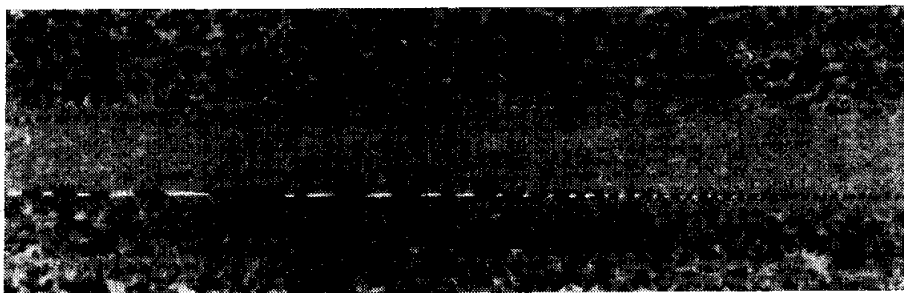


Рис. 12. Фотографическая запись сигнала с синтезированной антенны радиолокационной станции.

Как и в случае оптической голограммы, при освещении этой микроволновой голограммы когерентным светом восстанавливается изображение местности. Сильно отражающие объекты генерируют отчетливую одномерную зонную пластинку внизу центральной почти пустой зоны. (Воспроизводится с согласия Л. Катроны и др. ¹³.)

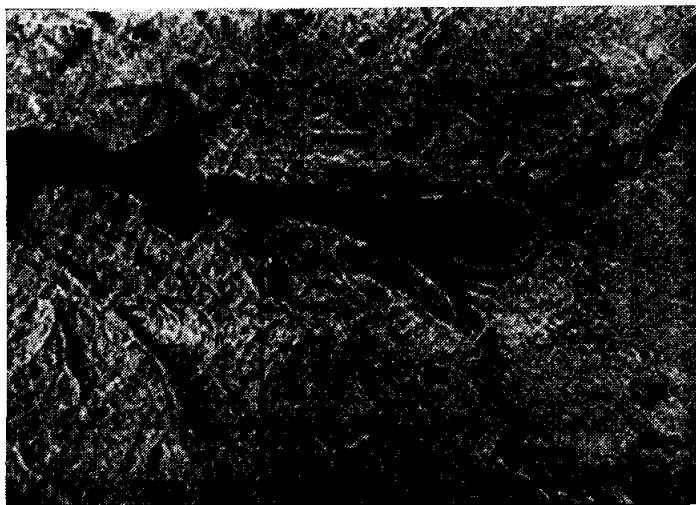


Рис. 13. Фотография Вашингтона, полученная при освещении лазерным светом осциллограммы микроволновой голограммы (такой же, как на рис. 12, записанной по методу, предложенному в работе ^{4в}). (Воспроизводится с согласия Л. Катроны и др. ¹³; см. также г-е, ¹⁴.)

Восстановленные изображения, по качеству не уступающие лучшим фотографиям, получаются с помощью этой радиолокационной станции даже в том случае, когда облака или туман уменьшают видность исследуемой местности ^{4е}; пример этого ¹³ приведен на рис. 13.

ОБЪЕМНЫЕ ГОЛОГРАММЫ

В 1962 г. советскому физiku Денисюку пришла замечательная мысль объединить габоровскую голографию с липпмановской цветной фотографией ¹⁵. Г. Липпман в 1894 г. впервые получил чрезвычайно мелкозернистую фотографическую эмульсию с зернами бромида серебра, меньшими

длины волны света. Затем он опускал такую пластинку в камеру подложкой кверху, до соприкосновения эмульсии с ртутью, выполняющей роль зеркала. Эффект был одним из наиболее значительных во всей истории оптики. Световые волны, падающие на пластинку спереди, интерферируют с волнами, отраженными зеркалом сзади, и образуют группу стоячих волн, параллельных зеркалу, с пучностями, разнесенными на половину длины волны. Очень мелкие зерна серебра выкристаллизовывались

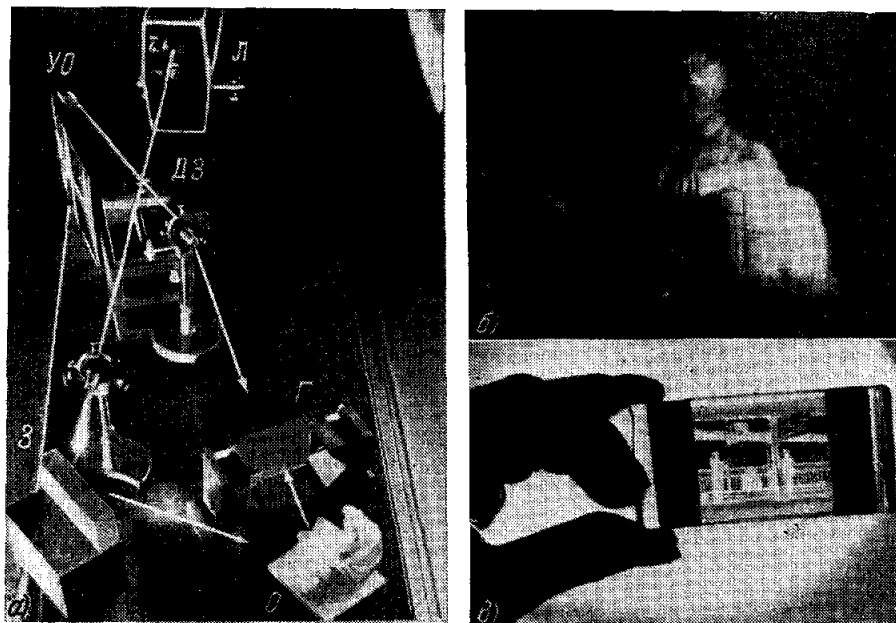


Рис. 14. а) Первоначальная установка, использованная Строуком и Лабейри в 1965 г. для записи объемных голограмм (трехмерное изображение могло быть восстановлено при освещении голограмм обычным белым светом даже лучше, чем при лазерном освещении, ранее требовавшемся для визуализации голографических изображений; УО — угольный отражатель; З — зеркало; остальные обозначения те же, что и на рис. 2). б) Изображение модели статуи Линкольна—первое полученное изображение этого рода (источник белого света был широкополоснее источника, который обеспечивал резкие изображения; по 17). в) Объемная голограмма, воссоздающая при освещении отраженным белым светом цветное изображение, внешне похожа на черно-белый негатив при рассматривании в проходящем свете. (Эксперименты выполнялись М. Хиллом (Нью-Джерси), Л. Лином, К. Пеннингтоном, Дж. Строуком и А. Лабейри в лабораториях фирмы «Белл»).

в пучностях. Каждый из этих липпмановских слоев отражал свет немного, но их суммарный эффект усиливался от одного слоя к другому, если все эти волны были в фазе и все это наблюдалось для исходного цвета (длины волны). Поэтому говорят, что липпмановские пластинки выбирают из белого света первоначальный цвет и только его отражают в заметной степени. Еще более поразительно то, что они в точности воспроизводят исходные цвета, поскольку каждый цвет отражается от собственного набора липпмановских слоев, действующих аддитивно без влияния друг на друга^{16а}. В 1962 г. Ван-Хирден обратил внимание на огромный резерв возможностей толстых эмульсий.

Идея Денисюка состояла в объединении липпмановского процесса с голографией путем замены отраженной волны опорной волной, падающей

с обратной стороны эмульсии. Объектная волна и опорная волна вновь образуют стоячие волны, но уже не так, как в липпмановской камере — они не параллельны поверхности эмульсии, а плоскости узлов и пучностей направлены по биссектрисе угла, образованного направлениями двух волн. Они образуют, как это было и раньше, серию частично отражающих слоев, которые при освещении одним опорным пучком отражают лучи в направлении регистрируемого объекта. Другими словами, глубина или объемность голограммы проявляется на стадии восстановления объекта в его первоначальном пространственном положении. Более того, второе изображение, которое всегда искажено в проходящем через голограмму свете, отсутствует в этих «отраженных голограммах». Денисюк не имел в своем распоряжении лазера, поэтому примененное им освещение объекта через пластинку имело ряд серьезных ограничений, сравнимых с ограничениями в однопучковой голографии. Позднее Строук и Лабейри¹⁷ усовершенствовали схему освещения объекта, в то время как опорный пучок по-прежнему приходил на обратную сторону пластинки. Более того, они показали, что эти голограммы способны воссоздавать исходные цвета, при восстановлении в белом свете. Рис. 14 иллюстрирует этот процесс.

ТРЕХМЕРНОЕ КИНО

Проблема обеспечения проекции трехмерных изображений, которые бы рассматривались без помощи специальных селектирующих устройств, таких, например, как поляроидные стекла, не нова. Липпман был первым, пытавшимся решить ее в своей работе «Основы фотографии». Выпуклые изображения, полученные по его методу, теперь можно часто видеть в окнах магазинов, на почтовых карточках и книгах¹⁶. Фотографическая эмульсия покрывается листом пластика с рельефом в виде вертикальных цилиндрических линзочек, фокус каждой из которых приходится на эмульсию. Если изображение трехмерного объекта рассматривается через лист, пластика с проявленной под ним эмульсией, то объект будет появляться в своем исходном положении и в реальных пропорциях. Это происходит вследствие автоколлимирующего свойства линзочек, благодаря которому каждый луч отражается в направлении, из которого он пришел.

Недавно Габор сделал предположение, что голографически выполненные аналоги липпмановских линзочных листов могут быть использованы для трехмерной проекционной системы²⁶. По его методике зрительный экран выполняется в виде большой объемной голограммы (голограммы Липпмана — Денисюка); изображение, спроектированное на него одним проектором, будет видно только из определенных зон, а изображение от второго проектора — только из других зон. В этом случае, если двумя проекторами осветить голограммный экран когерентным светом, наблюдатель ощутит соответствующее изображение каждым глазом, чем будет достигнут желаемый эффект трехмерности.

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

Если две последовательных голограммы одного и того же объекта запечатлены в одной и той же голограммной эмульсии, то может быть восстановлено изображение объекта, покрытое интерференционными полосами. Эти полосы характеризуют результат прямого измерения топографического изменения объекта за время между двумя экспозициями¹⁸. Принцип голографической интерферометрии этого типа легко объяснить. Две формирующие изображение компоненты волнового фронта восстанавливаются с голограммы, и если возникнет какое-нибудь, хотя бы даже

небольшое, отличие между двумя волновыми фронтами, оно проявится в форме интерференционной структуры, которую можно сфотографировать. Голографические интерферограммы обеспечивают изучение деформации в объектах сложной формы; более того, объекты могут быть не только незеркальными, но и полностью диффузными. Этот метод уже нашел широкое применение при изучении вибраций, например в измерении параметров

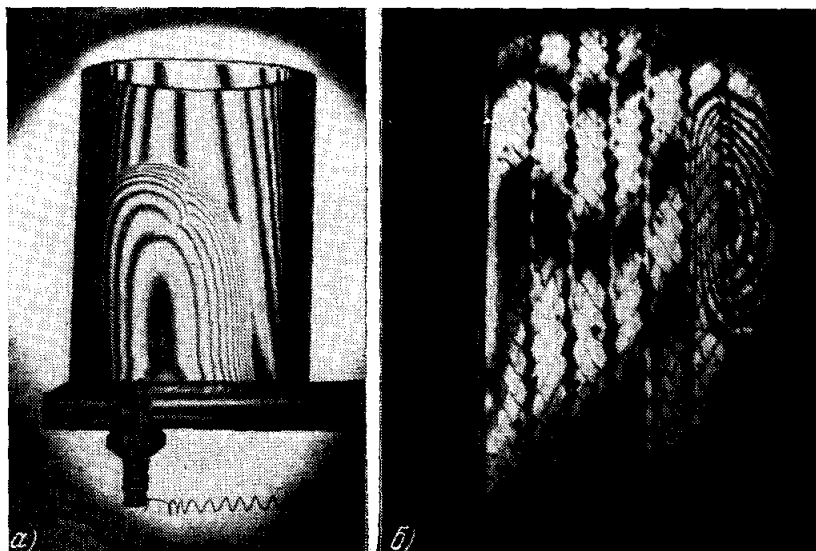


Рис. 15. а) Двойное восстановление экспонированной голограммы, показывающей интерференционные полосы, которые образуются при взрыве ацетиленовой смеси в плексигласовом цилиндре (видны также горизонтальные полосы, вызванные деформацией); исходная голограмма была записана с помощью излучения рубинового лазера с модулированной добротностью за время 0,1 мксек. (Воспроизводится с согласия Р. Вюркера и его сотрудников; TRW Systems.) б) «Зримое время» — (живая) голографическая интерферограмма большой (8,25×14) бескамерной автомобильной шины с обнаруженным дефектом (зазор между протектором и внешним слоем двухслойного сгиба); естественная пластическая деформация нормально накачанной шины сфотографирована в двух последовательных состояниях (первоначальное состояние шины, использованное для получения голограммы, и последующее состояние, существовавшее при рассматривании). (Воспроизводится с согласия Р. Грэнта по 1а.)

громкоговорителей, звуковых датчиков и т. п.; два примера приведены на рис. 15. Его можно использовать для измерения очень малых смещений деталей в приборах инерциальной навигации, таких, как гироскопы, под влиянием динамических условий или ударных деформаций.

ГОЛОГРАММЫ, СОЗДАННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

Значительный интерес проявлен к применению нового голографического принципа для хранения трехмерных изображений и их восстановления с помощью цифровых ЭВМ, а также к другим применениям вычислительной техники. Благодаря этому в настоящее время стало возможным создавать голограммы, воссоздающие трехмерные изображения никогда не существовавших в действительности объектов.

Брауном и Ломанном были описаны методы¹⁹ для синтеза голограмм путем фотографического уменьшения диапазона интенсивностей, получаемых в больших схемах, вычерчиваемых с помощью ЭВМ. Расчет голограмм на ЭВМ, за исключением простых случаев, будет непрактичен.

Габор и Струок описали метод синтезирования голограмм с помощью ЭВМ на принципе голографии²⁰. Одна синтезированная голограмма была записана последовательным наложением в одно и то же скрытое изображение интенсивностей 450 голограммных компонент, каждая из которых соответствовала изображению точки на сцене. Описаны также и другие типы искусственных или синтезированных голограмм, получаемых графическим или интерференционным путем или методом кодирования^{1а}.

ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ УЛУЧШЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Голография началась с попытки уменьшить нерезкость микрофотографий, вызванную сферическими aberrациями электронооптических

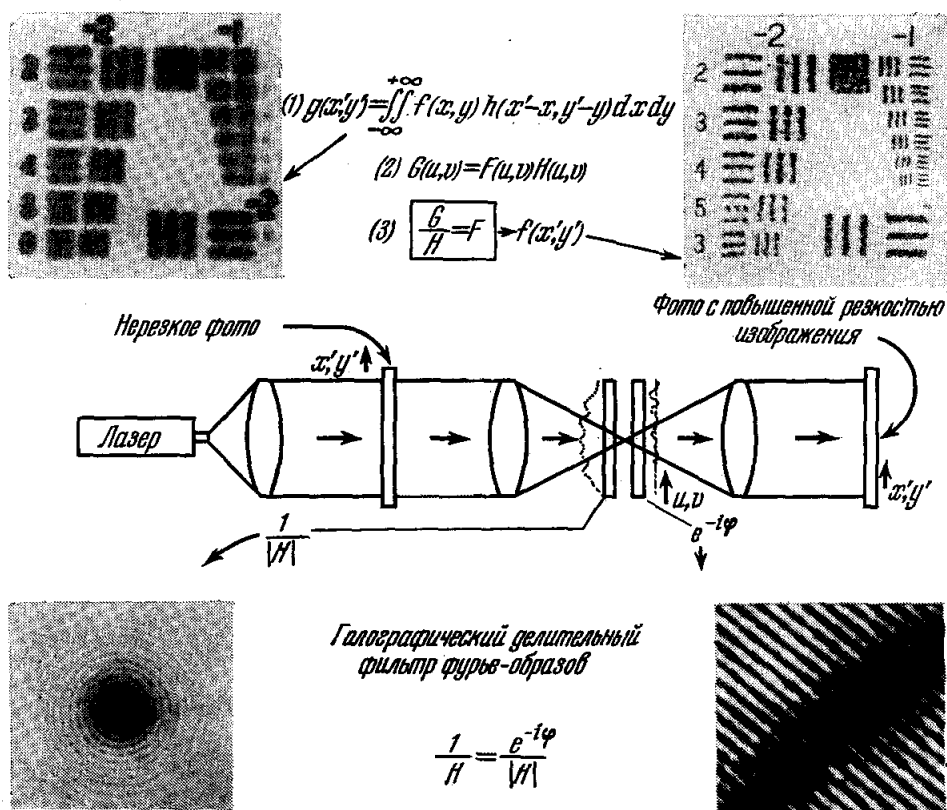


Рис. 16. Голографическое увеличение резкости изображения в соответствии с оптическим методом^{21, 22}.

Распределение интенсивности исходного изображения представлено функцией $f(x, y)$; распределение интенсивности в нерезком фото — функцией $g(x', y')$, распределение интенсивности на улучшенном фото — функцией $f(x', y')$. Математически процесс размытия может быть представлен в виде интеграла свертки от $f(x, y)$ с точечной функцией $h(x' - x, y' - y)$, т. е. равенство (1) описывает нерезкое фото. Интеграл свертки принимает форму произведения в Фурье-области (2), где G, F и H — пространственные Фурье-образы функций g, f и h . Равенство (3) описывает операцию увеличения резкости, которая может осуществляться в Фурье-области. Голографический делительный фильтр Фурье-образов описывается функцией $1/H = e^{-i\varphi}/|H|$ и состоит из двух фотографических пластинок, первая отвечает за амплитудную компоненту ($|H|^{-1}$), а вторая — за фазовую компоненту ($e^{-i\varphi}$). Важная особенность метода состоит в том, что компоненты голографического фильтра можно получить непосредственно из экспериментально определенной функции размытой точки — изображения нерезкой точки (по^{1в}). Фотографические вставки содержат предварительные неопубликованные результаты Дж. Струка и М. Халиуа.

объективов. Эта цель в действительности теперь достигается методом преобразования изображения, впервые предложенным Струком в 1957 г.

и недавно окончательно доработанным и сформулированным им и его сотрудниками в виде «голографического деления фурье-образов». Общий принцип метода ^{21, 22} иллюстрируется на рис. 16, а его применение для повышения резкости фотографий, получаемых в электронном микроскопе, впервые приведено здесь на рис. 17. Этот рисунок демонстрирует повышение резкости изображения нерезкой микрофотографии, полученной на сканирующем электронном микроскопе методом дополнительного

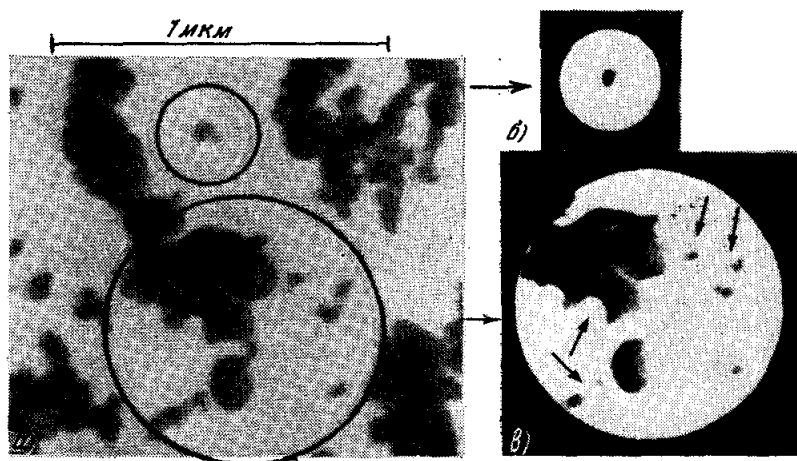


Рис. 17. Голографическое повышение разрешения микрофотографии, полученной на сканирующем электронном микроскопе ²³.

а) Исходная микрофотография золото-палладиевых частиц в коллоидной пленке с максимальным разрешением (200 Å), полученная при обычных рабочих условиях с помощью сканирующего электронного микроскопа (увеличение 50000 ×, напряжение 25 кВ). б-в) Голографически улучшенные изображения, полученные из а) методом Струка и Халиуа ²², основанном на дальнейшем развитии голографического метода улучшения резкости Струка и Цеха ²¹ в результате деления фурье-образов изображения. Улучшение изображения, проявляющееся в повышении разрешения более чем в три раз (лучше 70 Å), ассоциируется также с увеличением контраста. Изображение малой частицы б) уменьшилось, а его видность по сравнению с первоначальным изображением улучшилась. Значительное увеличение разрешения, так же как и обнаружение волокнистой структуры в в), возможно, способствовало неправильному истолкованию первых микрофотографий. Для повышения резкости изображения с помощью оптического метода требуется не более 2 сек, что значительно превышает быстрейшее действие методов с цифровой обработкой процесса. Более того, повышение резкости осуществляется непосредственно на копии оригинальной микрофотографии (см. рис. 16), при этом отпадает необходимость в проведении какого-либо микрофотометрирования и кодирования изображения, необходимых при цифровой обработке процесса, требующих времени от 5 минут до одного часа. На практике могут быть использованы принцип голографического улучшения изображений и метод, проходящий в настоящее время дополнительную проверку и являющийся частью еще неопубликованной совместной работы Дж. Струка, М. Халиуа и А. Кру из Чикагского университета. В этой работе мы сообщили о получении фотографий со значительно более высоким разрешением ²⁴, о повышении разрешения от ~ 5 Å до, возможно, лучшего чем 2,5 Å, обеспечивающих наблюдение спиральных структур нитевидного бактериального вируса ²⁵.

голографического деления фурье-образов ²³, впервые описанным Струком и Цехом в 1967 г. Еще со времени работы Габора 1948 г. ^{2а} стало ясно, что разрешение порядка одного атома можно получить в электронном микроскопе, если ухудшение изображения, вносимое несовершенством прибора, будет скомпенсировано в дальнейшем методами, иногда называемыми «повышением качества», «повышением резкости», «восстановлением» и «компенсацией». Первоначальное предложение Габора относилось к получению голограммы в электронных пучках, а затем корректировке ее недостатков посредством компенсации на этапе оптического восстановления.

Об этом предложении недавно вспомнили снова, но уже с точки зрения увеличения разрешающей способности электронного микроскопа с помощью голографии ²⁶; значительны также последующие успехи в за-

писи голограмм в электронных пучках ²⁷, но об экспериментальных результатах оптической компенсации их недостатков пока не сообщалось. В настоящее время Струк с сотрудниками показали, что оптическим методом улучшения резкости изображения можно значительно улучшить качество изображения несовершенной электронной микрофотографии. Метод увеличения резкости изображений посредством голографического деления фурье-образов также с успехом можно применить к фотографиям, нерезким из-за движения и неточной фокусировки, а также к фотографиям, нерезким из-за вибраций, атмосферной турбулентности и других недостатков изобразительной системы (таких, как сферическая аберрация), которые не могут быть полностью устранены при конструировании и реализации установки. Во всех случаях повышение резкости начинают с обычной фотографии, аналогичной той, которую получает любитель с обычной фотографической камерой. Реализация голографического метода увеличения резкости изображений требует очень большой осторожности, но в упрощенном виде оптические методы повышения резкости изображений могут быть сравнимы с методами обработки электрического сигнала, которые используются при высококачественном воспроизведении звука, где компенсация различных участков спектра звуковой частоты используется для воспроизведения музыки в форме, более приемлемой для подготовленного слушателя ^{1а, 28}.

ГОЛОГРАММЫ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ПРОГРАММ ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Возможной областью, где в недалеком будущем ожидается наиболее широкое использование голограмм, может явиться замена магнитных или фотографических пленок голограммными пленками для целей воспроизведения программ телевидения ²⁹. Такие голограммные пленки имеют то преимущество, что их можно сделать малыми и дешевыми вследствие того, что они являются голограммами, их запас информации характеризуется большой избыточностью, так что царапины или другие повреждения, которые могли бы серьезно повлиять на качество записи в фотографической или магнитной системе, не влияют на голографически восстанавливаемое телевизионное изображение, так что малая часть голограммы способна воспроизводить всю заголографированную сцену. В этой методике голограммный процесс используется больше по причинам экономии и надежности, а не для реализации трехмерных возможностей голографии. Первоначальное цветовое оформление картины преобразуется в транспарант, фазовую голограмму, которая является эквивалентом голограммы интенсивностей, с которой можно отпечатать много копий, которые затем могут быть воспроизведены на недорогом виниловом материале. Кассеты с этими записанными виниловыми лентами вставляются в устройство размером с небольшой чемодан, присоединяемый к телевизионному приемнику, и восстановленные изображения показываются как кино на экране телевизора. Внутри приставки лазер восстанавливает голограмму на виниловой ленте, а видикон преобразует восстановленное изображение в электрические сигналы для воспроизведения. Воспроизведение кассетной голограммы с записанными образовательными и другими программами будет осуществляться на обычные телевизионные приемники способом, аналогичным тому, который используется в лабораториях CBS в системе электронной видеозаписи EVR ³⁰. Используя электронную запись, система EVR обеспечивает чрезвычайно высокую плотность записи изобразительной информации на обычной пленочной эмульсии; на формате размером $2,3 \times 3,1$ мм² записывается один телевизионный кадр.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время исследования по голографии достигли таких масштабов, что мы были не в состоянии упомянуть всех авторов, которые внесли значительный вклад в ее развитие. Исследователями из США выполнены особенно важные ранние исследования. Особенно значительны были успехи Р. Колльера, Л. Лина, К. Пеннингтона, Д. Энсли, Л. Зибберта, Р. Гранта, А. Ломанна, А. Вюркера, К. Стетсона, Р. Пауэлла, Дж. Гудмена и их сотрудников, в дополнение к тем, что уже упоминались. К числу ранних работ, проведенных в других странах, относятся работы, выполненные во Франции С. Ловенталем, Ж. Номарски и Ж. Вьено; в Германии — Г. Нассенштейном; в Великобритании — Д. Берчем; в Японии — Дж. Тоужихуки и Т. Тсурутой; в Советском Союзе — Ю. Н. Денисюком, И. П. Налимовым и Л. М. Сороко. Для более полного анализа их достижений см. обзор³¹ и другие ссылки.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. G. W. Stroke, *a*) An Introduction to Optics of Coherent and Noncoherent Electromagnetic Radiations. Laser Summer Course University of Michigan. 1964; большая часть этого курса лекций вошла в книгу: An Introduction to Coherent Optics and Holography. ed. 2, N. Y., Academic Press. 1969 (в СССР переведено 1-е изд. этой книги: Дж. Струка. Введение в когерентную оптику и голографию, М., «Мир», 1967—*Перев.*); *б*) Diffraction Gratings, Handb. Phys., v. 29, B., Springer-Verlag, 1967; *в*) Ind. Photogr. 19 (5), 26 (1970).
2. D. Gabor, *a*) Nature 161, 777 (1948); Proc. Roy. Soc. A197, 464 (1949) (см. перевод: Микроскопия на основе метода восстановления волнового фронта. Приложение 1 к переводу книги Дж. Струка^{1а}; *б*) Recent Developments in Holography. Presented at the Laser Applications Symposium at the Bendix Research Laboratories, 30 July 1968 (патент США).
3. E. N. Leith, J. Upatnieks, J. Opt. Soc. Am. 53, 1377 (1963).
4. W. E. Kock, *a*) Lasers and Holography. An Introduction to Coherent Optics, N. Y., Doubleday. 1969; *б*) Hologram Television System and Method, U. S. Patent Application 691, 908 (19 December 1967); Proc. IEEE 54, 331 (1966) (см. перевод: ТИИЭР 54 (2), 253 (1968)); *в*) 55, 1103 (1967) (см. перевод: ТИИЭР 55 (7), 116 (1967)); *г*) 56, 238 (1968) (см. перевод: ТИИЭР 56 (2), 113 (1968)); *д*) *ibid.*, p. 2180 (см. перевод: ТИИЭР 56 (12), 91 (1968)); 57, 100 (1969) (см. перевод: ТИИЭР 57 (1), 1 (1969)); *е*) Microwaves 7, 46 (1968).
5. G. L. Rogers, Nature 166, 237 (1950).
6. W. E. Kock et al., Proc. IEEE 54, 1599 (1966) (см. перевод: ТИИЭР 54 (11), 110 (1966)).
7. G. W. Stroke et al., Brit. J. Appl. Phys. 17, 497 (1966).
8. ERC Research in Holography Discussed, Electron. News, 32 (10 October, 1966).
9. W. E. Kock et al., Proc. IEEE 54, 1958 (1966) (см. перевод: ТИИЭР 54 (12), 399 (1966)).
10. L. Rosen, *ibid.* 55, 79 (1967) (см. перевод: ТИИЭР 55 (1), 84 (1967)).
11. W. E. Kock et al., *ibid.*, p. 80 (см. перевод: ТИИЭР 55 (1), 85 (1967)).
12. F. B. Rotz, A. A. Friese, Appl. Phys. Lett. 8, 146 (1966).
13. L. J. Cutrona et al., Proc. IEEE 54, 1026 (1966) (см. перевод: ТИИЭР 54 (8), 11 (1966)).
14. E. N. Leith, A. L. Ingalls, Appl. Opt. 7, 539 (1968); W. M. Brown, L. J. Porcello, IEEE Spectrum 6, 52 (1969).
15. Ю. Н. Денисюк. ДАН СССР 144, 1275 (1962).
16. G. Lippmann, *a*) J. Phys de Paris 3, 97 (1894); *б*) C. R. Hebt, Ac. Sci. 146, 58 (1908).
17. G. W. Stroke, A. E. Labeyrie, Phys. Lett. 20, 368 (1968).
18. R. A. Powell, K. A. Stetson, J. Opt. Soc. Am. 55, 1593 (1965).
19. B. R. Brown, A. W. Lohmann, — Appl. Opt. 5, 967 (1966).
20. D. Gabor et al., Phys. Lett. 18, 116 (1965).
21. G. W. Stroke, R. G. Zech, *ibid.* A25, 89 (1967).
22. G. W. Stroke, M. Halioua, *ibid.* A33, 3 (1970).
23. G. W. Stroke et al., Scanning Electron Microscopy, Chicago, IIT Research Institute, 1971, 57 p.
24. A. V. Crew, Quart. Rev. Biophys. 3, 137 (1970).

25. A. V. C r e w e e t al., J. Mol. Biol. (будет опубликовано).
26. I. W e i n g a r t n e r et al., *Optik (Stuttgart)* 30, 318 (1969).
27. A. T o n o m u r a et al., *Japan J. Appl. Phys.* 7, 295 (1968).
28. D. G a b o r, G. W. S t r o k e, *Endeavour* 28, 40 (1969).
29. W. J. H a n n a n, A Holographic Video Playback System. Presented at the IEEE Meeting (New York, March 1970).
30. P. C. G o l d m a r k, *IEEE Spectrum* 7, 22 (1970).
31. Summary of the Papers Presented at the Intern. Symposium on Applications of Holography (Besancon, July 6—11, 1970), *Nouvo Rev. Opt. Appl.* 1 (2), 1 (1970).

ЛИТЕРАТУРА, ДОБАВЛЕННАЯ ПРИ ПЕРЕВОДЕ

Ю. Н. Д е н и с ю к, Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения. Автореферат докт. диссертации (Ленинград, 1963).— Ю. Н. Д е н и с ю к, И. Р. П р о т а с. *Опт. и спектр.* 14, 721 (1963).— И. Л е й т, Ю. У п а т н и е к с, *УФН* 87, 521 (1965).— И. П. Н а л и м о в, *Заруб. радиоэлектроника*, № 2, 3 (1966).— Л. М. С о р о к о, *УФН* 90, 3 (1966); *Основы голографии и когерентной оптики*, М., «Наука», 1971.— Ю. И. О с т р о в с к и й, *Голография*, Л., «Наука», ЛО, 1970.— У. Е. К о к, *Лазеры и голография. Введение в когерентную оптику*, М., «Мир», 1971.
