

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

534.2

**ЗВУКОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ \*)***А. Мезерелл*

*Высокочастотный звук может быть использован для конструирования голограмм подобно когерентному свету. Преимущество использования ультразвука состоит в том, что он может проникать в твердые тела, позволяя обнаруживать трехмерные детали внутри тела.*

Представим себе, что мы вдруг обрели способность видеть человеческое тело трехмерным, полупрозрачным, с ясно различимыми костями, мускулами и мягкими тканями. По сравнению с обычными рентгеновскими методами это может оказаться столь же революционным, как введение рентгеновских лучей по сравнению с добрым старым методом диагностики с помощью пальпирования. Акустическая голография скоро сделает это возможным. И так как вместо рентгеновских лучей будет использоваться звук, будут видны не только жесткие костные ткани, но также мягкие кровеносные сосуды, различные органы и — что очень важно — любые злокачественные опухоли. Кроме того, в отличие от рентгеновских лучей, звук абсолютно безвреден при тех интенсивностях, которые будут использоваться. Поэтому этот метод можно будет применять для обычных физических обследований и в практике акушерства. Даже определение пола нерожденного ребенка может стать пустяковым делом.

Уже сейчас можно указать ряд других потенциально полезных применений для акустической голографии. Она может позволить океанографам наблюдать огромные области морского дна. При работах на дне моря или вблизи него часто взбаланиваются осадки и образуемое помутнение уменьшает оптическую видимость до одного метра. Звук с частотой 1 Мгц и выше, с длиной волны 1,5 мм и менее, может эффективно проникать в эти помутнения и давать изображение с достаточно высоким разрешением. На более низких частотах достижимы большие пределы видимости, и тогда можно «разглядывать» большие области океана.

Геофизики смогут увидеть трехмерные изображения горных пород, расположение минералов и нефтяных полей. Археологи смогут увидеть захороненные предметы до раскопок.

В этой статье предполагается описать принципы акустической голографии, ее развитие с момента возникновения несколько лет назад и некоторые современные экспериментальные методы и проблемы, которые нужно разработать и решить, чтобы техника стала полезной в практике. Наконец, я хочу упомянуть некоторые области, которые кажутся мне перспективными для будущих исследований.

\*) A. F. Metherell, Holography with Sound, Science J. 4 (11), 57 (1968).  
Перевод Э. В. Погореловой.

Предположим, что требуется оптическая голограмма шахмат. Сначала фигуру освещают когерентным светом — таким, какой дает лазер, — предусматривая, что свет, отраженный от шахмат, должен упасть на фотопластинку. Одновременно предусмотрено, что часть света попадает на пластинку прямо от лазера и служит опорным лучом (рис. 1, а). Когда фотопластинка будет проявлена и поставлена обратно на то же самое место относительно лазера, который ее освещал при записи голограммы (фигура теперь уже удалена), свет от лазера даст возможность смотреть через фотопластинку, как через окно (рис. 1, б).

Фигура воспринимается трехмерной, как будто она по-прежнему занимает свое исходное положение. Если, однако, голограмма записана-

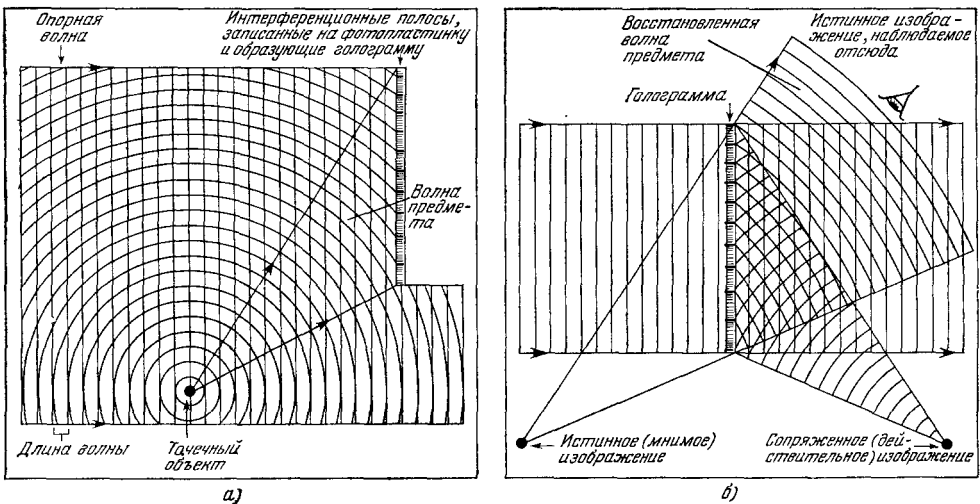


Рис. 1. Обычная голограмма точечного источника (а) представляет собой фотографию интерференционной картины, которая получена в результате интерференции световой волны, отраженной от предмета (источника) и опорной волны. Изображение точечного источника восстанавливается при освещении голограммы первоначальной опорной волной (б).

в обычном свете, она выглядит нечеткой, поскольку запись на фотопластинке представляет собой интерференционную картину света, идущего от лазера, и света, отраженного от фигуры; она не имеет никакого сходства с фигурой. С самого начала голографических исследований было ясно, что можно записать голограмму на одной длине волны, а восстанавливать на другой. Следовательно, голограмма может быть записана на звуковых волнах, а восстановлена светом. Эта техника и называется акустической голографией.

Но чем звук лучше электромагнитного излучения видимой области спектра? Главная причина состоит в том, что звуковые волны проходят достаточно хорошо почти через все тела и, следовательно, могут проходить через такие предметы, через которые свет не проходит. Предположим, например, что необходимо сделать голограмму зародыша, находящегося в матке матери. Вместо того чтобы использовать когерентный свет, зародыш можно «осветить» когерентными звуковыми волнами (чистый тон) от одного или более источников (устройств, подобных высокочастотным громкоговорителям). Звук, отраженный и преломленный зародышем, будет интерферировать со звуком от основного источника звука, и полученная в результате интерференционная картина записывается на звуко-

чувствительном устройстве (последнее служит для тех же целей, что и фотопластинка в оптической голографии). Такие устройства регистрируют визуальную интенсивность картины, полученной при интерференции между опорной волной и волной, идущей от зародыша. Наконец, чтобы увидеть зародыш трехмерным, достаточно осветить эту оптическую запись оптическим аналогом звукового опорного луча.

Проще говоря, голограмма используется как своего рода окно, в котором волновой звуковой фронт, излучаемый предметом и падающий на одну сторону окна, преобразуется в волновой оптический фронт, как будто последний возникает на другой стороне окна. В принципе наблюдатель может стоять на оптической стороне окна, смотреть на акустическую его сторону и видеть полный объект на сцене, как будто сцена освещена светом вместо звука. Конечно, то, что он видит, есть истинное изображение, восстановленное голограммой. Во время восстановления изображения также воспроизводится сопряженное изображение (называемое иногда двойником или реалом); обычно предусматривают его расположение вне поля зрения, что не является помехой (см. рис. 1, б).

Представление об акустической голографии несколько идеализировано, потому что качество изображения, которое наблюдатель может видеть, ограничивается, конечно, длиной звуковой волны, а не световой. Для многих приложений требуются устройства «одновременности» — одновременное произведение стадий процесса записи и восстановления, но для других применений такая «одновременность» не имеет значения, если между записью голограммы и наблюдением изображения проходит незначительное время (как, скажем, при проявлении фотопленки). Таким образом, в зависимости от приложения могут быть различные подходы к конкретным устройствам.

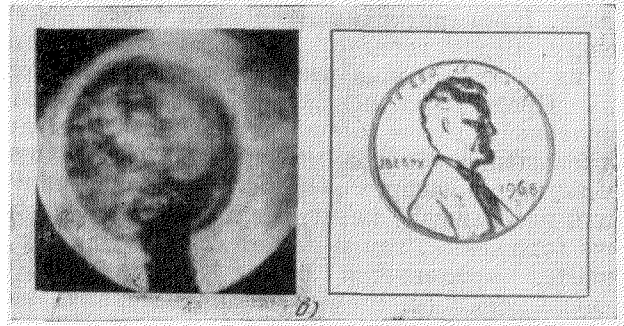
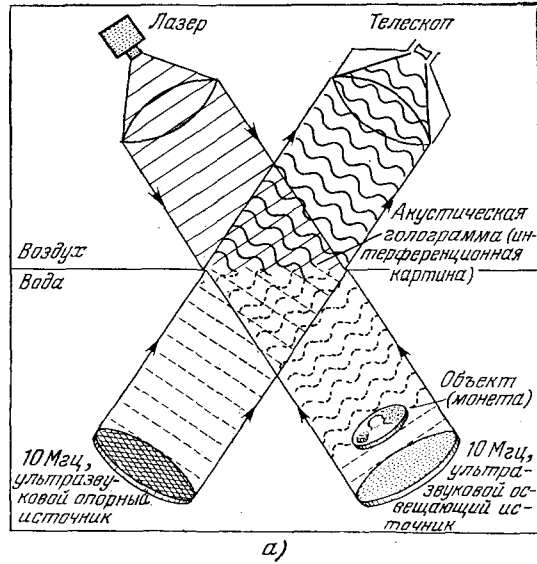


Рис. 2. Акустические голограммы могут быть получены в виде картины ряби на поверхности воды (а), когда звуковые волны от погруженного предмета, облучаемого снизу, интерферируют с волнами, идущими от опорного источника. Чтобы наблюдать изображение непосредственно, используют лазер и телескоп. Для сравнения наряду с восстановленным изображением показана обычная фотография объекта — одноцентовой монеты (б).

Что требуется от техники, чтобы акустическая голография получила широкое распространение? Прежде всего требуется подходящее устройство для записи интерференционной картины. Должны быть также преодолены некоторые трудности, создаваемые разницей в длинах волн звука, используемого при записи акустической голограммы, и света, используемого для восстановления изображения; это несоответствие порождает значительную часть искажений.

Хотя акустическая голография является непосредственным результатом оригинальной работы Д. Габора в 1947 г., исследования по акустической голографии не велись до середины 60-х годов. В ранних экспериментах рядом различных исследовательских групп независимо развивались три различных метода. Первым был метод «одновременности», известный как метод левитации водной поверхности (ЛВП). Он основан на том, что если источник ультразвука, погруженный в воду, направлен к поверхности, поверхность приподнимается до тех пор, пока сила тяжести и поверхностное натяжение не сбалансируют акустическое давление. Таким образом, если погружены в воду два источника, по направлению к поверхности интерферируют два пучка и интерференционная картина проявляется в виде ряби на поверхности. Если предмет помещен в один из пучков, такой пучок становится «предметным» пучком и картина ряби на поверхности дает акустическую голограмму предмета. Чтобы сразу же восстановить голограмму, необходимо осветить водную поверхность лазером (рис. 2). Действительное изображение объекта появляется ниже поверхности воды, в то время как сопряженное образуется выше поверхности воды, и наблюдатель может выбирать, какое изображение наблюдать. Из-за различия длин волн звука и света, изображения, по-видимому, будут гораздо дальше от поверхности, чем реальный предмет, и их обычно нужно рассматривать в телескоп.

Продольные искажения в изображении могут быть значительно ослаблены путем уменьшения голограммы до ее восстановления. Если уменьшение голограммы производится в отношении длин волн света и звука, то воспроизводится полное, неискаженное, свободное от аберраций изображение первоначального предмета, которое уменьшено в таком же отношении, как и длины использованных волн. В обычных экспериментах применяется акустическая частота 7 Мгц, что соответствует длине волны (и, следовательно, потенциальному разрешению) 0,22 мм. В случае применения гелий-неонового лазера с оптической длиной волны 632,8 нм ( $6,328 \cdot 10^{-4}$  мм) отношение длин волн было 350 : 1. Для уменьшения продольного искажения необходимо сфотографировать картину ряби на водной поверхности и использовать уменьшенное изображение голограммы в фотографии, чтобы получить менее искаженное восстановление оригинала.

С методом ЛВП связаны две трудности: во-первых, поверхность воды чувствительна к вибрациям, которые стремятся разорвать картину ряби (записанную голограмму), и, во-вторых, когда акустические интенсивности в предметном и опорном пучках не уравновешены, возникает поверхностное движение, которое разрушает голографическую картину. Несмотря на эти трудности, метод имеет то преимущество, что он сравнительно прост и требует минимального количества приборов. В последнее время этим методом получают изображения достаточно хорошего качества.

Второй метод для записи подводных ультразвуковых голограмм использует точечный детектор, растр которого сканирует плоскость под поверхностью воды. Продетектированный звук применяется затем для модуляции интенсивности миниатюрной лампы, прикрепленной к скани-

рующему устройству. Камера с временной экспозицией регистрирует изменение интенсивности лампы на пленке в точности так же, как точка на экране телевизора создает изображение. Фотография изображения, зарегистрированная таким путем, и является акустической голограммой (рис. 3). Преимущество этого метода состоит в том, что он не чувствителен к поверхностным колебаниям и перемещениям, которые были помехой в ЛВП-методе. Но он имеет свои недостатки. Время, необходимое для

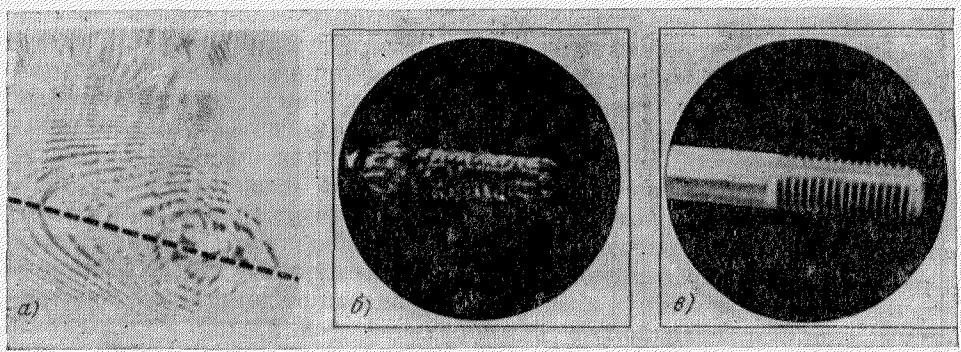


Рис. 3. Акустическая голограмма болта была записана под водой на частоте 5 Мгц путем растрового сканирования в плоскости голограммы погруженным точечным детектором и фотографировании изменения яркости миниатюрной лампы, присоединенной к сканирующему устройству (а). Восстановленная голограмма (б) получена при освещении записанной голограммы лазером. Как видно из сравнения с обычной фотографией (в), она достаточно хорошего качества.

сканирования плоскости голограммы, довольно велико, и требуется большая тщательность, потому что голограмма, полученная в результате сканирования, состоит из кусочков, а не представляет собой непрерывной записи.

Еще один метод, который используется нашей группой в Дугласской проблемной лаборатории в Калифорнии, включает в себя метод механического сканирования, подобный только что описанному, за исключением того, что он применяется в воздухе на частотах 12 или 25 кгц или длинах волн между 29 и 14 мм. Вследствие больших длин волн используемое сканирующее оборудование и объекты значительно больше, чем в первых двух методах. Причины для работы в воздухе состояли в том, что мы имели в лаборатории готовое оборудование, позволяющее работать на верхнем пределе слышимых частот. Кроме того, большие длины волн и размеры предметов допускают менее точное сканирующее оборудование и требуют менее деликатного обращения. В настоящее время для акустической голографии в диапазонах этих длин волн в воздухе мы не видим существенных приложений, хотя есть очень важные применения в воде и твердых телах. Сам по себе этот метод в воздухе — прежде всего лабораторный способ для исследования принципов акустической голографии.

Первые эксперименты по акустической голографии начались, естественно, как создание акустических аналогий оптическим голографическим устройствам. Они просто фиксировали картину интенсивности в плоскости интерференции акустического опорного и предметного лучей. Позднее была развита техника, которая давала надежды на большее проникновение в фундаментальные основы процесса голографии, но, к сожалению,

она не может быть использована в оптических методах. Это происходит потому, что электрическое детектирование акустических волн линейно, между тем как все оптические детекторы являются приборами с квадратичным законом. Можно сказать, что акустические детекторы (такие, как микрофон) выдают электрический сигнал с частотой и фазой, равными частоте и фазе акустического сигнала и пропорциональными величине амплитуды, в то время как оптические детекторы (как фотопленка) выделяют только интенсивность. Это дает акустической голографии важную добавочную степень свободы по сравнению с оптической. Одной из первых областей, в которой использовались преимущества линейного детектирования, было электрическое моделирование опорных волн. В электрических методах не обязательно иметь реальный акустический опорный источник. В качестве электрического опорного сигнала можно использовать электрический сигнал, применявшийся для питания (запуска) источника, который акустически освещает или «озвучивает» предмет. Без акустического опорного луча детектор чувствует только волну предмета, и выходной сигнал из детектора является электрической аналогией волне предмета. «Предметную волну» и «опорную волну» можно заставить интерферировать, суммируя электрический сигнал от детектора с электрическим опорным сигналом в суммирующем усилителе. Усредненный по времени выходной сигнал из усилителя можно зарегистрировать как интенсивность на фотопленке, где каждая точка в плоскости пленки соответствует каждой точке в плоскости акустического детектирования.

Если фаза электрического опорного сигнала не меняется по отношению к «озвучателю», опорная фаза остается неизменной для всех положений на плоскости голограммы. Тогда это эквивалентно наличию плоской акустической опорной волны, падающей перпендикулярно плоскости голограммы. Эта имитированная опорная волна имеет одно важное преимущество по сравнению с реальным акустическим опорным устройством: мало того, что становится не нужен добавочный источник звука, очень трудно создать совершенно плоскую или сферическую акустическую волну. Поэтому лучшие результаты получаются с имитированной опорной волной.

Помимо плоских перпендикулярных опорных волн, можно имитировать другие опорные волны. Это достигается путем изменения фазы электрического опорного сигнала по отношению к «озвучателю» таким образом, что фаза в данной точке плоскости голограммы соответствует фазе, которая существовала бы, если бы имела место действительная акустическая опорная волна. Не перпендикулярная плоская волна будет иметь линии постоянной фазы, идущие параллельно через плоскость голограммы. Каждая линия будет иметь свою фазу, причем фаза меняется на  $360^\circ$  для каждого перемещения вперед или назад по направлению распространения на полную длину волны. Если линии постоянной фазы бегут слева направо, опорная волна будет падать на плоскость голограммы сверху, когда фаза уменьшается сверху вниз на плоскости голограммы, и снизу, когда фаза увеличивается сверху вниз.

При сканировании голограммы или имитации опорной волны нужно быть осторожным. Цель сканирования и составления голограммы из отдельных частей состоит в том, чтобы получить как можно точнее непрерывную запись по поверхности голограммы, стараясь не брать эти части слишком близко друг к другу. Однако если участки сканирования слишком далеки друг от друга, голограмму нельзя будет правильно собрать и в результате этого либо будет ухудшаться качество, либо потеряется восстановленный образ. В некоторых случаях могут появиться двойные

голограммы, которые состоят из многочисленных восстановленных изображений.

Недостаток механического сканирующего детектора — в том, что он требует относительно большего времени для обзора полной голограммы, в течение которого объект должен оставаться полностью неподвижным во избежание изменения картины голограммы. Типичное время, требуемое для сканирования, может превышать час. Следовательно, такие методы ограничиваются неинтересными лабораторными случаями.

Один из путей избежать этого — переход к набору детекторов, причем последние должны быть так же плотно расположены, как и точки на полутоновой фотографии, которых должно быть порядка  $\sim 1000 \times 1000$ , т. е. 1 млн. элементов. Это технически сложная задача; возможно, однако, она может оказаться неизбежной для получения изображений обширных подводных участков.

Для ультразвуковых ситуаций в диапазоне от 1 до 10 *Мгц* возможно быстрое сканирование с помощью трубки Соколова. Изобретенное в 1938 г. для использования в качестве ультразвукового конвертора изображения устройство состоит в основном из замкнутой телевизионной системы, в которой передняя стенка экрана трубки камеры заменена тонкой резонирующей пьезоэлектрической кристаллической пластинкой. Акустический образ, проектируемый на пьезоэлектрический кристалл, который предназначен, чтобы резонировать на используемой звуковой частоте, заставляет кристалл локально вибрировать с амплитудой, пропорциональной локальной акустической амплитуде. Акустическое изображение затем передается как осциллирующее напряжение пьезоэлектрика на заднюю сторону экрана (вакуумную сторону), которая сканируется движущимся пятном от электронной пушки. Вторичная эмиссия от экрана, который модулируется пьезоэлектрическим напряжением (следовательно, акустическим изображением) проявляется на экране телевизионного индикатора. Время, требуемое для сканирования всего кристалла, около 0,03 сек.

Обычно трубка Соколова использовалась для обнаружения либо тени, либо фокуса акустических изображений. Теперь она применяется для проявления картины, которая является акустической голограммой. Фотографируя переднюю поверхность телевизионного экрана индикатора, можно восстановить акустическую голограмму.

Одна группа исследователей недавно пыталась модернизировать систему Соколова так, чтобы можно было восстанавливать голограмму сразу. Вместо показа голограммы на телевизионном индикаторе они создали устройство, позволяющее получать ее на специальной катодной трубке, которая имеет экран, сделанный из особого типа кристаллов. Эти кристаллы имеют свойство изменять коэффициент преломления пропорционально прилагаемому напряжению. Идея состоит в том, чтобы показать акустическую голограмму на экране кристалла не как распределение интенсивностей, а как картину изменения показателя преломления. Кристалл можно затем обработать так же, как оптическую голограмму. Передача луча лазера через кристалл приводит к восстановлению изображения первоначального предмета сразу. Устройство трубки Соколова очень привлекательно, но трубка имеет два серьезных недостатка, которые ограничивают ее применение. Во-первых, пьезоэлектрический кристалл реагирует только на звук, который падает на экран в пределах  $10^\circ$  по обе стороны от нормали. Эта особенность не только ограничивает угол поля зрения, но и уменьшает разрешающую способность голограммы, которую он дает. Во-вторых, тот факт, что внутри трубки камеры должен быть вакуум, означает, что пьезоэлектрический кристалл должен механически выдер-

живать давление 1 атм. Это требование ограничивает размер апертуры максимум до 5 см с металлическим креплением позади. Давление вызывает также натяжения в кристалле, появляются отклонения от плоской поверхности, что в свою очередь ведет к фазовым искажениям на голограмме и дальнейшему ухудшению качества восстановленного изображения. К сожалению, не видно путей преодоления этих трудностей.

Механически сканируемое детекторное устройство, которое мои коллеги и я использовали в Дугласской проблемной лаборатории, хотя и не очень ценно в практических применениях, оказалось очень гибким и удобным орудием исследования. Другое преимущество линейного детектора состоит в том, что он позволяет проследить за поведением сигналов до того, как они суммируются суммирующим усилителем. Мы использовали это преимущество как средство для исследования относительной важности двух компонент — фазы и амплитуды в предметной волне. Фаза волны есть относительная мера времени прихода гребня предметной волны по отношению к гребню опорной волны. Это привело нас к конструированию исключительно фазовых голограмм (не путать с оптическими фазовыми голограммами!). Принято считать, что голограмма должна быть записана из обеих — фазовой и амплитудной — предметных волн. Наши исключительно фазовые голограммы делаются путем произвольного установления амплитуды электрической предметной волны до постоянной величины по всей поверхности плоскости голограммы. В результате чисто фазовая голограмма затем образуется путем суммирования предметного волнового сигнала постоянной амплитуды (который, однако, связан по фазе с действительной предметной волной) и электрическим опорным сигналом постоянной амплитуды. Таким образом, амплитудные изменения в предметной волне на акустическом детекторе не отражаются при записи голограммы.

Чисто фазовые голограммы выглядят почти так же, как обычные голограммы, в которых положение полос (несущих фазовую информацию), то же самое. Различие между ними — в контрасте интерференционных полос. Чисто фазовая голограмма имеет постоянный контраст полос, тогда как обычная акустическая голограмма имеет переменный контраст полос из-за изменения амплитуды предметной волны. Эффективно чисто фазовая голограмма записывается детектором, который полностью не чувствителен к амплитуде. Как это ни странно, чисто фазовая голограмма не только восстанавливает первоначальный предмет в трех измерениях, как обычная голограмма, но также восстанавливает и полутона (относительные амплитуды) на предмете!

Причина такого эффективного результата заключается в том, что относительная фаза в плоскости голограммы является функцией относительных предметных амплитуд. Хотя мы не выявили никаких значительных различий восстановления с помощью этих двух типов голограмм, здесь могут быть искажения полутонов (которые с практической точки зрения могут быть не важными), а также более слабые ложные изображения.

Во всех голограммах, фиксирующих конфигурацию, неподвижный предмет в настоящее время освещается относительно стационарным полем волны и получающаяся в результате этого картина интерференции отраженной предметной волны и опорной волны регистрируется на плоскости в пространстве. Рассмотрим теперь путь луча предметной волны от точки освещающего источника, через предмет до точки на голограмме. Можно себе представить стрелки на лучах, когда они расходятся из точечного источника и сходятся обратно к определенной, интересной



для нас точке на голограмме. Можно интуитивно видеть, что направление стрелок на такой лучевой диаграмме не имеет значения. Другими словами, для данной амплитуды и фазы около источника будут определенные амплитуда и фаза, протектированные в точке плоскости голограммы. Если поменять местами источник и приемник, то приемник все равно будет измерять ту же амплитуду и фазу, как и тогда, когда он был в прежнем положении. Мы проверили эту идею, записывая сначала обычную

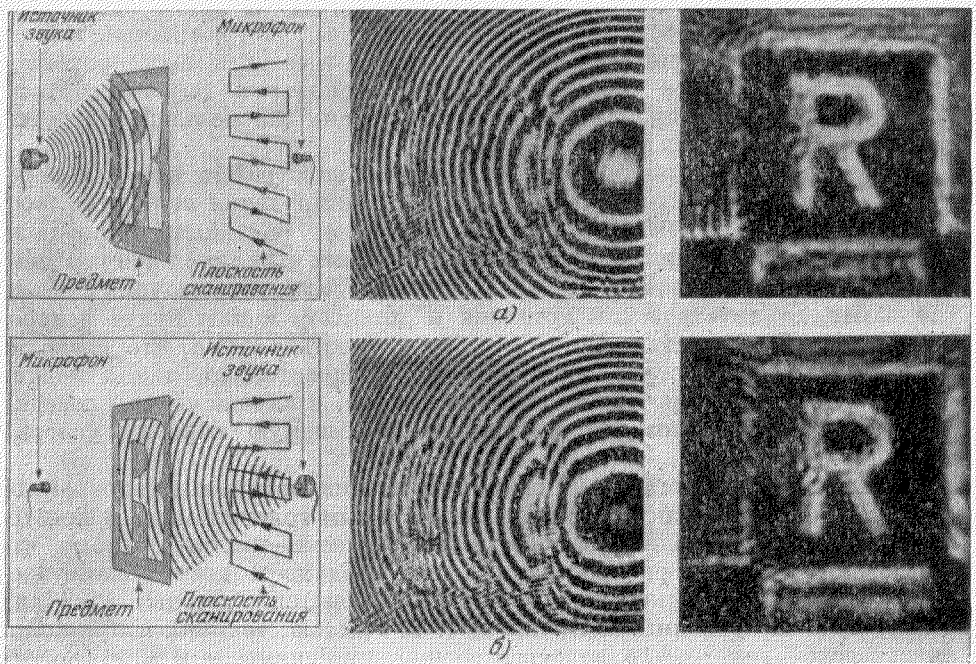


Рис. 4. Иллюстрация двух методов записи акустических голограмм. Голограмма получена путем растрового сканирования либо микрофона (а), либо источника звука (б). В обоих случаях голограмма записана путем экспозиции пятна катодно-лучевой трубки, которое модулируется суммой микрофонного и опорного сигналов, причем координаты трубки жестко связаны с положениями микрофона (или источника).

голограмму со сканируемым приемником, когда неподвижный точечный источник звука озвучивал неподвижный предмет, а плоскость голограммы сканировалась микрофоном (опорная волна синтезировалась электрическим путем) (рис. 4, а). Затем мы поменяли местами микрофон и источник звука, так что микрофон оказался там, где обычно был источник, а источник звука был на сканирующем устройстве. Никаких других изменений не проводилось. Световое пятно, которое модулировалось по интенсивности суммой опорного и микрофонного сигналов, было по-прежнему жестко связано с положением сканирующего устройства (теперь источником звука) (рис. 4, б). Получившаяся в результате голограмма и восстановленное изображение были идентичны обычной голограмме со сканируемым приемником.

Эти эксперименты сразу получают интересную модификацию. Обычное акустическое устройство приводило к регистрации голограммы предметного волнового фронта, который действительно существовал в пространстве, тогда как устройство со сканируемым источником создавало непрерывно меняющиеся волновые фронты, ни один из которых не был в любой

данный момент таким же самым, как «предметный волновой фронт», записанный на голограмме. Предметная волна, которая была записана на акустической голограмме со сканируемым источником, следовательно, синтезировалась с помощью геометрии сканирующего устройства, формы предмета и положения неподвижного точечного приемника. Таким образом, эта голограмма является полностью синтезированной голограммой реального предмета, записанной в единственной точке пространства путем «опроса» (interrogating) предмета модулированным освещающим волновым полем. Логическим усовершенствованием этой техники является попытка исключить необходимость большого набора детекторов, возможно, состоящего более чем из одного миллиона элементов, и создать модулированное волновое освещающее поле с помощью нескольких (сфазированных) источников, работающих вместе и напоминающих (но не тождественных) сфазированную группу радарных систем.

Возможно, что применение акустической голографии при сканируемом источнике ограничено, потому что для сканирования волнового поля звука требуется значительное время. Наиболее реальные приложения связаны с динамическими ситуациями, но для них этот метод неприменим. Однако в микроволновой голографии, где микроволновый источник и детектор заменяют акустический источник и детектор, волны будут распространяться со скоростью света, а не со скоростью звука, что позволит применить более быстрое сканирование. Следовательно, такой подход может оказаться очень практичным, например, в случае слепой посадки самолета, так как позволяет получить трехмерную картину условий в тумане.

Уже сделаны механически сканируемые микроволновые голограммы, которые аналогичны акустическим сканируемым голограммам. В некотором смысле микроволны дополняют акустические волны, потому что микроволны хорошо распространяются в воздухе и космическом пространстве, а акустические хорошо распространяются в твердых и жидких телах, куда микроволны не проникают. К счастью, техника и принципы акустической голографии непосредственно применимы и к микроволновой голографии.

Прогресс акустической голографии был весьма быстрым. Но исходя из достигнутых результатов, можно поставить вопрос: какое значение это имеет для общества? Эксперименты указали на применение акустической голографии как средства получения трехмерных изображений акустически облученных объектов. Из того, что уже известно о других акустических методах детектирования, применяющихся в настоящее время в медицине для диагностики, ясно, что акустическая голография будет там полезна, но неясно, насколько. То же самое можно сказать о ее применении в других областях: при испытаниях без разрушения структуры, в океанологии и геофизике. Дело в том, что до сих пор нет ни одной системы акустической голографии, которая была бы пригодной для практических применений в данной области.

Каким же путем идти вперед? В ранние дни оптической голографии главной проблемой было отсутствие должной когерентности. Этой проблемы в акустической голографии нет; при радиотехническом методе генерирования звука имеется почти неограниченная когерентность. В настоящее время самая большая проблема — детектирование акустической голограммы. Секрет хорошего качества восстановления состоит в том, чтобы иметь возможно большую апертуру голограммы. Параметром здесь является отношение апертуры к длине волны, которое для трубки Соколова при 7 Мгц равно 235 : 1. Для сравнения укажем, что отношение апертуры

к длине волны оптической голограммы  $10 \times 12,5 \text{ см}^2$ , сделанной гелий-неоновым лазером, составляет  $160\,000 : 1$ . Надо не только иметь большую область детектирования, но и регистрировать звук почти непрерывно по всей этой области. Кроме того, необходимо обеспечить устойчивую, не зависящую от направления чувствительность к звуку низкой интенсивности.

Вторая проблема связана с продольными искажениями изображения в направлении оси опорной волны, вызываемыми разницей между длиной записывающей (звуковой) и восстанавливающей (световой) волн. Как я уже писал, эта проблема может быть устранена путем уменьшения голограммы в отношении применяемых длин волн. Но это трудно сделать, так как отношение длин волн при частоте  $1 \text{ Мгц}$  (типичной для медицинских приложений) имеет порядок  $2370 : 1$ , а полосы акустической голограммы становятся такого же размера, как и полосы оптической голограммы. Кроме того, так как восстановленное изображение находится в том же отношении к оригиналу, для его рассмотрения требуется микроскоп, а это снова создает искажение. Если даже не обращать внимание на искажение, то удастся рассматривать изображения лишь одномерными или двумерными при трехмерной голограмме. Смотреть через голограмму, как через окно, уже невозможно. Был внесен целый ряд предложений для преодоления искажений, но для решения этой проблемы требуются дальнейшие исследования.

В области детектирования для ультразвуковой голографии обещающими являются и другие методы, кроме электрических. Новый способ восстановления применяется при использовании термопластической техники записи. Это развитие известного ЛВП-метода, в котором слой термопластика помещается на поверхность воды для непрерывной регистрации голограммы. Другая заманчивая возможность — это применение жидких кристаллов для акустического детектирования.

При низких частотах с длинами волн  $1 \text{ см}$  и более необходимость больших площадей голограмм наводит на мысль, что использование большого набора электронных детекторов является простейшим выходом. Однако большие непрерывные записывающие устройства не практичны в суровых океанских условиях и в геофизических исследованиях.

Методы, описанные до сих пор, представляют собой активные системы: они основаны на применении источника звука для активного озвучивания интересующего предмета. Меня и моих коллег часто спрашивали: может ли акустическая голография работать как пассивная система, т. е. система, которая может делать видимым предмет, который излучает свой собственный звук? Ответ определенно утвердительный. В излучаемом звуке должна быть какая-то степень временной когерентности. Если предмет изготовлен человеком и звук по своему происхождению механический, такой, как шум машины или вибрация панелей, то звук почти обязан иметь определенные частотные компоненты с некоторой степенью когерентности. Набор детекторов мог бы отфильтровать все частоты в спектре, кроме одной, и записать акустическую голограмму обычным образом, используя выход из одного из элементов набора как опорный сигнал для имитации опорной волны.

По-моему мнению, акустическая голография в будущем обещает многое. По мере развития этой области акустическая голограмма может стать магическим окном для ученого, через которое он может видеть строение земной коры, предметы в глубине океана и под его дном и, наконец, даже ткани своего собственного тела.

Дугласская проблемная лаборатория, Калифорния, США

## ЛИТЕРАТУРА

1. B. J. Thompson, [G. B. Parrent Jr., Science J. 3 (1), 42 (1967).
  2. K. S. Pennington, Scientific American 218 (2), 40 (1968).
  3. H. M. A. El-Sum, Science Technology, № 71, 50 (1967).
  4. Acoustical Holography, Ed. by A. F. Metherell, H. M. A. El-Sum, Lewi Larmore, Plenum Press (в печати).
  5. J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill, New York, 1968.
  6. J. B. Develis, G. O. Reynolds, Theory and Applications of Holography Addison-Wesley, Reading, Massachusetts. 1967.
-