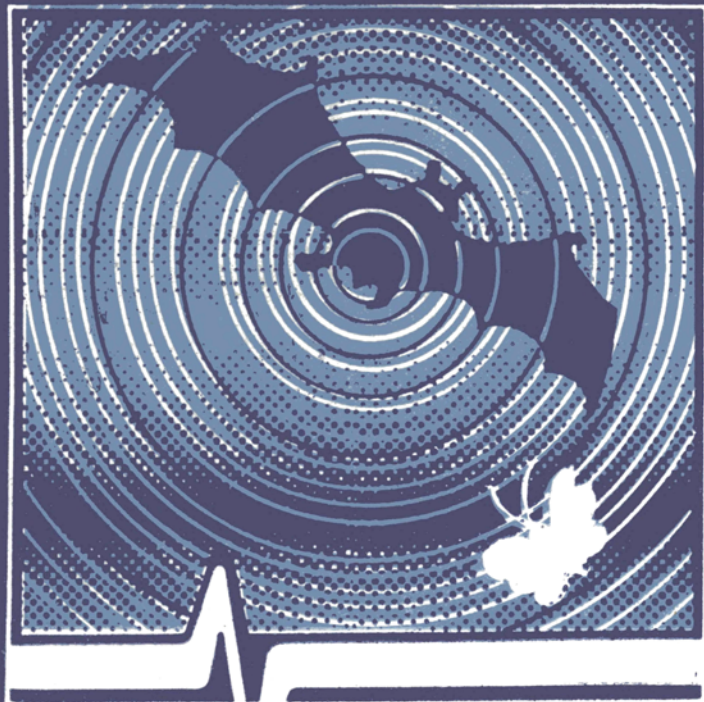


РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И СВЯЗЬ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ 1984/2



П.К.Ощепков
Л.Б.Пирожников
ЗВУКОВИДЕНИЕ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
И СВЯЗЬ**

2/1984

Издается ежемесячно с 1966 г.

П. К. Ощепков,
Л. Б. Пирожников

ЗВУКОВИДЕНИЕ

Издательство «Знание» Москва 1984

ББК 32
О 97

ОЩЕПКОВ Павел Кондратьевич — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, заслуженный изобретатель РСФСР.

ПИРОЖНИКОВ Лоренц Богданович — радиоинженер, много работал в радиолокации, интроскопии, голографии и в ультразвуковой технике. За разработку приборов неразрушающего контроля награжден Золотой и Бронзовой медалями ВДНХ СССР. Автор многих изобретений и научно-художественных публикаций.

Рецензент — А. И. Потапов, доктор технических наук.

Ощепков П. К., Пирожников Л. Б.
О 97 Звуковидение. — М.: Знание, 1984. — 64 с. —
(Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Радиоэлектроника и связь»; № 2).
11 к.

В брошюре собраны основные сведения, отражающие современное состояние нового направления в науке — звуковидения. Описаны технические возможности и конструктивные особенности ультразвуковых систем и систем акустической голографии, предназначенных для «визуализации» звука и получения информации из «глубины вещества».

Брошюра рассчитана на лекторов, пропагандистов, студентов и инженеров.

2401000000

ББК 32
6Ф2.7

Предисловие

Звуковидение — очень молодая область науки и техники. Оно возникло сравнительно недавно, всего каких-нибудь 40—50 лет назад: человек захотел увидеть «невидимое». Зачем это ему понадобилось? Ведь, казалось бы, он получает довольно обширную информацию о предметах внешнего мира. А основной причиной этого желания было получение информации о внутренней структуре большинства физических тел. Оказалось, что не все предметы прозрачны для световых лучей.

Начались поиски других «проникающих» лучей, таких, например, как гамма-, рентгеновские, инфракрасные и ультрафиолетовые лучи. Эти лучи позволяли проникнуть в незримое и увидеть внутреннюю структуру многих физических тел и сред.

Интересно, что в перечне проникающих излучений не фигурировали звуковые волны. А ведь о них ученые знали издавна. Так, например, попытки практического использования звуковых лучей восходят еще ко временам Леонардо да Винчи.

Почему-то так сложилось, что вплоть до первой половины XX в. ученые не обращали серьезного внимания на звуковые колебания. Это, конечно, не значит, что ими не занимались. Длительное время изучался диапазон упругих волн, к которому и относятся звуковые волны, изучались их свойства и особенности.

Надо отдать должное нашей отечественной науке, нашим русским и советским ученым, которые внесли значительный вклад в тот раздел акустики, который занимался изучением практических возможностей использования звуковых волн. В 1910 г. русский ученый

П. И. Лебедев выявил особенности звуковых колебаний высокой частоты, названные ультразвуком. После опубликования им результатов своих исследований ультразвук стали заниматься ученые многих стран.

В 1916 г. французский ученый Поль Ланжевен предложил использовать пьезоэлектрический эффект генерации в воде ультразвуковых колебаний высокой частоты для получения информации об исследуемом объекте. Так зародился метод эхолокации.

Шли годы, в лабораториях всего мира изучались особенности распространения ультразвука в различных средах. В 1928 г. советский ученый С. Я. Соколов берет патент на первый в мире ультразвуковой дефектоскоп, позволяющий выявлять дефекты в металле. Ровно через год (в немецком журнале «Электрише нахрихтен техник», 1929, т. 6) появляется статья С. Я. Соколова о том, что под воздействием ультразвуковых колебаний поверхность жидкости деформируется в соответствии с распределением по ней интенсивности ультразвукового поля и что эта деформация может быть визуализирована с помощью световых волн (отражение света от этой поверхности). Подобная регистрация изображения, названная методом поверхностного рельефа, позволяла получать теневые изображения, в частности его контуры.

В 1936 г. С. Я. Соколов создал первый в мире электронно-акустический преобразователь, использованный им в приборе, который получил название ультразвукового микроскопа Соколова. Собственно, этот прибор и был первым в мире прототипом звуковизора.

Интерес к звуковидению возрос после опубликования работ видных советских акустиков Л. Д. Розенберга, Г. Д. Малюжинца и Б. Д. Тартаковского по теории звуковой оптики, методов расчета звуковых линз и объектов.

Значительный вклад в технику звуковидения внесли один из авторов этой книги П. К. Ощепков, Д. С. Грасюк и Ю. Б. Семенников, которые разработали новый тип электронно-акустического преобразователя — «Уникон».

Сейчас во всем мире проводятся большие работы по звуковидению с использованием достижений голографии, в частности акустической голографии. В настоящее время звуковидение стало применяться в ряде областей тех-

ники. Ею занимаются как в СССР, так и за рубежом.

В 1982 г. издательство «Мир» опубликовало перевод книги известного венгерского акустика П. Грегуша под названием «Звуковидение». В этой книге в сжатой форме описаны предпосылки звуковидения, его основы и некоторые примеры его практического применения. Это первая книга, в которой последовательно описаны вопросы этой новой области техники. Авторы надеются, что брошюра будет полезна для специалистов разных отраслей техники и может служить как бы введением для дальнейшего глубокого изучения звуковидения.

Доктор технических наук А. И. ПОТАПОВ

Введение

Природа наградила человека пятью органами чувств, позволяющими ориентироваться в окружающем нас мире. Из них наиболее совершенными являются зрение и слух. Начнем со зрения. Это, можно сказать, наше главное чувство. Благодаря зрению мы получаем наибольшую часть информации об окружающем мире. Видеть — это значит различать все окружающее, во всех подробностях, в любое время дня и ночи, при больших и малых освещенностях. А для этого необходимо располагать органом или устройством, которое, во-первых, реагировало бы на минимальные освещенности (когда энергия света поступает лишь редкими порциями), во-вторых, было бы в достаточной степени безынерционным и высокочувствительным.

Не следует забывать, что в процессе зрения участвует свет, роль которого в нашей жизни велика. Проблема зрения блестяще решена природой. Здесь она проявила «максимум изобретательности». Так, например, рецепторная зрительная клетка реагирует на единственный фотон. Но оказывается, что энергия фотона достаточна для возбуждения только одного атома или одной молекулы. Поэтому при использовании лишь этой энергии информация о поглощении фотона не могла быть передана за пределы точки поглощения и не достигла бы центральной нервной системы. Установлено,

что нервный импульс влечет за собой движение по крайней мере нескольких миллионов атомов или ионов. Значит, энергию поглощенного фотона нужно усилить в миллионы раз, для того чтобы она вызвала нервный импульс. Вот для этого природой и был создан усилитель фотонов. Кстати, «схема» этого усилителя остается до сих пор загадкой для ученых.

Информация, создаваемая другими органами чувств, в том числе и слухом (вторым по значимости органом чувств), несравненно грубее и слабее зрительной. И тем не менее мы также используем слух для получения дополнительной информации об окружающем мире. Ведь окружающий нас мир «наполнен» самыми разнообразными звуками. Именно благодаря природной способности слышать звуки и быстро реагировать на них, а также и благодаря зрительному восприятию информации многие живые организмы обязаны своим существованием на Земле.

Как мы воспринимаем звуки? Мы регистрируем звуки особыми приемниками — механорецепторами. Они очень чувствительны к звуковым колебаниям и быстро реагируют на них. Так, например, рецепторная слуховая клетка воспринимает такие колебания барабанной перепонки, амплитуды которых не достигают и миллиардной части миллиметра. Это расстояние сравнимо с диаметром атома...

Однако, как уже говорилось, слуховая, или, вернее, звуковая, информация по сравнению со зрительной оказывается довольно бедной и недостаточной. И к этому имеется ряд причин.

Во-первых, скорость восприятия звуковых сигналов на много порядков меньше, чем скорость восприятия света. Во-вторых, несмотря на то что человек живет в мире разнообразных звуков, он не обладает способностью воспринимать их как зрительные образы. Это значительно уменьшает ценность полученной звуковой информации. Ведь люди больше доверяют тому, что они видят.

Наш мозг упорядочивает всю полученную с помощью органов чувств информацию о внешнем мире, и в первую очередь по зрительным представлениям. Уверенность в непогрешимости знания, получаемого о внешнем мире с помощью зрения, свойственна человеку. И не слу-

чайно народная мудрость гласит: «Лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать».

Однако некоторым животным присуща способность не только излучать ультразвуковые сигналы и слышать их, но и ориентироваться по ним. Это помогает им в темноте добывать пищу или убегать от преследования.

Приведем несколько примеров. Ночная бабочка, излюбленное лакомство летучих мышей, чрезвычайно чутко реагирует на ультразвуковые сигналы, которыми ее «ощупывает» летучая мышь, и быстро скрывается от нападения. Правда, это ей не всегда удается...

Дельфины имеют такой совершенный природный гидролокатор, о котором мы можем только мечтать. Они подплывают безошибочно к дробинке, брошенной в воду на расстоянии 15—20 м от них, предварительно «ощупав» ее ультразвуковым пучком. Интересно, что, «создав» эхолокаторы, природа позаботилась также и о возможности борьбы с ними. Мотыльки из семейства арктиид, заслышав ультразвуковые сигналы, испускаемые летучей мышью, начинают издавать сами ультразвуковые сигналы. Оглушенная помехами, летучая мышь теряет ориентацию, а мотыльки разлетаются в разные стороны. Получается, что в воздухе идет настоящая «ультразвуковая война» с применением ультразвуковых «глушилок»... Здесь невольно напрашивается аналогия с применением радиолокации в авиации. Механизм такой «локации» объекта животными и птицами еще пока полностью неясен.

В начале второй мировой войны метод природной эхолокации был использован французским ученым Пелем Ланжевром в приборе для обнаружения немецких подводных лодок по отраженному эхо-сигналу. Впоследствии способ эхолокации был значительно усовершенствован и применен в технике. Он позволил получать данные не только о расстоянии до объекта наблюдения, но и более содержательную информацию о нем.

Информационные системы человека и большинства представителей животного мира не приспособлены для преобразования звуковой информации в пространственно зрительные образы. Кроме того, как уже указывалось выше, эхо-сигнал одномерный и не позволяет формировать изображение. Значит, «изображения» как такового нет. Но если бы даже допустить, что каким-либо образом мы получили бы возможность принять эту зву-

ковую информацию, а затем смогли бы преобразовать ее в зрительную, то она была бы неполноценной и крайне бедной. Она аналогична звуковой информации, которую воспринимает слепой или человек с завязанными глазами. Конечно, такая информация никого бы не удовлетворила.

Очевидно, для получения полноценной звуковой информации нельзя обойтись без формирования двухмерного изображения наблюдаемого объекта. А для этого надо, чтобы звуковая информация содержала бы в себе сведения о пространственном распределении интенсивности звукового поля, рассеянного объектом. Но и этого будет недостаточно. Получается такой парадокс. Человеку не дано непосредственно преобразовывать звуковое изображение в видимое. А между тем он способен воспринимать и анализировать акустический двухмерный информационный образ только лишь в том случае, когда этот образ становится «видимым». Как же быть? Получается, что наблюдатель должен иметь дело с неким оптическим аналогом звукового изображения. И только в этом случае звуковое изображение, несущее информацию о «невидимом объекте», с наиболее возможной достоверностью может быть воспринято наблюдателем. Так мы подошли к проблеме звуковидения. Понадобился «видимый звук», а для этого надо было научиться его визуализировать. Но есть ли в этом такая уж насущная необходимость? Казалось бы, раз зрительная информация находится вне конкуренции с другими источниками информации, создаваемыми органами чувств человека, то к чему нам визуализация явления, которое обычно воспринимается на слух?

Но, как известно, не всякая информация об объекте может быть получена с помощью зрения. Установлено, что свет не может проходить сквозь большинство физических тел и сред. Поэтому увидеть внутреннюю структуру большинства физических тел мы не можем. Значит, для нас пропадает часть информации о предметах окружающего нас мира. А сколько бы полезных сведений можно было бы получить из невидимого мира!

Как же расширить человеческие возможности восприятия внешнего мира? Человек издавна стремился разработать способы получения информации, лежащей за пределами сфер его естественных возможностей. Это и привело его к использованию других проникающих из-

лучений. Оказалось, что почти все тела в той или иной степени «прозрачны» для ультразвуковых волн. Более того, звук может хорошо распространяться в тех средах, в которых свет либо совсем не распространяется, либо поглощается настолько быстро, что не успевает «донести» изображение предмета до наблюдателя или приемника светового изображения.

У звуковых колебаний имеется еще одно существенное преимущество перед световыми колебаниями — они когерентны. Это свойство и позволило создать акустическую голографию.

Если принять во внимание, что формирование изображения с помощью световых и звуковых волн происходит в соответствии с основными законами геометрической оптики, то можно сделать вывод о том, что проблема звуковидения практически осуществима. Нужно было только создать основные элементы его системы: преобразователь акустических колебаний в световые и генераторы звуковых колебаний требуемой частоты.

Определим теперь термин «звуковидение». Звуковидение — это совокупность методов и средств для получения оптического изображения звукового поля, возникающего в результате взаимодействия акустических (звуковых) волн и объекта.

Видимый звук и его особенности

Из всей истории науки просматривается стремление изображать результаты различных измерений визуально. Такие измерения прочно вошли в быт, и мы к ним привыкли. Спидометр в автомобиле, термометр за окном, часы на руке улавливают изменение некоторых величин, передают его на циферблат, где оно становится видимым благодаря стрелке-указателю или движущемуся световому пятну. Это позволяет нам «видеть» характеристики меняющихся событий и явлений.

Были также сделаны попытки зарисовки звуковых явлений, возникающих при распространении звуковых колебаний, что позволило наблюдать и измерять эффекты дифракционных процессов, при огибании звуковыми волнами препятствий. Кроме того, стало возможным изучать свойства звуков, лежащих за пределами нашего

слухового восприятия. И все же, несмотря на большие возможности, которые представляет подобная визуализация для изучения поведения и свойств звуковых волн в различных средах, ее результаты приемлемы главным образом для научных исследований.

Но зачем же понадобилось делать «видимой» зарисовку явления, которое можно принять на слух? Это необходимо для того, чтобы экспериментатор смог бы более тщательно проанализировать те или иные тонкости данного явления. Поэтому не удивительны многочисленные попытки визуального изучения звуковых явлений. Это позволяет хорошо иллюстрировать и представлять в виде моделей волновые процессы, характерные и для звука, и для оптических явлений.

Итак, одна сторона взаимосвязи звука и света — визуализация явлений, связанных с распространением звука. Вторая сторона — визуализация звуковых изображений предметов. В последнем случае мы имеем дело с «видимым» звуком. Это уже прямо относится к проблеме звуковидения. Так что же такое «видимый звук»?

Обычно понятие «видимый» ассоциируется с предметом, информацию о котором переносит свет, излучаемый самим предметом либо отраженный от него. Лучи света создают видимое изображение предмета. А если предмет непрозрачен для световых лучей? Ведь их в природе большинство. В таких случаях приходится использовать другие виды проникающих излучений, как, например, гамма-, рентгеновские, инфракрасные лучи, радиоволны. Каждое тело прозрачно для определенного вида проникающего излучения. Это подтверждается многолетней практикой. Иногда в практике бывают случаи, когда вышеперечисленные «невидимые лучи» оказываются непригодными для целей просвечивания. Вот тогда выручают звуковые волны, также относящиеся к категории невидимых лучей, для которых многие предметы и среды, не прозрачные для световых волн, оказываются прозрачными.

Говоря о звуковых волнах, мы имеем в виду главным образом ультразвуковые, которые благодаря своим особенностям получили широкое практическое применение. Они и позволили получать информацию из «недр» исследуемого непрозрачного тела или среды, не прозрачной для световых волн. Ультразвуковые волны дают возможность не только обнаруживать неоднородности

структуры (внутренние раковины, трещины), но и контролировать малейшие изменения состояния среды: температуру, давление, химический состав и др. Этим занимается ультразвуковая дефектоскопия. На экране электронно-лучевой трубки дефектоскопа появляются эхо-сигналы — импульсы, по которым можно судить о наличии дефектов в испытываемых изделиях. Это уже визуальная звуковая информация. Однако такая информация позволяет судить лишь о том, есть ли дефект или его нет. Конечно, для всесторонней оценки дефекта (размер, форма, местоположение и т. д.) этих сведений недостаточно. Это одноэлементная информация. Желательно же располагать более полной информацией о дефекте и видеть на экране дефектоскопа не сигналы — импульсы, а изображение внутренней структуры дефекта. Это уже будет многоэлементной информацией об объекте. А она требует обязательного создания звукового изображения предмета. Более того, для того чтобы «увидеть» такое звуковое изображение, его надо сделать видимым. Другими словами, такое звуковое изображение надо воспроизвести в свете. Здесь и понадобится нам «видимый звук».

Вот теперь можно определить понятие «видимый звук» как воспроизведенное в свете звуковое изображение.

Напомним, что для получения четкого и отдельного изображения одного тела на фоне другого на рентгеновском снимке или на экране рентгеновского аппарата необходимо, чтобы их оптические плотности значительно отличались (по крайней мере в 2 раза). Ультразвук же значительно чувствительнее реагирует на изменение свойства вещества. Он позволяет обнаружить разницу в оптической плотности исследуемых объектов, отличающихся друг от друга всего на несколько процентов. Поскольку ультразвук значительно слабее поглощается в металлах, бетоне и тому подобных материалах, то применяемые для просвечивания дефектоскопы требуют небольших мощностей излучения и имеют малые габариты по сравнению с рентгеновской аппаратурой, не оказывают вредного действия на оператора.

Теперь перейдем к возможности осуществления с помощью ультразвука процесса, подобного оптическому видению. Здесь уместно провести аналогию со световы-

ми волнами, участвующими в зрительном процессе. В процессе зрения, происходящем с помощью световых волн, воспринимаются волны, отраженные от рассматриваемого объекта. Звуковые волны аналогично свету могут излучаться предметом, отражаться от него, проходить сквозь него с различной степенью поглощения и, что очень важно, создавать звуковые изображения предмета. Следовательно, по аналогии со световыми волнами, под просвечиванием непрозрачных тел ультразвуковыми волнами мы подразумеваем способность воспринимать ультразвуковые волны, отраженные от объекта, и упорядочивать их в пространстве так, как это делает хрусталик нашего глаза.

Так появилось новое техническое направление, которое мы определяли выше как «звуковидение». И это уже не просто визуализация явлений, связанных с распространением ультразвуковых колебаний, а видение при помощи ультразвука изображений внутренней структуры оптически непрозрачных тел. При решении проблемы визуализации звукового изображения ученым пришлось столкнуться с рядом трудностей. И основная из них состояла в том, что системы человеческого организма не приспособлены для непосредственного преобразования звуковой информации в пространственные зрительные образы.

Для того чтобы преодолеть ограничения, поставленные человеку природой, надо было разработать метод, позволяющий визуализировать звуковое изображение. Человек способен воспринимать и анализировать звуковое двухмерное изображение предмета только тогда, когда оно становится видимым. Но видеть можно лишь в том случае, когда звуковое поле, рассеянное предметом, может быть зарегистрировано так, что его представление сравнимо с оптическим изображением предмета. Значит надо добиваться необходимого соответствия звукового изображения его оптическому аналогу, т. е. изображению, которое мы воспринимаем зрительно. Но это еще не все. Оказывается, недостаточно «увидеть», надо еще «узнать» предмет. Тем не менее человек научился преобразовывать звуковое изображение в оптическое. А к этому имелся ряд предпосылок. И основная из них состояла в том, что процесс распространения звуковых волн аналогичен процессу распространения световых волн.

Звуковые колебания и их параметры

Казалось бы, зачем понадобились звуковые волны, если с задачей внутривидения отлично справляются рентгеновские волны (лучи)? Вот здесь и сказывается одна существенная особенность звуковых волн: они взаимодействуют с веществом на макроскопическом уровне, как со сплошной средой. В результате механические деформации сжатия и сдвига переносятся от одной точки вещества к другой и обладают достаточно высокой проникающей способностью, позволяющей конкурировать с рентгеновскими лучами.

Скорость распространения звука является очень важным параметром. Она зависит от среды, в которой распространяется звук. В более плотной среде волны распространяются медленнее, чем в среде менее плотной, а в более упругой — быстрее, чем в менее упругой. Зависимость скорости звука от среды подтверждена результатами измерения скорости звука в различных материалах: скорость звука в каучуке — 50 м/с, в бетоне — 4800 м/с, в стали — 5000 м/с.

Каковы же основные параметры звуковых волн? Здесь уместно напомнить, что, несмотря на разную природу звука и света, распространение звуковых и электромагнитных волн подчиняется одним и тем же физическим законам и описывается одними и теми же уравнениями. Поэтому все основные параметры, характеризующие волновое движение в частном случае световых волн, полностью относятся к звуковым волнам. Имеется в виду частота, длина, фаза и скорость волны. Частота — это одна из основных характеристик, по которой мы различаем звуки. Человеческое ухо слышит в пределах от 16 до 20 000 Гц. Это слышимые звуки. Звуки, частоты которых ниже 16 Гц, называют инфразвуками, звуковые колебания, частоты которых лежат выше 20 кГц, — ультразвуками.

Влияет ли длина волны на характер распространения волн? Оказывается, влияет и существенно зависит от соотношения между размерами препятствия и длиной волны. Волны слышимых звуков имеют длину порядка десятков сантиметров или нескольких метров. Поэтому окружающие нас предметы, размеры которых не превы-

шают 1—2 м, не будут препятствием для звуковых волн: они их обтекают, не давая звуковой тени. Только препятствия размером более двух метров (например, дом, забор) могут дать звуковую тень. Световые же волны намного меньше звуковых. Они измеряются десятитысячными долями миллиметра. По этой причине все окружающие нас предметы дают резкие тени.

Ультразвуковые волны намного короче звуковых волн слышимого диапазона и измеряются долями миллиметра, поэтому они тоже дают звуковые тени. Эти волны могут быть получены в виде узких пучков, которые по аналогии со световыми принято называть ультразвуковыми пучками.

Ультразвуковые лучи во многом схожи со световыми. Они могут отражаться, преломляться и фокусироваться по законам, совершенно аналогичным законам геометрической оптики: угол падения звукового луча равен углу отражения; при переходе из одной среды в другую ультразвуковой луч преломляется, т. е. изменяет направление своего распространения и т. д.

Законы акустики для слышимых звуков действуют и в области ультразвука. Однако ультразвук имеет некоторые особенности, которые являются следствием малых длин ультразвуковых волн. Первой особенностью является возможность получения узких пучков и концентрации ультразвуковой энергии в заданном направлении и в небольшом объеме. Вторая особенность — это высокая скорость и огромные ускорения частиц среды. Благодаря этому с помощью ультразвука можно обрабатывать твердые и хрупкие тела, например стекло, мрамор, керамику и т. п. Третья особенность ультразвука — это возбуждение им в жидкости кавитационного эффекта. Она используется для ускорения физико-химических процессов в жидких средах, для эмульгирования таких несмешивающихся жидкостей, как вода—масло, ртуть—вода и т. п., а также для очистки поверхности металлических деталей от грязи, жира и ржавчины.

Перечисленные выше особенности ультразвука получили широкое применение в науке, технике и медицине.

Кроме перечисленных свойств, у ультразвука имеется еще одна замечательная особенность — когерентность ультразвукового излучения. Именно эта особенность и позволила использовать ультразвуковые волны в голо-

графии, раздел которой получил название акустической голографии.

Несколько слов о распространении ультразвуковых колебаний. Как правило, ультразвуковые колебания высокой частоты в однородных изотропных твердых телах распространяются строго направленными лучами без существенного затухания. Характерно, что в этом случае степень направленности ультразвуковых лучей зависит от размеров излучателя, частоты колебаний и от величины скорости распространения ультразвука в среде.

Другое дело — неоднородная среда. В этом случае ультразвуковые колебания рассеиваются, испытывают преломление и отражение на границах раздела различных сред. Когда ультразвуковая волна попадает на границу раздела двух сред (например, металл—воздух, бетон—воздух), то происходит почти полное отражение энергии в первую среду и только некоторая часть энергии может пройти во вторую среду.

Коэффициент отражения звуковой волны зависит от угла падения. Если угол падения отличен от 90° , то коэффициент отражения определяется соотношением скоростей распространения звука в рассматриваемых средах. Траектория лучей в этом случае может быть определена по закону синусов. Допустим, мы имеем среду с постоянными акустическими характеристиками: скоростью звука и плотностью. В этом случае фронт звуковой волны от точки ее возбуждения до точки приема будет представлять прямую линию, которую принято называть лучом. А что если среда имеет плоскую границу отражения? Тогда отраженная волна пройдет в точку приема так, как будто бы она была возбуждена в сплошной среде в точке, расположенной зеркально к источнику. Наблюдателю будет казаться, что этот луч исходит из мнимого источника, расположенного на прямой, перпендикулярной плоскости отражения, на расстоянии, равном двойному расстоянию источника от этой плоскости.

И, наконец, то, о чем уже говорилось. При прохождении из среды с одной скоростью звука в среду с другой скоростью изменение направления лучей падающего и отраженного подчиняется закону синусов. Однако здесь имеется одна особенность, зависящая от условий распространения звука в различных средах. Так, например, если звуковая волна переходит из среды меньшей

плотности в среду большей плотности, то при критическом угле падения угол отражения будет равен 90° . А вот если угол падения больше критического угла, то звуковая волна полностью отражается.

В дополнение ко всему сказанному о звуковых волнах следует добавить, что звуковая волна может служить источником информации. Говоря об информации, мы имеем в виду сведения о форме объекта, его пространственном расположении, т. е. положении, а также перемещении объекта. Наряду с этим нас будут интересовать данные о внутренней структуре, деформации и изменении плотности среды.

Как известно, в процессе создания звуковой информации участвуют такие параметры звуковой волны, как частота (или длина волны), фаза и амплитуда.

Начнем с частоты. Сама по себе частота не содержит никакой информации о форме или положении объекта в пространстве. Ведь любая точка пространства может быть источником волны любой частоты. Форма объекта останется той же независимо от того, каким будет цвет излучения источника света, с помощью которого освещается объект. А вот если вместо источника «освещения» определенной частоты (монохроматический источник) использовать многочастотный источник (хроматический источник), то можно получить необходимую информацию о форме объекта. Это объясняется тем, что такой источник «освещения» создает широкополосный (многочастотный) сигнал, несущий информацию как о форме объекта, так и о возможных деформациях ее.

При наличии же сигнала меняющейся частоты можно получить информацию о перемещении объекта.

Второй параметр — амплитуда волны. Фактически это интенсивность источника освещения. Она не содержит информации о расположении объекта в пространстве. Действительно, возьмем два объекта и расположим их в одной плоскости, на одинаковом расстоянии от наблюдателя и осветим их светом различной интенсивности. При рассмотрении их наблюдателем они будут ему казаться удаленными на одно и то же расстояние. Но если объект будет иметь разную плотность, то о ней можно судить по отношению амплитуд световой волны различной интенсивности, прошедшей через них.

А что позволяет судить о форме объекта? Пространственное распределение амплитуд волнового фронта. Та-

кой информационный образ мы называем изображением. Проводя аналогию со световыми волнами, можно сказать, что простейшим звуковым изображением объекта является его тень.

А какую же информацию содержит фаза волны? Фаза — это очень важный параметр волны. Так, например, в голографии она характеризует относительную разность оптических путей, соответствующих рельефу предмета (объекта). Следовательно, фаза содержит информацию о положении объекта. Все сказанное о фазе световой волны в равной степени относится и к звуковой волне.

Значит, для того чтобы получить полную информацию о трехмерном объекте, надо записать амплитудную и фазовую информации. Это, кстати, является основным принципом оптической голографии.

Проблема регистрации фазовой информации применительно к оптическим полям была решена на основе принципов голографии. Позднее эти принципы были распространены на звуковые волны, используемые в ультразвуковой (акустической) голографии.

Звуковое изображение и его особенности

Звуковое изображение можно получить методом, аналогичным методу создания световых изображений. Поэтому вспомним сначала, как получается световое изображение (например, на матовом стекле фотоаппарата), а затем уже перейдем к звуковому изображению.

Пусть в пространстве находится предмет, изображение которого мы хотим получить. Осветим этот предмет источником света. От его поверхности будут отражаться световые лучи. Если поверхность предмета гладкая, то луч света отразится от нее, как от зеркала, в направлении, определяемом основным законом геометрической оптики: угол падения равен углу отражения. Однако, как правило, поверхности предметов шероховаты. Поэтому луч света, вместо того чтобы зеркально отразиться, диффузно рассеивается во все стороны. При этом часть рассеянных световых лучей попадает в объектив, эти лучи создадут в его фокальной плоскости изображение наблюдаемого предмета.

А как получить звуковое изображение предмета? Оказывается, схема его получения незначительно отличается от описанной схемы. Разница заключается лишь в том, что вместо источника света применяется источник звука (вернее, ультразвука), а вместо оптического объектива — звуковой. Тогда в фокальной плоскости объектива получим так называемое звуковое изображение, представляющее собой сгусток звуковой энергии. Так же, как и в случае светового изображения, контуры звукового изображения будут соответствовать контурам наблюдаемого предмета. Отсюда можно сделать такой вывод: несмотря на то что между световыми и звуковыми волнами существует принципиальное физическое различие, аналогия по вопросам создания изображений правомочна.

С оптической точки зрения любой сложный объект всегда можно представить как совокупность отдельных отражающих точек, а изображение объекта — как совокупность изображений этих точек. Значит, звуковое изображение какого-либо объекта — это совокупность изображений диффузно отражающих точек (или участков) его поверхности. Это определение правильное и соответствует нашим представлениям об образовании изображения. Что же физически представляет собой звуковое изображение? Это находящийся в пространстве (в фокальной плоскости объектива) сгусток звуковой энергии, распределение которой более или менее точно воспроизводит форму исследуемого предмета.

Таким образом, учитывая физическую сущность, термин «звуковое изображение» можно определить как, например, рельеф звукового давления в фокальной плоскости звукового объектива, приближенно повторяющий внешний вид рассматриваемого объекта.

Перейдем теперь к качественной стороне звукового изображения.

Мы привыкли к тому, что оптическое изображение предмета всегда соответствует изображению, которое мы воспринимаем зрительно. Однако с звуковым изображением этого сказать нельзя: оно не всегда будет обладать необходимой степенью «похожести» с оригиналом. Причин здесь несколько. И основная из них — это то, что как звуковые, так и оптические изображения получаются в результате взаимодействия с объектом совершенно различных по своей физической природе вол-

новых полей. Поэтому и степень «похожести» полученного изображения с оригиналом будет в обоих случаях различной.

От чего же зависит «похожесть» звукового изображения? Она будет определяться рядом факторов. Одним из них является состояние поверхности предмета (объекта). Оно в равной мере будет влиять как на формирование звукового, так и светового изображения предмета. Мы привыкли оценивать состояние поверхности предмета как светлую или темную, гладкую или шероховатую. Это справедливо для световых лучей. А вот когда световые лучи заменяются на звуковые (акустические), то наши привычные определения поверхности предмета будут совсем иными и не будут совпадать с установившимися понятиями. Это объясняется особенностями распространения звуковых волн в различных телах и средах.

Так, например, «светлая» поверхность — это та, которая отражает большую часть падающего на нее ультразвука, как, например, это имеет место на границе твердого материала и воздуха. Такая поверхность может быть «шероховатой» и отражать падающую на нее энергию диффузно или же «гладкой» — в этом случае пучок отражается так же, как и световой пучок, падающий на зеркало. Поверхность будет «темной» в том случае, если ультразвуковая волна попадает между двумя средами, акустическое сопротивление которых почти одинаково (критическая поверхность).

Таким образом, поверхность, которая для световых волн является шероховатой, для звуковых оказывается гладкой (зеркальной). Светлая же поверхность для звуковых волн будет темной для световых лучей. Значит, световые и звуковые лучи будут по-разному отражаться от поверхности предмета.

Кроме того, на «похожесть» изображения предмета его зрительному образу будет также влиять длина волны источника освещения и ее взаимодействие с поверхностью предмета. Так, например, если световая или звуковая волна падает на гладкую поверхность, шероховатости которой значительно меньше длины волны, то, как уже говорилось выше, наибольшая часть энергии отразится в строго определенном направлении. А вот если размеры шероховатостей равны или больше дли-

ны волны, то падающая энергия отражается во все стороны, что соответствует диффузионному отражению.

В результате диффузные отражения рассматриваемого предмета в него не попадут. В этом случае получится изображение рассматриваемого предмета, у которого не будут видны гладкие участки. Значит, изображение предмета будет не совсем точным. И этим несоответствием мы обязаны прежде всего состоянию поверхности предмета наблюдения и длине волны источника освещения. Это касается в равной степени как светового, так и звукового изображения. Однако не следует делать вывод о невозможности получения звукового изображения предмета, соответствующего его зрительному образу. Все будет зависеть от системы звуковидения, ее разрешающей способности и правильного подбора длины волны и частоты источника освещения. Длина волны и частота — это именно те факторы, которые влияют на качество изображения. Поэтому правильный выбор частоты и длины волны играет важную роль. Мы знаем, что любая оптическая система характеризуется разрешающей способностью. Так, например, такие приборы, как фото- и кинокамеры, бинокли и очки, дальномеры и т. п., имеют очень высокую разрешающую способность. С их помощью мы видим рассматриваемые предметы довольно четко. И это получается благодаря малости длин волн видимого диапазона. Значит, разрешающая способность прибора определяется длиной световой волны: чем короче длина волны, тем лучше передаются границы предметов и мелкие детали.

Фигурально длину волны можно сравнить с грифелем карандаша, рисующего изображение. Очевидно, чем тоньше грифель, тем больше деталей получится на изображении. Самый тонкий грифель «прорисует» самые мелкие детали.

Звуковые волны значительно длиннее световых. Так, например, ультразвуковым волнам с частотой 15 МГц соответствует длина волны 0,1 мм. Это в 200 раз больше длины световой волны. Очевидно, что в случае применения этих волн разрешающая способность будет ниже, чем при световых. Здесь будет еще играть роль среда.

При очень высоких частотах ультразвуковых колебаний влияние затухания ограничивает их применение для получения звукового изображения.

Практически установлено, что ультразвуковые частоты 10^7 — 10^8 Гц (длины волн десятые и сотые доли миллиметра) наиболее приемлемы для звуковидения. Кстати, разрешающая способность звуковых систем не уступает разрешающей способности оптических. Следовательно, в этом случае можно говорить об очень тонком грифеле, которым можно передавать интересующие нас детали изображения. Так, например, уже для колебаний с частотой 10^4 МГц длина волны будет равна 0,0005 мм.

Ультразвуковая техника непрерывно развивается и перспектива получения более высоких частот становится реальной. Наступит момент, когда разрешающая способность звуковых волн будет превосходить разрешающую способность световых.

Вот теперь можно сказать, что получение качественных звуковых изображений, т. е. степень «похожести» изображения на объект, будет определяться двумя независимыми факторами: плотностью распределения на поверхности объекта диффузно отражающих точек и разрешающей способностью звукового объектива.

Как следует из приведенных выше рассуждений, на эти оба фактора благоприятно сказывается уменьшение длины волны. Благодаря этому увеличивается степень диффузности отражения и улучшается разрешающая способность. Но нельзя бесконечно уменьшать длину волны. Во-первых, это достигается ценой больших технических усилий и, во-вторых, не всегда приводит к получению новой, дополнительной информации об объекте. Кроме того, при этом значительно возрастает затухание ультразвуковых волн.

Итак, мы установили, что разрешающая способность характеризует систему и является в основном критерием качества используемой аппаратуры. Не всегда звуковое и оптическое изображения похожи друг на друга. Это является результатом взаимодействия с предметом разных волновых полей (светового и звукового). Указанное отличие обусловлено различной природой рассеяния звуковых и световых волн. Так, например, некоторые объекты, прозрачные для световых волн, могут иметь значительный контраст в звуковом изображении. Не следует забывать и о влиянии поверхности объекта.

Все это приводит к тому, что при оптической визуализации такого изображения и возникает совсем иной

информационный образ, отличный от того, который мы получаем с помощью оптических методов. Поэтому в ряде случаев бессмысленно добиваться их сходства, а тем более оценивать их с помощью одних и тех же критериев качества. Ведь качество светового изображения объекта мы оцениваем путем непосредственного сравнения его с реальным объектом (т. е. через восприятие объекта невооруженным глазом).

А вот в случае звукового изображения у нас нет даже такой возможности, так как мы не можем непосредственно видеть мир звуков. Поэтому прежде чем искать сходство между звуковым изображением и его оптическим аналогом, необходимо осмыслить, что мы видим при рассмотрении звукового изображения. Только тогда, когда мы воспримем его зрительно, можно говорить о соответствии его оптическому аналогу.

Поясним сказанное примером. Возьмем в качестве объектов звуковидения простейшие геометрические фигуры, изготовленные из металла, — шар и цилиндр. Их поверхности хорошо отшлифованы. Оптический образ этих фигур хорошо нам знаком. Для получения звукового изображения «осветим» их звуковыми волнами — звуковое изображение окажется резко отличающимся от привычного образа. Ведь поверхность шара, несмотря на то что она хорошо отшлифована, для световых волн окажется шероховатой, а для звуковых волн — гладкой (зеркальной). Так же обстоит и с цилиндром. Поэтому звуковое изображение шара мы увидим в виде яркой точки, а цилиндра — яркой линии, совпадающей с его образующей.

Но такая «непохожесть» не характерна для качества звукового изображения. Как уже указывалось выше, на качество будет влиять длина волны. В приведенном примере мы использовали звуковые колебания довольно низкой частоты. Повышение частоты, а следовательно, уменьшение длины волны, приведут к увеличению разрешающей способности системы и более высокой степени приближения звукового изображения к знакомому оптическому образу предмета. Поэтому стремление к использованию звуковых волн в качестве источника информации может быть вполне оправданным.

Говоря о звуковом изображении, мы никогда не касались вопроса о том, как оно формируется. А это очень

существенно. Оказывается, звуковое изображение может быть сформировано как при прохождении звука через объект, так и при отражении от него.

Кстати, под изображением понимается распределение в плоскости энергии (интенсивности) волны, несущей информацию. При этом формируется двухмерный образ, каждая точка которого соответствует точке исходного объекта. А это значит, что полученный таким путем образ в достаточной мере точно воспроизводит исходный объект.

Способ формирования звукового изображения влияет на общий вид полученных изображений. Так, установлено, что изображение, полученное при прохождении звуковой волны через объект, будет существенно отличаться от изображения, полученного при ее отражении от объекта.

Поясним это на примерах.

Допустим, что звуковая волна проходит через объект. В этом случае звуковое изображение образуется за счет энергии, прошедшей через объект волны.

В результате прохождения звуковой волны формируется плоское звуковое изображение, потому что две отображаемые координаты обычно являются координатами плоскости. А если объект объемный, или, как его называют, трехмерный? Это значит, что он характеризуется тремя измерениями: шириной, высотой и толщиной. Все три измерения определяют объем предмета, а также его расположение в пространстве. Другими словами, наблюдая объемный предмет, можно было бы еще ощутить глубину пространства. Но ведь получаемое нами звуковое изображение объекта плоское, т. е. двухмерное. Оно не содержит информации о глубине, по существу — это проекция на плоскость. Здесь можно провести аналогию с обычной фотографией, когда вся глубина реального предмета словно зажата в одной плоскости. Характерной особенностью описанного метода формирования звукового изображения при прохождении звуковой волны через объект является отсутствие каких-либо формирующих устройств (линз, зеркал). Поэтому такое звуковое изображение можно рассматривать как двухуровневую регистрацию.

Особым случаем формирования изображения при прохождении звуковой волны является так называемый

теневого метод. Он очень прост. При «просвечивании» объекта звуком непосредственно за ним образуется резкая тень. Недостатком этого метода является значительное размывание границы тени вследствие дифракции и уменьшение ее интенсивности. Это затрудняет его широкое применение в технике и медицине.

Перейдем теперь к другому примеру: звуковая волна отражается от объекта. Если при этом так же, как и в описанном выше способе, не применять линзовых устройств, то метод отражения звуковой волны от объекта не позволяет точно воспроизвести форму объекта. Это нетрудно понять. Ведь при отражении звуковое изображение образуется в результате хаотического рассеяния волны. Поэтому-то звуковой образ не содержит в явном виде пространственной информации о форме объекта. Если же использовать для формирования объекта зеркала или линзы, фокусирующие звуковую энергию, рассеянную объектом, то можно добиться точного его воспроизведения.

Формирование звуковых изображений

Несмотря на то что формирование изображения с помощью световых и звуковых волн происходит в соответствии с основными законами геометрической оптики, поиски средств преобразования звукового двумерного информационного образа в оптически видимый продолжались вплоть до начала XX в. Только лишь в начале нашего века они увенчались успехом.

Проблема звуковидения зависела от двух факторов: 1) возможности генерировать звуковые колебания очень высокой частоты; 2) преобразования переносимой звуковыми волнами информации в видимое оптическое изображение, т. е. преобразование одного вида энергии в другой. Усилиями ученых разных стран была наконец получена реальная возможность генерации звуковых колебаний высокой частоты. Это было очень важно для решения проблемы звуковидения. Ведь для получения изображения исследуемого объекта правильной геометрической формы было необходимо, чтобы длина ультразвуковых волн высокой частоты была по крайней мере

на порядок величины меньше общего размера «изображаемого» объекта. Тогда полученное изображение получится неискаженным по своим геометрическим размерам. Следующим этапом разработки системы звуковидения являлась проблема преобразования.

Для ее решения надо было научиться регистрировать пространственное распределение интенсивности звукового поля с целью получения звукового изображения.

Первым, кто решил проблему регистрации (1936 г.), был советский физик-акустик С. Я. Соколов. Кстати, им же был введен и сам термин «звуковидение».

Работы по преобразованию переносимой звуковыми волнами информации в видимое оптическое изображение велись в разных странах. Однако большинство этих работ не получили практического применения.

С. Я. Соколов и другие советские ученые в 1936 г. разработали электронно-акустический преобразователь, благодаря которому звуковидение перешло из разряда перспективных областей в практическую область.

Все существующие методы получения оптических изображений распределения интенсивности звукового поля можно разбить на две группы: 1) методы преобразования звуковых колебаний в электрический сигнал, пропорциональный интенсивности звука и 2) методы, в основе которых лежит изменение оптических свойств регистрирующего материала вследствие его взаимодействия со звуковым полем.

В устройствах звуковидения первого типа применяется техника сканирования, что приводит к дискретизации изображения. Устройства второго типа представляют собой непрерывные пространственные детекторы, непосредственно преобразующие ультразвуковое изображение в оптическое. Наибольшее распространение в настоящее время получили устройства первого типа.

А теперь расскажем об этих двух способах формирования звуковых изображений. Не вдаваясь пока в детали получения звукового изображения, следует особо отметить, что оба способа роднит само формирование звукового изображения. В обоих случаях в фокальной плоскости звукового объектива получается звуковое изображение. Визуализация же изображения осуществляется различными методами. Теперь перейдем к схеме звуковидения.

Основная схема звуковидения аналогична схеме видения в световых лучах (рис. 1).

Например, объектив является важным элементом как схемы видения в световых лучах, так и схемы звуковидения. Между оптическим и звуковым объективами нет принципиальной разницы. Практика показала, что вогнутое зеркало с одинаковым успехом фокусирует как световые, так и звуковые волны.

А вот что касается звуковой линзы, то здесь сказывается различная природа колебаний. Внешне, да и по форме звуковая линза напоминает оптическую (выпуклую или вогнутую). Наибольшие же трудности возникают при ее изготовлении. Большую роль играет выбор материала для изготовления линзы. По аналогии с оптической линзой, в которой скорость света в стекле меньше скорости света в окружающем воздухе, скорость распространения звука в материале должна быть меньше, чем в окружающей среде.

Кроме того, выбранный материал должен обладать малым поглощением энергии звуковых волн. И наконец, отражение звуковых волн на границе линза—среда должно быть сведено к минимуму. Это одно из условий прозрачности. А это значит, что звуковые лучи должны проходить через линзу с минимальными отражениями на границе.

Назначение линзы — формировать звуковое изображение. Можно определить звуковую линзу, как устройство, которое реализует известную связь между распределением звукового поля на предмете и его простран-

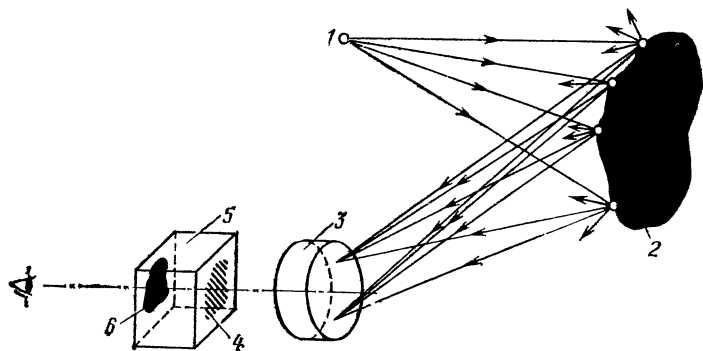


Рис. 1

венным спектром (т. е. спектром пространственных частот передаваемых линзой) и звуковым изображением предмета. В этой зависимости спектру пространственных частот предмета отводится большая роль. Ведь он определяет расположение линзы и предмета, что, в свою очередь, позволяет установить как положение, так и размер получаемого звукового изображения в плоскости изображения линзы.

В качестве материала для звуковых линз используют твердые тела: пластмассы (плексиглас), металлы (алюминий), керамику (титанат бария) и бетон (рис. 2). Твердые линзы удобнее в обращении, однако их работа очень зависит от скорости распространения в них звука.

В процессе изготовления звуковых линз выявились некоторые неожиданности, связанные с применением ультразвуковых колебаний, начиная с 2—3 МГц и выше. Сказывается поглощение ультразвуковых волн в материале (особенно в пластмассах). Ультразвуковая техника рекомендует производить в этом случае «просветление» звуковых линз, что аналогично просветлению оптических линз и производится путем нанесения на поверхность объектива очень тонких переходных слоев. Это осуществляется покрытием поверхности, например, алюминиевой линзы тонким слоем плексигласа или бакелита. В результате «просветленная» звуковая линза пропускает 90% энергии падающих на нее звуковых лучей даже на самых высоких частотах. Мы уже говорили, что для формирования звукового изображения можно применять не только звуковые линзы, но и зеркала.

Однако оказалось, что зеркала искажают изображение, так как затевают существенную часть лучей, па-

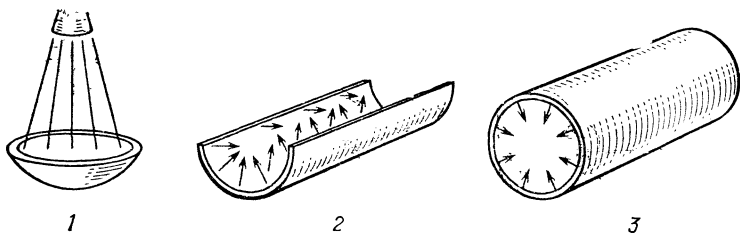


Рис. 2

дающих на зеркало. Поэтому в системах звуковидения чаще всего можно встретить звуковые линзы — объективы, состоящие из одной или двух линз.

К сведениям об акустических (звуковых) линзах следует добавить, что звуковые изображения могут формироваться не только линзами, но и зонными пластинками Френеля.

Практически одна и та же зонная пластинка может использоваться как для озвучивания предмета, так и для получения его изображения. Акустическая зонная пластинка имеет недостаток, заключающийся в том, что в отличие от звуковой линзы использует только половину приходящей энергии.

Визуализация звуковых изображений

Для наблюдения ультразвуковых полей было предложено много различных методов визуализации (их известно сейчас свыше 20). Все они используют те или иные физические явления, связанные с наличием звуковой энергии в данной точке звукового изображения.

Большое значение имеет величина плотности потока звуковой энергии, измеряемая в ваттах на квадратный сантиметр. Этот параметр характеризует звуковое давление. Различия в величине звукового давления приводят к появлению различий в плотности среды, в амплитудах колебаний и т. п. Поэтому принцип большинства методов визуализации звукового изображения основан на создании тех видимых изменений плотности среды, которые возникают под действием звукового давления.

Выделяют несколько основных групп методов визуализации: фотографические и химические, оптические и механические, электронные. Они различаются не только технической реализацией, но и пороговой чувствительностью, необходимым временем регистрации, сложностью и общим качеством изображения.

Мы не будем останавливаться на описании всех предложенных методов визуализации, а рассмотрим только наиболее характерные и интересные. Напомним, что звуковидение имеет дело с ультразвуковыми колебаниями с диапазонами частот от 20 кГц до 30 МГц. Что же касается звукопроводящей среды, то при использовании

этого диапазона частот наилучшей является жидкость или твердое тело.

Начнем с фотографических и химических методов. Они могут быть двух типов: обратимые и необратимые.

К обратимым относятся методы, создающие видимое изображение предмета, которое существует до тех пор, пока есть возбуждающее его звуковое изображение. Как только пропадет звуковое — пропадет и видимое. Если провести аналогию с фотографическим процессом, то обратимые способы соответствуют созданию изображения на матовой пластинке. Необратимые способы дают возможность получать постоянные, фиксированные изображения, подобно тому как работает фотографическая пластинка. Они напоминают получение изображения на фотографическом слое. Поэтому видимое изображение, вызванное наличием звукового изображения, продолжает существовать довольно долгое время даже после прекращения действия звука. После длительного облучения ультразвуком на фотографической пленке (пластинке) получается такое же почернение, как и после воздействия светового луча. Следовательно, в данном случае ультразвук ускоряет или вызывает химические реакции. Примером необратимого метода визуализации может служить непосредственное появление на фотоэмульсии под действием ультразвука скрытого изображения, которое проявляется известными в фотографии способами. Как правило, в подобных фотографических методах, т. е. при прямом воздействии ультразвука на пленку, с последующим проявлением необходимо темное помещение. Однако имеется другой фотографический метод, не нуждающийся в затемнении. Он заключается в облучении ультразвуком фотобумаги (пленки), находящейся в растворе проявителя. Равномерно засвеченная эмульсия проявляется наиболее быстро там, где интенсивность ультразвука, а следовательно, и действие проявителя максимальны.

И наконец, еще один пример необратимого метода, который можно отнести к химическим методам визуализации. Этот метод известен в литературе как йодо-крахмальные пластинки. Известно, что крахмал в присутствии йода окрашивается в синий цвет. Нанесем на стеклянную пластинку тонкий слой крахмала и затем погрузим ее в воду, куда добавлен спиртовой раствор йода; под влиянием йода она посинеет. Однако этот про-

цесс будет происходить медленно. А вот если к поверхности пластинки подвести звуковое изображение, то в местах, соответствующих звуковому изображению, начнется интенсивное посинение, и через некоторое время мы увидим синее изображение на светло-голубом фоне. Это объясняется свойством ультразвука ускорять химические реакции.

Описанные фотографический и химический методы требуют большой интенсивности ультразвука, лишь тогда будет создаваться видимое изображение.

Характеризует различные методы визуализации их пороговая чувствительность, т. е. та минимальная интенсивность ультразвука, которая в состоянии создать видимое изображение. Так, например, приведем для группы фотографических и химических методов примерное значение пороговой чувствительности (в $\text{вт}/\text{м}^2 \cdot 10^{-4}$):

- а) прямое воздействие на фотопленку (фотопластинку) — 1,5
- б) фотобумага в проявителе — 1,0
- в) крахмальная пластинка в йодистом растворе — 1,0

Как в описанных, так в других методах визуализации большую роль играет такой параметр, как быстродействие метода, т. е. скорость появления видимого изображения.

Многочисленные исследования показали, что колебания в ультразвуковом поле приводят к выделению тепла. Это и навело на мысль о возможности использования тепла для получения изображений. Так возник тепловой метод. Принцип его несложен. Если поместить в фокальной плоскости линзы слой хорошо поглощающего ультразвук материала, например прорезиненной ткани, то по площади звукового изображения ткань вследствие поглощения ультразвука нагреется. Звуковое изображение перейдет в тепловое. Его можно сделать видимым при помощи термочувствительной краски. Особенность такой краски — менять свой цвет под влиянием температуры. Значит, если покрыть краской прорезиненную ткань, то тепловое изображение станет видимым. Для визуализации звуковых изображений были также предложены оптические и механические методы. Они позволяют получать видимые изображения при прохождении света через образец в направлении, перпендикулярном направлению распространения ультразвука.

В результате получается теневое изображение объекта. Чтобы получить теневое изображение оптическим методом, нужно направить параллельный пучок света через кювету с водой. Вследствие периодического изменения коэффициента преломления воды пучок света будет дифрагировать на ультразвуке. Центральный, недифрагировавший луч задерживается непрозрачным экраном в точке пересечения лучей. Там же находится отверстие, которое может перемещаться перпендикулярно оптической оси, для пропускания дифрагировавшего света. Изображение просматривается на матовом стеклянном экране или регистрируется на фотопленке. Таков принцип визуализации ультразвука теневым методом.

Теневые методы широко используются для визуализации ультразвука в прозрачной среде. Пороговые значения интенсивностей ультразвука для получения теневых изображений не превосходят $3 \text{ Вт/м}^2 \cdot 10^{-4}$. Существует еще метод визуализации ультразвуковых полей, основанный на том, что некоторые прозрачные среды под действием механических напряжений временно становятся двулучепреломляющими. Поляризованный свет, проходящий через такую среду, частично деполяризуется в областях высокой интенсивности ультразвука. Фотографии, полученные таким способом в плавленом кварце, имеют хорошую контрастность и дают представление о различных деталях ультразвукового поля. Как для оптических и механических методов, так и фотографических, химических и тепловых малая чувствительность объясняется тем, что все они основаны на различных вторичных эффектах, создаваемых ультразвуком. Для сравнения напомним, что порог чувствительности человеческого глаза составляет около 10^{-14} Вт/см^2 , т. е. глаз в 10^{10} раз чувствительнее самого чувствительного (теневого) метода визуализации (10^{-3} Вт/см^2).

В результате многолетних исследований ученые пришли к электронным методам визуализации ультразвука. В их основу был положен эффект звукового поля — переменное звуковое давление. Сущность этого метода заключается в следующем. В фокальной плоскости звукового объектива, где находится звуковое изображение, помещается пьезоэлектрическая пластина. Она может быть сплошной и в виде мозаики, составленной из пьезоэлектрических приемников звука. Звуковое изображение воздействует на приемники, которые попадают в зону

изображения, и заставляет их колебаться. Интенсивность колебаний определяется интенсивностью соответствующей части изображения. Под действием этих колебаний на приемниках появится электрическое напряжение. Другими словами, рельеф звуковых давлений вызывает появление рельефа электрических напряжений. Значит, вместо звукового изображения мы получим электрическое.

Преобразование электрического изображения в видимое решается техникой современного телевидения. Такой метод визуализации называется электронно-акустическим преобразованием. Советский ученый С. Я. Соколов в 1936 г. создал первый акусто-оптический преобразователь ЭАП, по аналогии с телевидением названный ультразвуковой видикон, который он использовал в разработанном им же ультразвуковом микроскопе. Схема работы этого прибора показана на рис. 3. Предмет, например проволочный крючок, увеличенное изображение которого необходимо получить с помощью ультразвука, помещается в ванну с жидкостью. На него направляют пучок ультразвуковых лучей, идущий от пьезоэлектрической пластинки из титаната бария, соединенной с генератором ультразвука. Отраженные от предмета ультразвуковые лучи собираются акустической линзой на такой же пьезоэлектрической пластинке, которая применяется для передачи ультразвуковых колебаний. Благодаря явлению пьезоэффекта на приемной пластинке возникают электрические заряды, прямо пропорциональные интенсивности ультразвука в данной точке. Таким образом, образуется скрытое изображение предмета. Оно будет точной копией пространственного распределения звуко-

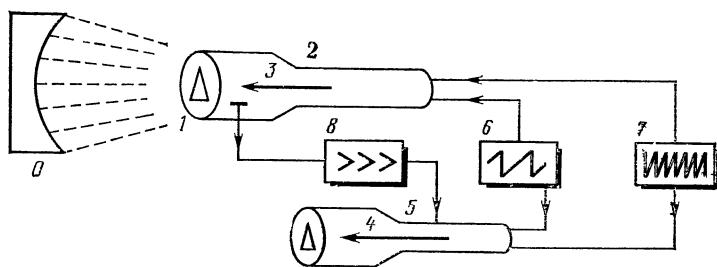


Рис. 3

вого поля в виде рельефа электрического потенциала. А чтобы преобразовать этот рельеф в оптическое изображение, его надо считать электронным лучом.

Приемная пластинка является дном электронно-акустического преобразователя, представляющего собой электронно-лучевую трубку. Развертывающее устройство заставляет электронный луч поочередно обегать все участки приемной пластинки, как бы ощупывать ее. При этом из пластинки вылетают так называемые вторичные электроны, число которых зависит от заряда в той или иной точке. Изменения, которые претерпевает ток вторичных электронов, в связи с различным значением пьезозарядов в разных точках приемной пластинки через усилитель подаются на сетку приемной электронно-лучевой трубки. В результате при условии синхронизации обеих трубок на экране возникает видимое изображение предмета, соответствующее распределению электрических зарядов на приемной пьезопластинке.

Однако чувствительность первых (электронно-акустических преобразователей), изготовленных Соколовым, была очень низка, порядка ватта на квадратный сантиметр. Поэтому практическое применение ЭАП Соколова было нецелесообразным, так как чувствительность его мала. В этом отношении лучшим был метод прямого конвертирования, к тому же он более простой. Их использовали только в лабораториях. Для практических же работ интенсивность ЭАП должна быть намного большей. Над проблемой увеличения пороговой чувствительности ЭАП, а также над усовершенствованием конструкции ЭАП велись работы в ряде стран. Однако большинство исследователей брало за основу конструкцию ЭАП, предложенную Соколовым. А в нем пьезоэлектрическая пластина, осуществляющая преобразование акустического рельефа в электрический, одновременно служит и передней стенкой электровакуумного прибора, внутри которого происходит считывание электрического рельефа электронным лучом.

Существенным недостатком такой схемы была необходимость герметизации самой пьезоэлектрической пластины и места ее соединения со стеклянным (или металлическим) корпусом преобразователя. Наиболее удобный и доступный материал для приемной пластины — пьезоэлектрическая керамика, но она пориста. Поэтому большинство конструкторов пытались заменить ее на

кварцевую. Но для этого нужен был большой размер пластин и малая их толщина. Кристаллы же кварца большого размера стоили очень дорого.

Большие трудности были связаны с необходимостью создания герметичного соединения пластины с корпусом. Ведь электронно-акустический преобразователь — это вакуумный прибор.

И вот для того чтобы обеспечить работоспособность ЭАП, большинство конструкторов вместо создания надежной герметичности старались поддерживать необходимое разрежение внутри прибора непосредственно во время работы преобразователя. Для этого ЭАП соединяли с высоковакуумным насосом, непрерывно откачивающим газ, проникавший в прибор. Это затрудняло практическое применение приборов.

Наконец был найден способ улучшения герметизации и повышения чувствительности ЭАП. В СССР это достигалось с помощью пластин из керамики титаната бария. В других странах, например в Англии, Чехословакии и США, были использованы кварцевые пластины, приклеенные к корпусу ЭАП эпоксидными смолами. Однако и в этих конструкциях ЭАП пришлось столкнуться с рядом трудностей, которые были связаны с выбором толщины пьезопластины, являющейся дном вакуумного сосуда.

Для того чтобы увеличить разрешающую способность ЭАП, необходимо уменьшать длину волны, а это, в свою очередь, требует уменьшения толщины пластины. Но уменьшение толщины пластины скажется на механической прочности на изгиб, так как пластина служит дном вакуумного сосуда и должна выдерживать разность давлений, равную одной атмосфере. Падение прочности следует компенсировать уменьшением диаметра пластины. Так, например, в английском ЭАП при $f = 4$ МГц диаметр кварцевой пластины пришлось ограничить до 25 мм.

Все описанные трудности ограничивали широкое внедрение ЭАП в практику и тормозили развитие систем звуковидения. Решающим шагом в устранении этих трудностей послужили работы советских ученых: Л. Д. Розенберга, Ю. Б. Семенникова и П. К. Ощелкова (автора этой книги). Им удалось в 1954—1955 гг. разработать новую схему построения ЭАП, в которой приемная пластина вынесена за пределы корпуса преобразователя

и находится в вакууме. Так как приемная пьезопластина находится в вакууме, а ультразвуковые волны не могут распространяться в вакууме, то, следовательно, при падении ультразвуковых волн на поверхность приемной пьезопластины кончается их существование в этой форме энергии. С другой стороны пьезопластины мы имеем уже не ультразвук, а электрическое поле.

Приемная пластина сделана из анизотропного материала. Особенностью этого материала является электрическая проводимость только в направлении по оси приборов. Во всех других направлениях этот материал будет изолятором. Число проводящих элементов такого материала может составлять от 1000 до 10 000 и более на 1 см². С внутренней стороны пьезопластины, т. е. со стороны вакуума, анизотропный материал покрывается тонкой пленкой — мишенью, обладающей вторично-электронной эмиссией. Поэтому при прохождении по поверхности пьезопластины электронного луча с нее будут вылетать вторичные электроны.

Благодаря явлению пьезоэффекта в отдельных точках приемной пьезопластины создаются электрические заряды, пропорциональные падающей на эти точки ультразвуковой энергии. Таким образом на приемной пьезопластине образуется своеобразный пульсирующий механический рельеф. Этот рельеф представляет собой скрытое «изображение» предмета в форме некоторого распределения зарядов на ее поверхности, соответствующее конфигурации объекта.

Распределение электрических потенциалов на поверхности приемной пьезопластины повторяет рельеф ультразвукового сигнала. Полученные электрические потенциалы передаются внутрь электронно-акустического преобразователя и оказываются распределенными на его мишени. Это распределение потенциалов на мишени в точности повторяет распределение потенциалов на приемной пластине, и образуется скрытое изображение исследуемого непрозрачного предмета.

Таким образом роль электронно-акустического преобразователя сводится к преобразованию в видимое изображение именно этого электрического поля. Превращение скрытого электрического изображения в видимое аналогично ЭАП Соколова решается телевизионными методами. Электронный луч сканирует поверхность мишени, создавая на поверхности растр с определенным

числом строк. Сигналы с ЭАП подаются на индикатор, где становятся оптически видимыми.

Особенностью разработанного ЭАП является его способность реагировать на созданный электрический рельеф вне зависимости от его происхождения. Это значит, что данный ЭАП универсален, его можно использовать в комплекте с любым другим источником электрического рельефа (например, инфракрасным, рентгеновским и т. п.). Поэтому он получил название «Уникон», т. е. универсальный конвертер. По сравнению с ЭАП Соколова чувствительность «Уникона» возросла почти в миллиард раз. Ведь пороговая чувствительность ЭАП (в усовершенствованном варианте) составляет 10^{-9} Вт/см².

Отметим, что метод электронно-акустического преобразования по своей чувствительности приближается к характеристикам глаза и уха человека в реальных условиях. Ведь пороговая чувствительность, например, уха (конечно, оно не создает никаких изображений, а только регистрирует наличие звука) составляет 10^{-16} Вт/см².

Можно сказать, что разработка «Уникона» как универсального ЭАП позволяет звуковидению занять место эффективного средства в арсенале неразрушающих методов контроля материалов.

Первые отечественные звуковизоры были созданы в Институте акустики АН СССР на базе промышленных ЭАП типа «Уникон-55» (цифры указывают год разработки прибора). Модель звуковизора работала на частоте 4 МГц (соответствует длине волны около 0,37 мм в воде) при диаметре рабочей части 65 мм. (Для сравнения напомним, что английский ЭАП при той же частоте имеет примерно в 6 раз меньшую поверхность преобразователя.) Объектив звуковизора состоял из двух плексигласовых линз. Оптическая схема его приспособлена для работы «на просвет». Имеется в виду, что излучатель и приемное устройство звуковизора находились по разные стороны от изучаемого объекта. В целом ряде случаев удобнее бывает работать в отраженных лучах.

Облучение производилось кварцевым мозаичным излучателем диаметром 18 см на его поверхности при интенсивности звука около 0,01 Вт/см². На этой модели проводились различные эксперименты с целью решения определенных практических задач, связанных с установлением преимуществ и недостатков метода видения в

ультразвуковых лучах по сравнению, например, с рентгеновскими исследованиями.

При рентгеновской дефектоскопии плотность изображения (кстати, не следует забывать, что в рентгеновских лучах получаются лишь теневые, силуэтные изображения — у этих лучей высокая проникающая способность, и мы пока не умеем заставлять их преломляться или отражаться) определяется толщиной металла, которую пробил луч. Поэтому, например, заметить таким способом в листе толщиной 5 мм расслоение, размеры которого определяются несколькими микронами, практически невозможно. А ультразвуковой луч, отражающийся от границы раздела металл—газ, очень четко «рисует» такие расслоения.

Плотность живых тканей мало отличается от плотности большинства пластмасс. Поэтому рентгеновские лучи не могут, например, обнаружить инородное тело из пластмассы, находящееся внутри мышечной ткани, а ультразвук легко справляется с такой проблемой. Например, почечный камешек размером 2 мм для рентгеновских лучей практически неразличим, ультразвук же выявляет его отчетливо.

Дальнейшее развитие звуковизоров показало, что более эффективна работа звуковизора на отраженных лучах. В этом его оптическая схема должна быть изменена. Звуковизор на отраженном свете был создан рядом организаций в СССР, в частности в НИИИ (Научно-исследовательский институт интроскопии) и за рубежом. Позже работы со звуковизорами, работающими «на просвет» и на отраженных лучах, наглядно продемонстрировали широкие возможности видения в ультразвуковых лучах.

В таких странах, как США, Англия, Франция, ФРГ, сделаны попытки сконструировать приборы ЭАП, аналогичные «Уникону». Разработка ЭАП за рубежом велась по двум направлениям: промышленному и военному. Разница между ними была только в требованиях эксплуатации. Первыми приступили к разработке ЭАП в США, где, судя по литературным материалам, сведения об ЭАП С. Я. Соколова были получены только в 1949 г. И вот в период с 1949 по 1954 г., базируясь на схеме советского ультразвукового микроскопа, они создали около 15 вариантов высоковакуумных герметизированных ЭАП. Все ЭАП обладали чувствительностью до 10^{-9} Вт/см².

Надо отметить, что большинство ЭАП, применяемых в Советском Союзе и в Англии, работало при более высоких частотах, а именно от 2 до 10 МГц. С ростом частоты четкость изображения улучшается, так как при этом толщина экрана должна быть меньше, а длина волны короче. Значительные исследования проводились при выборе активных материалов для ультразвуковых излучателей и приемников. Наиболее подходящими оказались кварц, сульфат лития, а также керамические материалы (титанат бария, титанат-цирконат свинца и др.).

Наиболее эффективны ЭАП, использующие считывание при помощи электронного луча. При этом получается сигнал типа телевизионного. В таких трубках применяются мишени, на которые проецируются ультразвуковые изображения. В качестве материала мишени может применяться кварц или титан бария. В зависимости от назначения диаметр мишени бывает в пределах от 100 до 500 мм.

Рассмотрим общий принцип (для всех ЭАП) записи ультразвукового изображения. Ультразвуковое изображение объекта обычно проецируется акустическими линзами или же вогнутым сферическим зеркалом, как показано на рис. 4. Объект должен испускать или рассеивать ультразвуковые колебания. (Если же он сам по

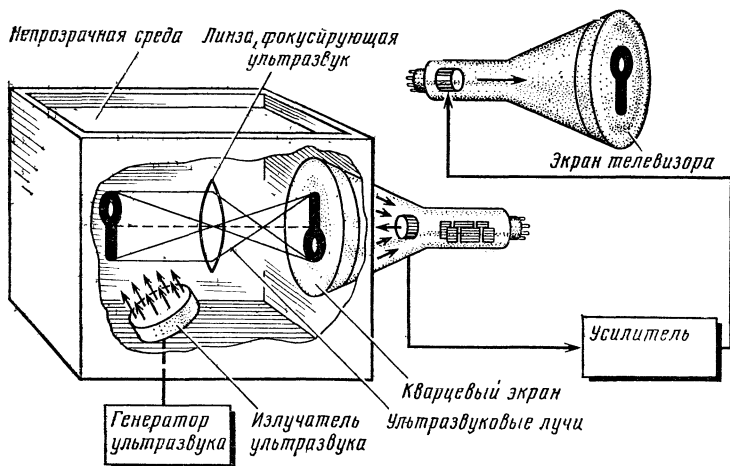


Рис. 4

себе не работает источником излучения, то его необходимо облучить специальным ультразвуковым источником, который является аналогом студийному осветителю.)

Предпочтительнее применять зеркало, так как при этом исключаются взаимные отражения и неоднородные ослабления в линзах. Преобразующая электронно-лучевая трубка, называемая электронно-акустическим преобразователем, должна быть установлена в фокальной плоскости зеркала, чтобы изображение проецировалось на ее экран. Входной сигнал ЭАП обеспечивает возможность получения на экране мониторной трубки видимого изображения объекта телевизионным способом.

В такой системе при использовании зеркала определенного размера разрешающая способность увеличивается с повышением частоты ультразвукового сигнала. Однако акустическое ослабление сигнала в воде также увеличивается с ростом частоты, что существенно сужает область четкого различия объектов. Поэтому и приходится выбирать оптимальный диапазон частот сигнала.

Применение звуковидения

Подводное звуковидение. Как мы уже знаем, работам по подводному звуковидению предшествовали методы эхолокации. Они возникли в начале нашего века как мера борьбы с айсбергами, попадающими на пути следования океанских кораблей. Идея создания гидролокаторов появилась через некоторое время после гибели в 1912 г. крупнейшего океанского пассажирского судна «Титаник», столкнувшегося с большим айсбергом. Судно затонуло вместе с пассажирами и грузом.

Среди специальных технических средств, которые, как предполагали, могли предотвратить возможность подобных столкновений в будущем, был и гидролокатор. Это гидроакустическое устройство, использующее довольно сложную радиоэлектронную аппаратуру.

Зная промежуток времени между моментами излучения импульса и прихода эхо-сигнала, а также скорость распространения звука в воде, нетрудно определить расстояние до цели. Одновременно с регистрацией эхо-сиг-

нала определяется и направление его прихода — пеленг на цель. Впервые гидролокаторы были применены французами для обнаружения немецких подводных лодок еще в первую мировую войну.

Изобретен гидролокатор нашим соотечественником — русским инженером К. В. Шиловским и крупным французским ученым, физиком Полем Ланжевенем. Они получили совместный патент на «Описание аппарата и способов его применения для подачи направленных подводных сигналов и для локализации подводных препятствий».

Современные гидролокаторы позволяют вести наблюдение сразу во всем окружающем пространстве (круговой обзор) или только в определенном направлении. Благодаря гидролокаторам стала надежнее и безопаснее морская навигация. Широкое применение нашли гидролокаторы в рыбном хозяйстве для обнаружения рыбных косяков и их протяженности.

В качестве примера можно указать, что французский гидролокатор горизонтального действия фирмы CSF позволяет обнаруживать на расстоянии свыше 1 км рельеф дна моря и косяки рыбы на глубинах до 500 м. Но, оказывается, обнаружить рыбный косяк это еще не все. Надо определить вид рыбы. Теоретически это решается легко: нужно только знать коэффициент отражения. Но практически эта задача трудновыполнимая. Оказывается, коэффициент отражения у большинства употребляемых нами в пищу рыб одинаков... Все это привело к значительному усложнению гидролокационной аппаратуры. Понадобилось получить четкие градации уровней интенсивностей объектов и фона, на котором они вырисовываются. Только тогда стало возможным получать высокое распознавание.

Однако названные гидролокаторы, несмотря на их большие возможности, не позволяли непосредственно видеть объект.

Интенсивные работы по разработке систем звуковидения, в частности для подводного видения, привели к ряду оригинальных конструкций звуковизоров. В зависимости от их назначения звуковизоры для подводного видения бывают **линзовые** и **голографические**. Эти звуковизоры независимо от их типа позволяют получать двухмерные изображения в прямоугольных координатах.

Исторически первые — линзовые устройства, кото-

рые и сейчас широко применяются в различных системах звуковидения. Дальнейшее развитие линзовых систем звуковидения привело к созданию оригинального портативного прибора непосредственного видения для водолазов. Этот прибор предназначен для видения в мутных средах (океанах и морях). Принцип его работы таков. Ультразвуковые колебания, создаваемые гидролокатором, облучают исследуемый объект на расстоянии 1—1,2 м от водолаза. Попадая на жидкостную ультразвуковую линзу, они фокусируются на вращающуюся матрицу преобразователей. Матрица состоит из 32 элементов. В результате сформированное в масштабе реального времени изображение содержит 1000 элементов разрешения. Принятые сигналы поступают в ЭАП, состоящий из 32 светодиодов, расположенных в том же порядке, что и приемные элементы. Визуальное изображение, сформированное светодиодами, подводится с помощью световолоконного жгута к маске водолаза. Водолаз видит ультразвуковое изображение через систему призм, такая система позволяет ему видеть в мутной воде.

Водолазное устройство подтвердило возможность видения в воде с помощью ультразвуковых колебаний. Дальнейшим развитием принципа подобного устройства стала подводная камера фирмы Westinghouse. В ней увеличено количество электроакустических преобразователей до 128. Изображение формируется акустической линзой и отображается на дисплее. Оптическое изображение видно в плоскости наблюдения. По своим габаритам камера значительно превышает водолазное устройство.

Существует еще несколько вариантов линзовых устройств. Общий их недостаток — искажения вследствие аберрации, которые в звуковых акустических линзах особенно велики.

Голографические устройства. Желание избавиться от влияния аберрации и привело исследователей к голографии, где, как известно, формирование изображений осуществляется без линз. Была сделана попытка использовать метод ультразвуковой (акустической) голографии для подводного видения.

Не следует забывать, что большинство систем, позволяющих получать звуковое изображение, в том числе и ультразвуковая интроскопия, имеют очень серьезный не-

достаток — двухмерность изображения. Она объясняется тем, что фиксируется только интенсивность (квадрат амплитуды) звуковых волн в звуковом изображении. С помощью существующих методов оказывается невозможным регистрировать фазовую информацию. Другими словами, эти методы позволяют получать только амплитудную информацию об объекте, а вот фазовую не регистрируют. В этом и заключается основная причина получения двухмерного (плоского) изображения — вместо объемного.

Голография же сохраняет как информацию об интенсивности, так и фазовую информацию. В этом ее главное преимущество! А ведь акустическая голография основывается на том же принципе, что и оптическая. Значит, все преимущества оптической голографии могут быть отнесены и к акустической голографии. Что же такое акустическая голография? Акустической голографией называют методы получения объемных (трехмерных) изображений, основанные на явлении интерференции ультразвука. В отличие от оптической голографии она имеет свои особенности.

Например, для того чтобы получить акустическую голограмму предмета, его надо «осветить» вместо лазера источником звуковых колебаний. Однако для получения интерференционной картины взаимодействия предметного и опорного лучей надо обязательно иметь когерентный источник колебаний.

В акустике проблемы когерентного источника звуковых колебаний не существовало. Напомним, что практически все акустические источники, используемые для получения звуковых изображений, когерентные. Располагая таким источником «освещения», можно получить акустическую голограмму.

Звуковые волны, «освещающие» предмет, будут отражаться от него и, попадая на фотопластинку, будут интерферировать с опорным лучом. В результате получится интерференционная картина, аналогичная картине, получаемой с помощью световых волн, т. е. акустическая голограмма.

А теперь несколько слов о технике ее восстановления. Чтобы восстановить акустическую голограмму, ее переносят на оптический транспарант, предварительно подвергнув записанную акустическую голограмму масштабному преобразованию, а затем освещают транспа-

рант когерентным пучком света. Восстановленное изображение наблюдают так же, как и в оптической голографии.

Акустическую голограмму можно также преобразовать в изображение при помощи методов цифровой голографии. Восстановленное изображение содержит в себе информацию не только об амплитуде акустического волнового фронта, но также и о фазе.

На акустической голограмме регистрируют амплитудно-фазовую информацию о структуре волнового фронта в плоскости, расположенной на пути пучка, который в исследуемом объекте претерпевает отражение, преломление или дифракцию.

Однако, несмотря на полную аналогию принципов акустической и оптической голографии, в практике изготовления акустических голограмм исследователи столкнулись с рядом особенностей, присущих звуковым колебаниям, которые сказались как на регистрации звуковых волн, так и на методах восстановления изображений.

Начнем с регистрации. В отличие от оптической голографии в акустической имеется несколько способов регистрации амплитудно-фазовой структуры акустического волнового фронта.

Так как скорость распространения звуковых волн сравнительно низка, то регистрация информации о предмете может осуществляться двумя видами детекторов (приемников), а именно квадратичными и линейными. Первые чувствительны к интенсивности колебаний и дают усредненное по времени значение, пропорциональное квадрату амплитуды волны. К ним относятся фотоматериалы, смоченные проявителем, жидкие кристаллы, термочувствительные носители и т. д. При квадратичном детекторе, так же как и в оптической голографии, регистрируют квадрат абсолютного значения суммы предметного и акустического поля и опорного пучка ультразвука. Опорный пучок можно заменить электрическим опорным сигналом, который выбирают таким, чтобы он был эквивалентен реальному опорному пучку. Вторые, реагирующие на амплитуду колебаний, дают мгновенное значение амплитуды. К ним относятся микрофоны или гидрофоны. Они регистрируют произведения принятого и опорного сигналов либо используют пространственную поднесущую.

Наличие двух типов детекторов приводит к существованию двух основных способов регистрации акустических голограмм.

Первыми появились голограммы на пространственных носителях, чувствительных к интенсивности. Это квадратичные детекторы (приемники). В этом случае акустическая голография с опорным пучком полностью аналогична соответственному оптическому методу голографии. Звуковая волна, прошедшая через объект или отраженная им, вместе с опорной волной падает на регистрирующую среду, на которой и записывается голограмма. Но к квадратичным детекторам (приемникам) относится также среда «жидкость—газ». Ведь звуковые волны распространяются и в воде, и в воздухе. Установлено, что по ряду причин формировать акустическую голограмму в воде легче, чем в воздухе. Экспериментально установлено, что наилучшие результаты получены при регистрации голограмм на поверхности раздела между жидкостью и газом. В этом случае на поверхности жидкости под действием звуковых волн формируется рельеф, представляющий собой голограмму, которая при освещении ее светом восстанавливает изображение. О практическом применении этого будет сказано ниже.

Итак, квадратичный приемник звука осуществляет одновременно прием колебаний и их детектирование (усреднение по времени с выделением низкочастотной составляющей сигнала). А теперь перейдем к линейным детекторам (микрофонам и гидрофонам).

Специфика ультразвука начинает проявляться тогда, когда опорный пучок используется в сочетании с линейным приемником (детектором). В отличие от квадратичного приемника линейный приемник звука осуществляет лишь прием.

Использование линейных детекторов (приемников) предполагает получение информации об акустическом поле в плоскости голограммы другим способом. Так как линейные детекторы реагируют на амплитуду колебаний, то 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. Это можно осуществить в два этапа. На первом этапе звуковая волна преобразуется в электрический сигнал. На втором — после усиления сигнала создают

имитацию воздействия с опорной волной. Затем сигнал воспроизводится особым устройством, называемым пространственно-временным модулятором света — ПВМС, с которого и восстанавливается изображение.

Таким образом, выбор того или иного типа приемника в акустической голографии определяет и возможную последовательность операций при голографировании. В одном случае (квадратичный приемник) требуется сначала сложить опорную и предметную волны, а затем зарегистрировать результат их интерференции.

В случае же линейного приемника звука порядок операций может быть либо таким же, либо иным. Можно сначала зарегистрировать предметную волну и уже после этого сложить ее с опорной. Благодаря этому, как уже показано выше, реальный опорный звуковой пучок можно заменить соответствующим образом преобразованным сигналом в электронных полях после приема предметной волны.

В акустической голографии чаще используются линейные детекторы (приемники), так как они обладают большей чувствительностью, чем квадратичные детекторы, и, кроме того, позволяют применять различные алгоритмы обработки электрических сигналов.

Существует несколько, если можно так назвать, классических схем получения акустической голограммы. Рассмотрим вкратце две из них как наиболее распространенные.

Метод квадратичного детектирования. Объект, подлежащий голографированию, облучается излучателем ультразвука. Отраженные от объекта ультразвуковые колебания попадают на приемную пластинку. На эту же пластинку падают лучи от излучателя опорного пучка. Оба луча интерферируют между собой. Так образуется акустическая голограмма. Чтобы ее зарегистрировать, миниатюрный пьезоэлемент последовательно сканирует оптический носитель, а электрический сигнал, возбуждаемый волновым полем, модулирует яркость пучка на экране электронно-лучевой трубки при его синхронном перемещении по экрану одновременно с перемещением пьезоэлемента. Накопленное на экране изображение фотографируется либо переносится на другой носитель. Поскольку в схеме используется наклонная плоская опорная волна, падающая на оптический носитель, то математически это может быть представлено как квадрат

абсолютного значения суммарного волнового поля в приемной плоскости. Отсюда вытекает и название метода. При оптическом восстановлении акустической голограммы оптический транспарант просвечивают опорной волной той же длины, которая была использована для получения акустической голограммы. Аналогично оптической голограмме наблюдатель увидит мнимое изображение объекта в ультразвуковом поле.

Недостаток схемы — искажения, получаемые при оптическом воспроизведении. Они обусловлены значительной разницей между записывающими и воспроизводящими длинами волн. Когда длина волны восстанавливающего луча короче, чем записывающего, то простая геометрическая фигура растягивается в одном направлении и вместо квадрата наблюдатель увидит прямоугольник... Более того, из-за линейных искажений исчезает эффект объемности.

Правда, с помощью пространственных фильтров можно несколько уменьшить искажения, но это не всегда оказывается эффективным. Чтобы восстановить неискаженное звуковое изображение, размер акустической голограммы должен быть уменьшен в n раз, где n — отношение длины звуковой и световой волн. Но так как величина n имеет порядок 10^4 — 10^6 , то восстановленное изображение может получиться очень маленьким. Но можно воспользоваться оптическим увеличением. Однако при этом вновь возникнут продольные искажения. Другой причиной потери эффекта объемности является то, что длины волн, используемые для записи акустических голограмм, во много раз больше апертуры глаза. А если это так, то обеспечиваемое ими разрешение совершенно неприемлемо для невооруженного глаза.

Таким образом получается так, что мы не можем использовать эффект параллакса при непосредственном наблюдении восстановленного изображения от акустической голограммы. А ведь в обычной голограмме у наблюдателя возникает трехмерное восприятие объекта именно благодаря эффекту параллакса.

Учитывая вышеупомянутые недостатки схемы, был предложен еще один метод — **метод поверхностного рельефа**, или, как его еще называют, метод ряби на поверхности жидкости.

Исторически сложилось так, что этот метод оказался в числе «прочно забытых». А ведь он был предло-

жен советским ученым С. Я. Соколовым еще в 30-е годы. С его помощью можно было получить теневые изображения объекта, в частности его контуры. Метод был предназначен для обнаружения трещин в металле при помощи ультразвука. С этой целью наружную плоскость металла покрывали слоем масла и образующийся рельеф на поверхности масла освещали светом от ртутной лампы. Ультразвук, прошедший через трещину в металле, формировал на поверхности масла стационарную рябь, т. е. звуковое изображение того или иного участка исследуемого объекта. С. Я. Соколов показал, что под воздействием ультразвуковых колебаний поверхность жидкости деформируется в соответствии с распределением в ней интенсивности ультразвукового поля и что эта деформация может быть визуализирована с помощью световых волн (отражение света от этой поверхности). Подобная регистрация изображения, названная методом поверхностного рельефа, позволяла получать теневые изображения объекта, в частности его контуры. Фактически это была акустическая голограмма без опорного пучка.

Метод поверхностного рельефа представляет собой модернизированный метод Соколова. Он применяется в современных схемах акустической голографии.

В настоящее время в системах с получением восстановленного изображения в реальном времени акустическую голограмму формируют на свободной поверхности жидкости с образованием стационарной ряби.

Если высокочастотный источник звука, например пьезоэлектрический преобразователь с частотой колебаний в несколько мегагерц, поместить в бак с водой и направить излучение на поверхность, то вода будет вспучиваться в местах, где звук достигает поверхности. В этом случае преобразователь будет излучать звуковые волны. Используем этот принцип. Для этого возьмем два таких пьезоэлектрических преобразователя. Звуковое излучение от одного из них направим на голографируемый предмет, а от другого — на поверхность воды. Тогда предметная и опорная волны при взаимодействии создают на поверхности воды интерференционную картину, которая имеет вид устойчивой ряби. Картина ряби на поверхности воды и будет голограммой предмета. Такое изображение может быть восстановлено двумя способами. В первом — методе «реального време-

ни» — просто освещают поверхность лазером. Рябь выполняет роль оптической фазовой отражательной голограммы по отношению к падающему на нее лазерному лучу.

Правильное изображение предмета (мнимое изображение) оказывается ниже поверхности воды, а сопряженное изображение представляется действительным изображением над поверхностью. Поскольку длины звуковых и световых волн существенно различны, то восстановленное изображение предмета оказывается расположенным значительно дальше от поверхности, чем сам предмет. Это можно объяснить линейным искажением, вызванным неравенством длин волн звука и света. Поэтому при восстановлении изображения его нужно рассматривать в телескоп. Правда, можно обойтись и без телескопа, поместив акустическую линзу между объектом и поверхностью таким образом, чтобы трехмерное изображение проецировалось на эту поверхность. В таком случае опорная волна распространяется, как и прежде, но голограмма теперь сфокусирована так, что при восстановлении изображение оказывается на поверхности.

Однако при использовании водной поверхности возникают две основные проблемы. Первая состоит в том, что поверхность воды очень чувствительна к нежелательным колебаниям и сильным движениям, разрушающим рябь. Вторая в том, что интенсивности предметного и опорного лучей должны быть разумно сбалансированы на поверхности. В противном случае на поверхности образуются течения, также разрушающие рябь голограммы. В этом случае используемая площадь водной поверхности резко ограничивается, а это, в свою очередь, ограничивает апертуру и как результат этого ухудшается качество конечного восстановленного изображения предмета.

Для борьбы с этим явлением был разработан способ покрытия водной поверхности тонкой мембраной. Над мембраной создавалась нефтяная пленка толщиной несколько миллиметров. И тогда рябь образовывалась на поверхности этой пленки, а не на поверхности воды.

Практика показала, что метод нефтяной пленки становится более эффективным при применении вместе с новыми типами акустических линз и импульсных источников звука. По методу поверхностного рельефа в

США был снят голографический кинофильм, дающий изображение золотой рыбки. Для получения звукового изображения использовался звук с частотой 9 МГц. 16-миллиметровая кинокамера фотографировала восстановленное из голограмм изображение по мере появления их на телевизионном экране. На изображении был ясно виден скелет рыбки и ее плотные внутренние органы. Хорошо было видно движение внутренних органов рыбки, открытие и закрытие рта, движение ее спинных плавников.

Такая система акустической голографии, работающая в масштабе реального времени, позволяет наблюдателю следить за движением объекта и опознавать его и имеет поэтому большие достоинства. Интерпретация объекта может оказаться затруднительной, если наблюдатель рассматривает неподвижный объект.

Учитывая все изложенное об акустических голограммах, можно сделать вывод о возникновении значительных трудностей при получении объемных акустических изображений. Однако эти трудности не могут быть основанием для отказа от «услуг» акустической голографии. И хотя она не является универсальным методом, но в ряде случаев, когда обычные методы не дают требуемых результатов, акустическая голография оказывается единственным техническим средством, позволяющим решить поставленную задачу. Поэтому вот уже много лет во всем мире ведутся научно-исследовательские работы по преодолению трудностей, связанных с созданием высококачественных изображений акустических полей.

В процессе работы исследователи столкнулись с зависимостью качества изображений от размера апертуры, длины волны зондируемого сигнала и наличия многократных внутренних отражений при исследовании сложных объектов.

Проанализируем каждый из упомянутых факторов, влияющих на качество звукового изображения.

Прежде всего размер апертуры. Да, он значительно влияет на качество звукового изображения. Так, например, если сделать апертуру малой, то она не позволит получить хорошее разрешение. Более того, при малой апертуре изображение получается зернистым. А если увеличить размер апертуры, то разрешение повышается. Оптимальным размером апертуры будет такой, который

должен быть не менее ста длин волн зондирующей волны. При больших же длинах волн поверхность объекта представляется зеркально отражающей, что затрудняет интерпретацию конфигурации звуковых изображений.

Многочисленные внутренние отражения обычно возникают при исследовании сложных объектов, и они также затрудняют анализ полученного звукового изображения.

И все же, несмотря на описанные трудности, возникающие при воспроизведении звуковых изображений, акустическая голография обладает существенным преимуществом по сравнению с другими методами исследования веществ и предметов. Оно заключается в способности акустической энергии распространяться в твердых и жидких средах на большие расстояния без существенного затухания. Поэтому акустическая голография получила применение в ряде областей техники и медицины.

Так, в геологии и геофизике стало возможным исследовать физические свойства и даже состав веществ, недоступных для непосредственного наблюдения и находящихся на больших глубинах, свыше 10 км ниже поверхности Земли. Это позволяет видеть подземные структуры. Уже созданы системы акустической голографии, пригодные для исследования физики моря, морского дна и для гидролокации.

Широкое применение акустической голографии намечается в неразрушающем контроле, дефектоскопии и интроскопии. И к этому имеется много оснований. Возможности получения объемного изображения средствами акустической голографии сразу же привлекли внимание исследователей.

Очень перспективно применение акустической голографии в медицине и биологии. С ее помощью можно получать изображение костных и мягких тканей, регистрировать патологические изменения внутренних органов человеческого тела. С помощью акустической голографии можно также наблюдать функционирование внутренних органов неанатомизированных живых объектов. Она может стать весьма ценным диагностическим методом в медицине.

Это далеко не полный список тех возможностей, которые предоставляет науке, технике и медицине акустическая голография. Если сравнить описанный выше линзовый метод в системах подводного видения с методом

акустической голографии, то будет очевиден целый ряд преимуществ.

Масштаб объекта в направлениях, параллельных плоскости голограммы, не искажается. Поэтому вопрос использования акустической голографии для подводного видения находится еще в стадии изучения. Однако ряд зарубежных фирм: ОКІ (Токио) и американская фирма Westinghouse уже создали несколько приемопередающих камер для звуковидения, которые показали неплохие результаты.

В дальнейшем были созданы новые голографические системы, в которых вместо смешивания предметной и опорной акустических волн и последующего детектирования их суммы опорную волну можно имитировать электронным способом.

Это стало возможным потому, что при электронном детектировании выходным сигналом детектора (микрофона) является электрический сигнал той же частоты и формы, что и акустический. В этом случае детектируют только одну акустическую волну, а выходной электрический сигнал детектора складывается с опорным электрическим сигналом. Опорный сигнал берется непосредственно от электронного генератора сигналов, питающего «освещающий» источник звука. Электронное суммирование в данном случае соответствует интерференции рассеянной и опорной волн.

В современных схемах звуковидения почти всегда используется электронная имитация опорной волны.

Звуковидение в сейсмологии. Одним из важных разделов геофизики является сейсмология. Она занимается изучением недр Земли с использованием естественных источников колебаний (землетрясений). Кстати, известный русский ученый Б. Б. Голицын, изучая причины землетрясения, сделал вывод о том, что можно сделать ряд важных заключений о внутреннем строении нашей планеты, наблюдая распространение упругих волн в Земле. Он является основателем сейсмологии. По образному выражению Б. Б. Голицына, всякое землетрясение можно уподобить «фонарю, который зажигается на короткое время и освещает нам внутренность Земли, позволяя тем самым рассматривать то, что там происходит».

Сейсмологию интересуют больше глубины Земли и соответственно «крупные детали» ее строения. И для успешного решения этой задачи нужна высокая раз-

решающая способность. Такую возможность может предоставить акустическая голография. Но ведь звуковые волны уже давно использовались для исследования строения Земли. Исследования строения Земли — это одно из самых первых практических применений звуковых волн для изучения внутренней структуры оптически непрозрачных объектов, какими являются земные недра. Однако распространяясь в Земле, они отражаются и преломляются не только объектом, но и случайными неоднородностями среды. Следовательно, энергия отраженного звукового сигнала складывается из энергии сигналов, отраженных от объекта и рассеянных в среде распространения. Это очень усложнило получение данных о геологическом строении того или иного участка Земли.

Задачи геофизики при поиске полезных ископаемых сводятся не только к разведке полезных ископаемых, но и к проблеме видения месторождений. А ведь увидеть сами месторождения диктуется необходимостью уменьшить вероятность бесполезных бурений, которые стоят очень дорого. С этой целью было предложено выявлять месторождения по присущей им характерной форме.

Оказывается, конфигурацию слоев полезных ископаемых можно получить по скорости звука (а в геофизике чаще всего ее называют «скоростью сейсмических волн») и значению плотности тех или иных горных пород. Зная значения скорости волны и плотности слоев, можно построить геометрическую модель месторождения того или иного полезного ископаемого.

Характерно, что скорость распространения сейсмических волн резко изменяется для различных глубин: чем больше глубина, тем меньше скорость. Так, например, значение скорости звука на глубинах порядка сотен метров обычно равно нескольким сотням метров в секунду, на глубинах 10—20 км повышается до 6—7 км/с. Плотность в этом интервале глубин изменяется от 1,5 до 3 г/см².

Во многих случаях известны характерные формы месторождений. Так, например, рудные и алмазоносные породы часто имеют форму трубок, а нефтяные месторождения — форму тонких линз и клиньев. Однако прямой поиск полезных ископаемых по геометрическим формам месторождений может привести к ошибкам.

Большую роль в этом играют акустические свойства окружающих пород. Возьмем для примера нефтяные

месторождения. Их акустические свойства мало отличаются от акустических свойств окружающих пород. Кроме того, их толщина очень мала по сравнению с длиной звуковой волны. А это создает значительную «акустическую прозрачность» самих месторождений, и в этом случае реализация видения становится затруднительной.

Учитывая трудности, возникающие в процессе географических исследований, ученые обратились к акустической голографии.

Возможности голографических методов позволили ученым облегчить расшифровку картины отраженных сейсмических волн. Так возникло новое направление акустической голографии, получившее название «сейсмической голографии». Главное ее применение сводится к решению задач построения изображения объектов в сложных случаях, когда обычные технические методы бессильны.

В чем заключается суть метода сейсмической голографии?

Допустим, мы исследуем залежи нефти. С помощью источников звука на поверхности Земли создаются звуковые волны заданной частоты. Восприятие звуковой волны осуществляется геофонами, выполняющими функцию сейсмоприемников. Как источники звука, так и геофоны устанавливаются на профилях, число которых может достигать нескольких сотен.

Электрические сигналы, поступающие с выходов сейсмоприемников, регистрирующих распределение отраженных волн, суммируются с электрическим сигналом той же частоты. Восстановление звуковых изображений производится на ЭВМ или же оптическими средствами. Поскольку каждому источнику звука соответствует свой геофон, то учет траекторий звуковых пучков производится с поправкой на рефракционные искажения лучей. Путь этих лучей идет от источника звука через выветренный слой до первого низлежащего слоя и обратно к геофонам.

В настоящее время ученые разрабатывают более простые, приемлемые для практики методы использования акустической голографии для геофизики и геологии.

Звуковидение для неразрушающего контроля материалов. В арсенале неразрушающего контроля материа-

лов имеется довольно много методов, основанных на применении магнитных полей, вихревых токов, рентгеновских, инфракрасных и гамма-лучей, а также ультразвуковых лучей. Каждый из этих методов не универсален и используется лишь в определенных случаях. Характерно то, что они не исключают друг друга, а, наоборот, взаимно дополняют.

Среди них особое место занимают методы, использующие ультразвук в качестве проникающего излучения. Ведь уже говорилось выше о том, что ультразвук способен проходить через металлы, пластмассы, большинство строительных материалов, живые ткани и оптически непрозрачные жидкости. Ультразвуковые волны реагируют на любые изменения в структуре твердого тела. Он отражается от границ разделов твердое тело—газ и жидкость—газ. Благодаря этому и удается легко обнаруживать трещины, раковины и пустоты в твердых телах, а также твердые тела и газовые пузыри в жидкости.

Именно на этом и основана ультразвуковая дефектоскопия. Однако на экране дефектоскопа видно не само изображение дефекта, а только кривые, характеризующие нарушение сплошности исследуемого материала. Конечно, расшифровка этих кривых требует от операторов значительного навыка, позволяющего получать по ним полезную информацию. Наблюдающий за ними оператор старается не только расшифровать появляющиеся кривые, но и мысленно представить форму и размеры дефекта, но недостаток объективной информации не позволяет оператору расшифровать характер обнаруженного дефекта. В ряде случаев он просто ошибается.

С точки зрения современного звуковидения информация, создаваемая на экране ультразвукового дефектоскопа, называется А-изображением, потому что вместо звукового изображения, которое должно быть более или менее точной копией объекта, дефектоскоп дает информацию только о наличии дефекта, расстоянии до него и свойствах акустического импеданса испытуемого объекта вдоль заданного направления распространения звуковой волны. Подобный вид дефектоскопической информации, называемый амплитудно-временной, не удовлетворяет жестким требованиям контроля продукции. Сейчас уже недостаточно иметь сведения только о наличии дефекта и расстоянии до него. Необходимо также

знать размеры, форму и особенно его местоположение и тип.

Конечно, лучше всего было разработать такой метод, который позволил бы «заглянуть» внутрь оптически непрозрачных образцов и оценить влияние их внутренней структуры на те или иные свойства образца в целом. А для этого необходимо было получить возможность прямого и непосредственного наблюдения внутренней структуры объекта. И вот для этих целей наиболее перспективными методами неразрушающего контроля оказались ультразвуковые.

Первые эксперименты по звуковидению при помощи ультразвуковых дефектоскопов не дали хороших результатов. Так как ультразвуковые частоты, обычно используемые для неразрушающего контроля, позволяют получать изображения с очень низким разрешением. Поэтому если бы и удалось увидеть дефект, то изображение оказывалось некачественным, а затраты на оборудование для его получения не соответствовали выигрышу в приобретенной информации. Именно такая информация находилась бы на уровне А-изображений.

В Советском Союзе еще в 60-е годы был разработан ультразвуковой интроскоп УЗИ-1, который позволял получить телевизионное изображение дефектов в оптически непрозрачных телах. Задача интроскопа подобного типа — визуализация дефектов и неоднородностей испытываемых образцов при контроле теневым методом (на просвет). В дальнейшем ультразвуковые интроскопы были модернизированы конструктивно, а их схема осталась аналогичной первому типу этих приборов (рис. 5).

Работа интроскопа основана на методе непосредственного контакта или на иммерсионном методе. Акустическая связь между излучателем ультразвуковых колебаний, исследуемым образцом и приемной пластиной осуществляется либо непосредственным контактом через тонкие прослойки масла, либо через промежуточную среду (вода, масло) — иммерсионный метод. Причем в случае работы методом непосредственного контакта поверхность образцов (изделий) должна быть хорошо обработана. А при иммерсионной интроскопии тщательная обработка поверхности изделия не обязательна. Например, контроль точечной и шовной сварки может производиться без зачистки поверхности. С помощью УЗИ-1 можно наблюдать в исследуемом объекте грани-

цы областей, различающихся по скорости распространения ультразвука вследствие неодинаковой термообработки, степени деформации или по другим причинам.

Электрические высокочастотные колебания генератора (1) преобразуются пьезоэлектрической пластиной излучателя (2) в механические ультразвуковые колебания. Эти колебания, проходя через испытуемый образец, попадают на приемную пьезоэлектрическую пластину ЭАП (3). Пьезоэлектрические заряды, возникающие в отдельных точках приемной пластины, пропорциональны падающей на эти точки ультразвуковой энергии. Таким образом происходит трансформация ультразвуковых изображений в рельеф электрических потенциалов. Потенциальный рельеф считывается лучом ЭАП построочно с помощью генераторов строчной (8) и кадровой (7) разверток. Высокочастотный сигнал изображения поступает с ЭАП (3) на вход усилителя ВЧ (4) и после усиления и детектирования подается на видеоусилитель сигнала изображения (5) и сигнала строки (10). С выхода видеоусилителя сигнал изображения поступает на индикатор изображения (6). С помощью селектора строки (9) на экране индикатора можно выбрать любую из строк телевизионного изображения. Распределение потенциального рельефа по выбранной строке получается на экране индикатора строки (11). В последующие годы ультразвуковой интроскоп был значительно конст-

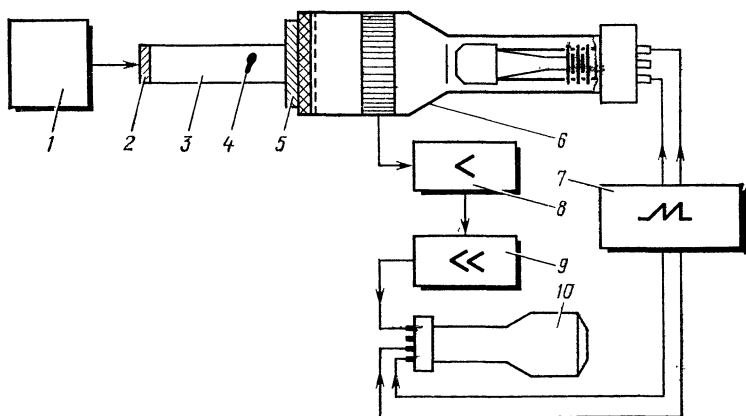


Рис. 5

руктивно модернизирован, получил название УЗИН и в 1976 г. был экспонирован на международной выставке «Экспо-67» в Монреале (Канада).

Интроскоп УЗИН предназначен для ультразвукового видения в непрозрачных средах. Он может легко обнаружить трещины, раковины, шлаковые включения, пустоты в металлах, а также твердые тела и газовые пузыри в жидкостях. Недостатком ультразвуковых интроскопов является получение на экране двухмерного (плоского) изображения.

За рубежом также было разработано несколько вариантов ультразвуковых интроскопов. По своему принципу они аналогичны советским схемам. Например, интроскоп «Ультраскэн-систем» (США) имеет следующие особенности:

- получение визуальной проекции области, которая имеется на видеоконтрольном устройстве в виде черно-белого изображения;

- постоянная фотографическая запись на стандартных кадрах диапозитивов. Поляроидная фстография позволяет получать очень быстро (60 с) четкую постоянную запись;

- определение разницы температур в тканях, например, он хорошо определяет замороженную и незамороженную ткань;

- определение дефектов в сварных швах, отливках, поковках и других металлических изделиях практически всех металлов;

- опознание смеси жидкостей, вытекающих из выходного отверстия трубы, где наблюдается разница в температуре или основных химических компонентах;

- ведение подводных исследований.

Система «Ультраскэн» особенно хорошо подходит для определения дефектов в верхних слоях материалов и поверхностных дефектов. Данные испытания показывают, что при определенных уровнях можно наблюдать визуально механические напряжения и проводить испытания пластмасс неразрушающими методами. В системе «Ультраскэн» имеется механическое координационное устройство для установки образцов.

Дефекты обычно воспроизводятся на телевизионном видеоконтрольном устройстве в виде черных областей, изображающих низкую интенсивность звука, в то время как окружающая матрица будет нормально изображать-

ся сравнительно однородным серо-белым полем, обозначающим высокую интенсивность звука. Противоположное изображение будет получаться в тех случаях, когда неоднородность наблюдается у материалов более высокой плотности, чем матрица. Фотографии, получаемые системой «Ультраскэн», называются зониграмами.

Звуковидение в медицине. Мы уже указывали, что ультразвук имеет особенность перед рентгеновскими лучами, заключающуюся в том, что ультразвуковые лучи не воздействуют на человеческий организм. Это значит, что человека можно «просвечивать» ультразвуковыми лучами неоднократно, не опасаясь каких-либо вредных последствий.

Канада первая из высокоразвитых стран мира ввела с 1967 г. в медицинскую практику ультразвуковое просвечивание человеческого организма вместо широко распространенного рентгеновского просвечивания. Использование ультразвука в медицине началось с 1937 г.

На протяжении нескольких лет производились экспериментальные работы по ультразвуковому просвечиванию различных органов человеческого тела. Например, была исследована голова человека с целью получения звукового изображения мозга. Однако звуковое изображение оказалось некачественным в связи с тем, что ультразвук взаимодействовал с каждой поверхностью раздела, встречающегося на его пути. Особенно сказывалось влияние черепной коробки, где скорость звука варьировала в зависимости от толщины костей черепа. Влияло также затухание звука в разных участках черепа. Все это приводило к значительным искажениям, из-за которых затруднялась интерпретация звукового изображения. Сейчас ведутся научные работы по совершенствованию метода «просвечивания» головного мозга.

Очень многообещающими оказались эксперименты по диагностике патологии глазной области. По мере развития акустической голографии ее опробовали в медицинской диагностике для исследования глаза. К этому были предпосылки: с точки зрения звуковидения глаз представлял собой одну из самых простых анатомических структур.

Экспериментальная установка для записи акустических голограмм глаза имеет пьезоэлектрический излучатель, создающий параллельный звуковой пучок в трубке, которая наполнена жидкостью, необходимой для

записи голограммы на звукочувствительную пластину, помещенную между излучателем и глазом. Часть ультразвукового пучка, проходящая через пластину, используется в качестве опорного пучка. Он интерферирует с волнами, отраженными от глаза. Так формируется голограмма. После проявления пластины голограмма восстанавливается. Были сделаны также попытки получить изображение сердца, почек, печени. Эхо-сигналы использовали для диагностики камней в желчных путях и инородных тел в мягких тканях.

Надо сказать, что, несмотря на значительные результаты, достигнутые при применении ультразвука и акустической голографии для медицинской диагностики, необходимо провести ряд научно-исследовательских работ как в области интерпретации звуковых картин и голограмм, так и в области разработки практических систем звуковидения.

Акустическая томография. Совсем недавно начались эксперименты по внедрению в медицинскую диагностику метода акустической томографии. Этот метод основывается на практических результатах рентгеновской томографии. Прежде чем о нем рассказать, напомним, в чем состоит принцип рентгеновской томографии.

Вот уже много лет как в промышленности, медицине и еще во многих областях науки и техники при необходимости заглянуть внутрь непрозрачного объекта его просвечивают рентгеновским излучением и регистрируют рентгеновское изображение или рентгенограмму. Но рентгенограмма — это двухмерная проекция исследуемого объекта, его тенеграмма. Получить по ней достаточно полное и однозначное представление о внутренней структуре исследуемого объекта невозможно, так как на тенеграмме нет меток о глубине залегания различных элементов объекта.

В результате многочисленных исследований были найдены способы нанесения меток глубины залегания той или иной структуры объекта и методы «выреза» тонкого слоя без облучения остальных участков объекта.

Одним из таких прогрессивных методов была томография (от двух греческих слов: «томос» — сечение, «графо» — пишу), т. е. запись изображения сечения объекта. Несмотря на то что она была изобретена в 1926 г., только в 1930 г. удалось получить томограмму

изображения поперечного сечения внутренней структуры объекта.

Задачей рентгеновской томографии является получение на томограмме четкого изображения определенных элементов объекта на фоне размытых изображений остальных элементов.

Существует несколько вариантов систем рентгеновской томографии, однако в них заложен один и тот же принцип классической рентгеновской томографии. Он заключается в линейном перемещении источника рентгеновского излучения и фотопленки. Итак, допустим, что мы имеем две параллельные плоскости. Точечный источник движется вдоль одной из плоскостей, а фотопленка — в обратном направлении, синхронно с источником в другой плоскости. Исследуемый объект расположен неподвижно в фокальной плоскости, между источником и фотопленкой, как в обычной рентгеноскопии. Четкое изображение на томограмме дают только те элементы объекта, которые находятся вблизи фокальной плоскости. Остальные слои объекта оставляют на фотопленке размытые изображения.

Необходимо отметить, что положение фокальной плоскости относительно обеих плоскостей определяется отношением скоростей перемещения источника и фотопленки. Например, если эти скорости равны, то фокальная плоскость лежит посередине между обоими плоскостями. При разных скоростях положение соответственно изменяется.

По такому принципу можно формировать проекционное изображение заданного сечения внутренней структуры объекта на фоне размытых изображений остальных элементов объекта. Качество томограммы существенно выше обычных рентгенограмм. Однако из-за размытого фона контраст томограммы все же достаточно низок, что затрудняет интерпретацию полученных данных.

Можно ли улучшить качество томографического изображения? Одна из возможностей заключается в том, что исходное томографическое изображение подвергают пространственной фильтрации и подавляют низкие пространственные частоты. В результате увеличивается визуальная информативность. Очевидно, что для такой обработки требуется дополнительное оборудование и вычислительная техника.

Дальнейшее развитие рентгеновской томографии при-

вело к разработке более усовершенствованных методов, позволяющих применять их для объектов любой формы и сложности.

Принцип рентгеновской томографии нашел применение и в других областях науки и техники, в частности в ультразвуковой, а развитие рентгеновской реконструктивной томографии инициировало зарождение акустической томографии. На первом этапе ее развития была попытка использовать схему, используемую в трансмиссионной рентгеновской томографии с параллельными пучками.

Используя излучатель и приемник ультразвука, между которыми располагали исследуемый объект, измеряли суммарное ослабление узкого пучка ультразвука. Это производилось под многими ракурсами для многих положений излучателя и приемника относительно исследуемого объекта. По этим данным реконструировали значение коэффициента ослабления ультразвука в различных участках объекта. Так получалась картина распределения. Это и была акустическая томограмма. Однако в процессе работы с этой схемой оказалось, что в некоторых случаях на точность распределения влияли отражение, преломление и другие волновые процессы, свойственные ультразвуку. Получались искажения, которые не позволяли в ряде случаев использовать эту акустическую томограмму.

И тем не менее описанный метод обладал большими информативными возможностями. Ведь ультразвуковой импульс, распространяясь от излучателя до приемника по прямой линии, несет в себе информацию об акустических свойствах объекта в узкой прямолинейной полосе томографического сечения объекта, толщину которого считают постоянной по всему сечению. Значит, некоторое усовершенствование схемы позволит использовать ее в практических целях.

Акустики в разных странах, пытаясь усовершенствовать описанную схему, пришли к общему мнению, что ее можно улучшить двумя способами рефракционной акустической томографией и доплеровской томографией.

В первом случае метод дает возможность определить значение показателя преломления ультразвука в различных участках объекта или эквивалентное им распределение скорости звука. Так возник способ рефракционной акустической томографии, позволяющий наблюдать про-

фили времен пролета коротких импульсов ультразвука, измеренные под многими ракурсами.

Во втором случае в доплеровской томографии локальные сигналы суммируют строго по прямым линиям. Практически это осуществляется так: наблюдают доплеровский сдвиг частоты при озвучивании равномерно вращающегося объекта тонким, коллимированным пучком ультразвука, лежащим в плоскости объекта. Поскольку плоскость пучка ультразвука перпендикулярна оси вращения объекта, то сдвиг частоты ультразвука, отраженного от рассматриваемого элемента объема, и определяется прицельным расстоянием, на котором находится элемент объекта в данный момент времени.

Доплеровский сдвиг, создаваемый вращением объекта, позволяет получить данные, необходимые для томографического восстановления рассеивающих центров в поперечном сечении. Несмотря на то что принципы методов акустической томографии уже разработаны, практическое ее применение не вышло за пределы лаборатории.

Можно надеяться, что акустическая томография войдет в ближайшее время в арсенал диагностических методов как в медицине, так и в технике.



ЗАИНТЕРЕСОВАННОМУ ЧИТАТЕЛЮ

Акустическая голография. Пер. с англ. Л., Судостроение, 1975.
Грасюк Д. С., Ощепков П. К., Розенберг Л. Д., Семенников Ю. Б. Ультразвуковой интроскоп с новым электронно-акустическим преобразователем «У-55». — Акустический журнал, 1965, т. IV, № 4, с. 438—466.

Грасюк Д. С., Семенников Ю. Б. Анализ чувствительности и четкости звуковых изображений. — Акустический журнал, 1975, т. XIX, № 1, с. 39—45.

Грегуш П. Звуковидение. Мир, 1982.

Гурвич С. Б., Бабин Л. В. Акустическая голография. — Акустический журнал, 1972, т. XVII, с. 489—512.

Каневский И. Н. Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн. М., Наука, 1977.

Ощепков П. К., Розенберг Л. Д., Семенников Ю. Б. Электронно-акустический преобразователь для визуализации звуковых изображений. — Акустический журнал, 1955, т. I, № 4, с. 348—351.

Ощепков П. К., Пирожников Л. Б. Окружающий мир прозрачен. М., Знание, 1980.

Пирожников Л. Б. Интроскопия. — Машиностроитель, 1967, № 5.

Пирожников Л. Б. Что такое голография? М., Московский рабочий, 1983.

Прохоров В. Г. К вопросу преобразования ультразвукового изображения в видимое. — Акустический журнал, 1957, т. 3, № 5, с. 254—261.

Розенберг М. Д. Звуковые фокусирующие системы. М.—Л., Изд. АН СССР, 1949.

Свет В. Д. Методы акустической голографии. Л., 1976, Изд. ЦНИИ, «Румб».

Семенников Ю. Б. Исследование электронно-акустического преобразователя. — Акустический журнал, 1958, вып. II, т. IV, с. 73—84.

Соколов С. Я. Ультразвуковой микроскоп. «ДАН СССР», 1949, т. 64, с. 333—336.

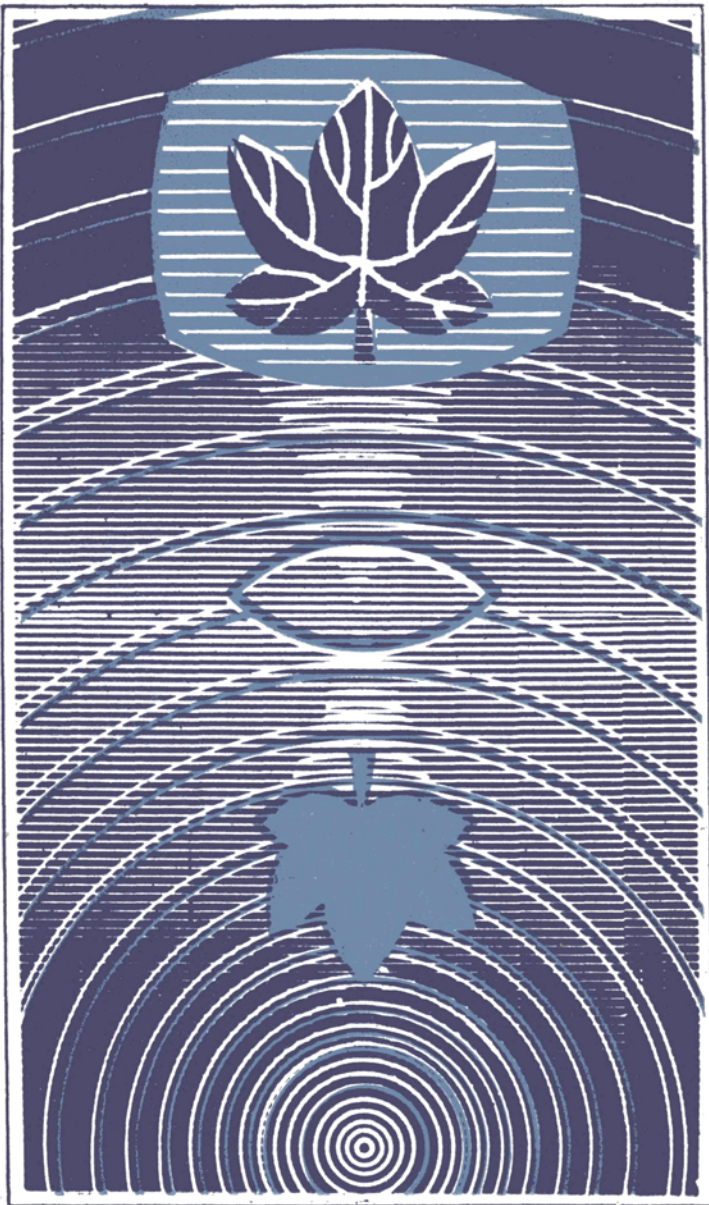
Ультразвук. Советская энциклопедия. М., 1979.

Ультразвуковой интроскоп «УЗИ-1», Временная инструкция. Горький, 1962.

**Павел Кондратьевич Ощепков,
Лоренц Богданович Пирожников**
ЗВУКОВИДЕНИЕ

Главный отраслевой редактор Л. А. Ерлыкин. Редактор Б. М. Васильев. Мл. редактор Т. И. Елова. Обложка художника А. И. Чаузова. Худож. редактор Т. С. Егорова. Техн. редактор Н. В. Лбова. Корректор В. В. Каночкина.
ИБ № 6462

Сдано в набор 16.12.83. Подписано к печати 03.02.84. Т 03689. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отг. 3,57. Уч.-изд. л. 3,43. Тираж 41 050 экз. Заказ 2385. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 844602.
Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.



СЕРИЯ **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
И СВЯЗЬ**