

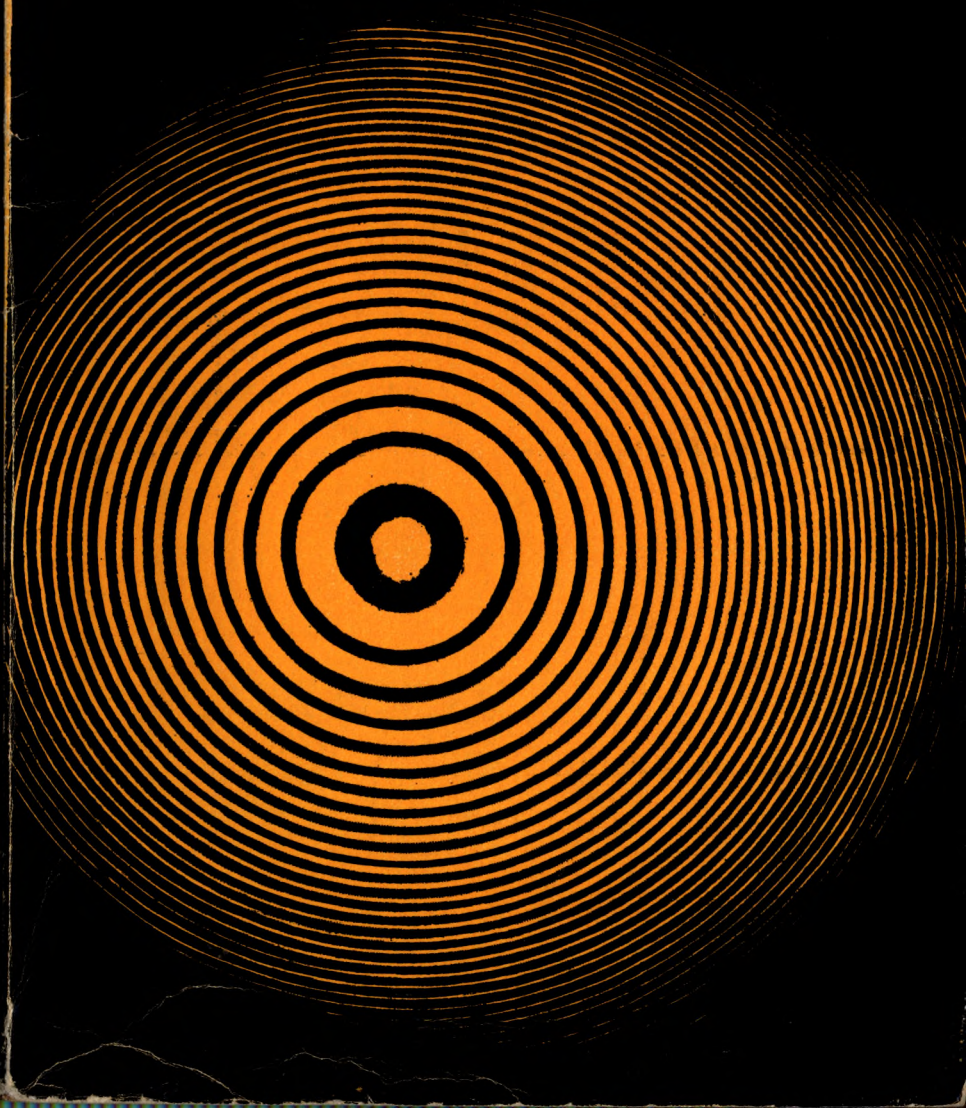
247

И И ТЕХНИКИ

НТ

У.КОК

# ВИДИМЫЙ ЗВУК







WINSTON E. KOCK

---

## SEEING SOUND

New York, Wiley and Sons 1971

УИНСТОН Е. КОК

---

# ВИДИМЫЙ ЗВУК

Перевод с английского  
канд. физ.-мат. наук Г. И. Кузнецова

Под редакцией и с послесловием  
д-ра физ.-мат. наук проф. С. Б. Гуревича

---

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» МОСКВА 1974

---

**Кок У. Е.**

**К 59**

**Видимый звук.** Пер. с англ. Г. И. Кузнецова. Послесл. С. Б. Гуревича. М., «Мир», 1974. 124 с. с илл. (В мире науки и техники)

У. Кок известен советскому читателю как автор научно-популярных книг «Звуковые и световые волны» («Мир», 1966) и «Лазеры и голография» («Мир», 1971). Его новая книга «Видимый звук» посвящена получению изображений звуковых волн.

Просто и доходчиво рассказывает автор о способах регистрации звука от различных источников, о звуковой структуре речи, музыки, о новой, ныне развивающейся области акустики — звуковой голографии, с помощью которой получают изображения предметов, «освещенных» звуковой волной.

Книга рассчитана на самые широкие круги читателей, желающих быть в курсе последних достижений современной науки и техники.

К  $\frac{20405-186}{041(01)-74}$  186—74

534

© Перевод на русский язык, «Мир», 1974.

*Редакция научно-популярной  
и научно-фантастической литературы*

# Предисловие

---

Для чего нам нужно «видеть» звук? Что, собственно говоря, мы выигрываем, получая зарисовку явления, которое обычно воспринимаем на слух? Наверное, все дело в том, что люди издавна привыкли верить лишь тому, что видят,— вся история науки говорит нам о стремлении изображать результаты наблюдений и измерений в виде графиков и таблиц.

Сегодня визуальные методы проведения важных для нас ежедневных измерений общеизвестны. Спидометр в автомобиле, термометр за окном, часы на руке позволяют нам «видеть» столь необходимые в нашей жизни характеристики меняющихся событий и явлений. В научных лабораториях институтов и промышленных предприятий широко используются визуальные приборы. Эти приборы улавливают изменение некоторых величин и передают его на циферблат, где оно становится «видным» и нам благодаря стрелке-указателю или движущемуся световому пятну. Иногда это помогает экспериментатору понять, что происходит, а в ряде случаев позволяет тщательно проанализировать те или иные тонкости данного явления или эксперимента.

Поэтому не удивительны многочисленные попытки визуального изучения звуковых явлений. К числу таких попыток следует прежде всего отнести использование пламени газа, которое очень сильно реагирует на падающие звуковые волны, и «фонавтографа», в котором стальная игла, прикрепленная к диафрагме, касается движущейся задымленной ленты, рисуя на ней кривую, соответствующую приходящему звуку. Причины попыток делать зарисовки звуковых явлений весьма различны, но в большинстве своем они идентичны причинам, которые вызвали

появление этой небольшой книги, посвященной вопросам видимого звука. Вот лишь некоторые из них:

рисую пространственную картину распространения звуковых волн, мы можем наблюдать и измерять эффекты дифракционных и рефракционных процессов, которые возникают, когда звуковые волны огибают препятствия или проходят сквозь различные структуры;

чтобы изучить свойства звуков, лежащих вне пределов нашего слухового восприятия, необходимо владеть методами получения их визуального портрета;

для регистрации и анализа звуков, возникающих в океане, также необходимо иметь их видимую картину;

о сложных звуках речи или музыки часто гораздо больше можно узнать, не воспринимая звук на слух, а анализируя записанную картину звуковых волн. (Именно путем визуального анализа звуковой картины речи, воспроизведенной с магнитофонной ленты, расшифровывается последнее сообщение летчика об аварии самолета.)

В этой книге будут рассмотрены самые разные типы звуковых картин. Мы «увидим» здесь естественные и искусственные звуки, которые были записаны в глубинах океанов, музыкальные звуки и звуки человеческой речи, звук самолета и звуковой шум.

Я надеюсь, что визуальное представление различных звуков позволит читателю не только глубже проникнуть в природу звука, но и привлечет его внимание к решению проблем, которые пока «не дались» акустикам.

Саусфилд, Мичиган  
Июнь 1971 г.

*Уинстон Е. Кок*

## Природа звука

Движение рождает звук. Всем знакомы звуки, возникающие при движении натянутой на барабан кожи, волн морского прибоя, раскачиваемых ветром ветвей. Они отличаются друг от друга так же, как непохоже одно на другое движение каждого из названных объектов. Иными словами, «окраска» каждого отдельного звука строго зависит от движения, благодаря которому он возникает. Так, если колебательное движение происходит чрезвычайно быстро, звук содержит колебания высокой частоты. Менее быстрое колебательное движение создает звук более низкой частоты. Частота, с которой повторяются колебания, измеряется в герцах (или циклах в секунду); 1 Гц есть частота такого периодического колебания, период которого равен 1 с. Запомните, именно *частота* является тем свойством, которое позволяет нам отличать один звук от другого. Поскольку область звуковых частот для нашего уха ограничена, мы воспринимаем лишь те звуки, которые лежат в диапазоне от 15 до 15 000 или 20 000 Гц. При очень медленных, менее 15 Гц, или очень быстрых, более 20 000 Гц, колебаниях мы звука не слышим. Поэтому для регистрации звуков, лежащих вне пределов частот, воспринимаемых человеческим ухом, нам необходимы специальные приборы.

Если быстрота колебательного движения определяет частоту звука, то его величина (размер перемещения) — громкость. На рис. 1 изображена гибкая пластинка, закрепленная напротив вращающегося зубчатого колеса. Если такое колесо вращать с большой скоростью, возникнет высокочастотный тон, более медленное вращение породит тон меньшей частоты. Причем чем мельче зубья колеса (как это показано пунктиром), тем слабее звук, и чем зубья крупнее, то есть чем сильнее они вынуждают откло-

няться пластинку, тем он громче. Таким образом, мы можем отметить еще одну характеристику звука — его *громкость (интенсивность)*.

Нельзя не упомянуть и о таком свойстве звука, как *качество*<sup>1</sup>. Качество теснейшим образом связано со структу-

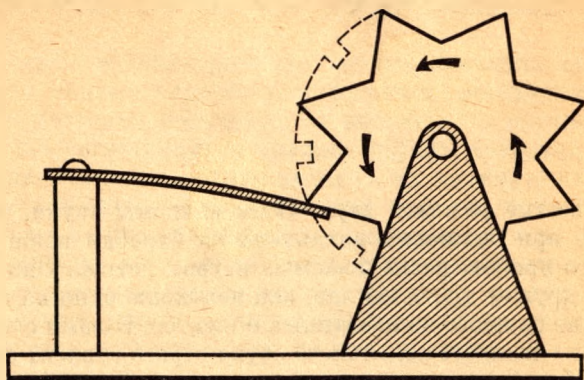


Рис. 1. Источник звука в виде металлической пластинки, цепляющейся за зубчатое колесо.

рой, которая может изменяться от чрезмерно сложной до чрезвычайно простой. Тон камертона, поддерживаемый резонатором, имеет очень простую структуру, так как содержит только одну частоту, величина которой зависит исключительно от конструкции камертона. При этом звук камертона может быть и сильным, и слабым.

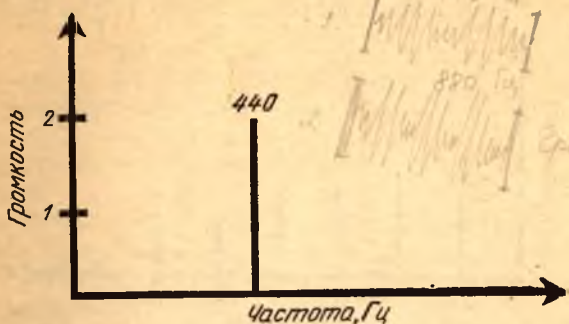
На рис. 2 дано графическое изображение предельно простого тона. По координатным осям отложены частота и громкость. Частота представленного на графике тона равна 440 Гц, а громкость — двум (в произвольных единицах)<sup>2</sup>.

Взяв камертон меньших размеров, мы тоже получили бы простой тон, но частота его была бы большей. Одновременный удар по двум разным камертонам создаст звук

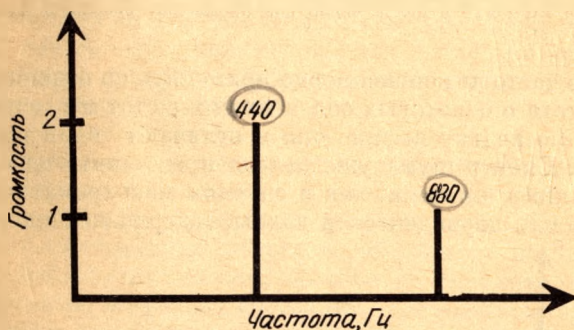
<sup>1</sup> Автор здесь имеет в виду спектральный состав звука, который является лишь одной из характеристик его качества. Другая его характеристика — динамика звука (нарастание, спадание, импульсивность). — *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Частота 440 Гц соответствует ноте ля, лежащей выше среднего до. Обычно по этой ноте музыканты настраивают свои инструменты.

сложной структуры, который будет содержать не одну, а две частоты. На рис. 3 дано спектральное представление этого звука, содержащего как тон первого камертона (частота 440 Гц и громкость 2 единицы), так и более мягкий тон второго, меньшего камертона (частота 880 Гц, громкость 1 единица).



Р и с. 2. Спектр монохроматического звукового сигнала.



Р и с. 3. Спектр звукового сигнала, содержащего две частоты.

Можно создать звуки и гораздо более сложные, так, например, множество частот содержит звук органного аккорда. Даже звук мандолиновой струны достаточно сложен. Это связано с тем, что натянутая струна колеблется не только с основной (как камертон), но и с другими частотами. Они генерируют дополнительные тоны (гармоники), частоты которых в целое число раз превосходят частоту основного тона. Различные гармоники, или обертоны, складываясь

вместе, создают сложный тон. Спектр звука, богатого обертонами, представлен на рис. 4.

Звуки, содержащие один тон или комбинацию обертонов, являются по своей природе «музыкальными». По структуре все они не так сложны, как шум. Завывание ветра в штормовую погоду, раскаты грома, рев реактивного самолета имеют очень широкий спектр частот. Вообще-то

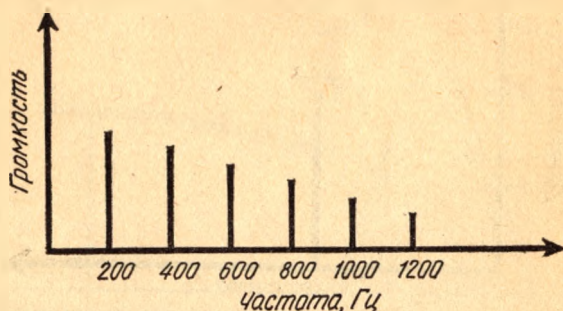


Рис. 4. Способ изображения периодической волны, содержащей много гармоник.

Частота гармоник в целое число раз превышает основную частоту.

понятие частоты неправомерно применять по отношению к шуму, хотя о некоторых областях его частот мы можем говорить, поскольку именно они и отличают один шум от другого. Спектр шума уже нельзя представить одной или несколькими линиями, как в случаях монохроматического сигнала или периодической волны, содержащей много гар-

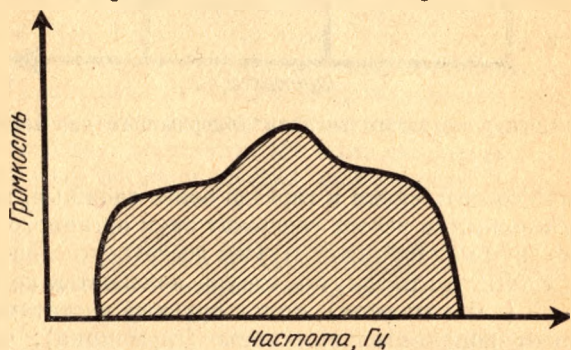


Рис. 5. Способ изображения шума — непериодической волны, имеющей широкий спектр частот.

моник (рис. 2—4); он изображается целой полосой (рис. 5).

Частотная структура некоторых звуков, особенно музыкальных, такова, что все обертоны являются гармоническими по отношению к основному тону; в таких случаях говорят, что звуки обладают высотой (определяемой частотой основного тона). Большинство же звуков не столь мелодично, в них нет свойственного музыкальным звукам целочисленного соотношения между частотами. Эти звуки по своей структуре подобны шуму. Следовательно, обобщая сказанное, мы можем утверждать, что звук характеризуется громкостью, качеством и высотой.

Что же происходит со звуком после его возникновения? Как он распространяется? Как доходит, к примеру, до нашего уха?

Для звуковых волн, возникающих в воздухе, колебание является по сути дела движением воздуха. Мы уже отмечали, что создает звук движение, но для распространения звука необходима среда, в которой возмущение может передаваться во все стороны от точки возникновения. Как волны на поверхности воды не могут существовать без воды, так и звуковые волны, рожденные в воздухе, не могут распространяться без него, в вакууме. Если электрический звонок поместить под колпак, из-под которого выкачан воздух, звук его становится очень слабым. Разумеется, звук может распространяться не только в воздухе, но и в воде, в других жидкостях и в твердых телах. Кстати, с распространением звука в твердых телах связан тот факт, что эксперимент со звонком, помещенным под колпак, долгое время казался не очень убедительным. Дело в том, что экспериментаторы недостаточно хорошо изолировали звонок и звук был слышен, даже когда под колпаком не было воздуха, поскольку колебания передавались через всевозможные соединения установки<sup>1</sup>.

Вясним теперь, как распространяются волны в среде. В случае с волнами на поверхности воды мы видим, что возмущение, вызванное брошенным в гладь пруда камнем, распространяется расходящимися кругами гребней. Возбудитель волн, находящийся в центре пруда и совершающий периодические колебания вверх — вниз, будет создавать

<sup>1</sup> В 1650 г. Атанасиус Кирхер и Отто Гюкке на основании эксперимента со звонком заключили, что для распространения звука воздушная среда не нужна. Лишь десять лет спустя Роберт Бойль убедительно доказал обратное.

устойчивые непрерывные волны, постоянно движущиеся в разные стороны от источника. В следующей главе, рассматривая фотографии пространственных картин звуковых волн, читатель убедится, что звук также распространяется волнами. Но поскольку окружающее нас пространство в отличие от двумерной поверхности пруда трехмерно, то и звуковые волны распространяются не в двух, а в трех направлениях — в виде расходящихся сфер. А так как энергия в генерированной волне фиксирована, то при распространении волны она распределяется по сферической поверхности, радиус которой все время возрастает. Следовательно, громкость, или сила звука, по мере увеличения расстояния между слушателем и источником звука падает.

Наблюдая за волнами на поверхности пруда, мы видим, что они движутся с какой-то постоянной скоростью. Звуковые волны также имеют определенную скорость распространения. Если гроза разразилась прямо над нашей головой, вспышки молний почти мгновенно сопровождаются раскатами грома. Но если гроза далеко, они на несколько секунд опережают гром. Дело в том, что свет почти мгновенно достигает наших глаз, в то время как звук распространяется гораздо медленнее. Запаздывание, или задержка, возникает потому, что звуку требуется гораздо больше времени, чтобы дойти до нас, нежели свету. На уровне моря звук распространяется со скоростью 332 м/с, в то время как скорость распространения света приблизительно 300 000 км/с, то есть почти в миллион раз больше. Если мы слышали раскаты грома более чем через 5 с после того, как увидели молнию, то можем заключить, что гроза находится от нас на расстоянии не менее 1,5 км.

Скорость звука и его частота определяют длину волны. Наблюдая за волнами в пруду, мы замечаем, что расходящиеся круги иногда бывают меньше, а иногда больше, иными словами, расстояния между гребнями или впадинами волн могут быть различными в зависимости от размеров объекта, благодаря которому они возникли. Держа руку достаточно низко над поверхностью воды, мы можем ощущать каждый проходящий мимо нас всплеск. Чем больше расстояние между следующими друг за другом волнами, тем реже их гребни будут касаться наших пальцев. Такой несложный опыт позволяет нам сделать вывод, что в случае волн на водной поверхности для данной скорости распространения волн большей частоте соответствует меньшее

расстояние между гребнями волн, то есть более короткие волны, и, наоборот, меньшей частоте — более длинные волны.

То же самое справедливо и для звуковых волн. О том, что через некоторую точку пространства проходит звуковая волна, можно судить по изменению давления в данной точке. Это изменение полностью повторяет колебание мембраны источника звука. Человек слышит звук, потому что звуковая волна оказывает переменное давление на барабанную перепонку его уха. Как только гребень звуковой волны (или область высокого давления) достигает нашего уха, мы ощущаем давление. Если области повышенного давления звуковой волны следуют друг за другом достаточно быстро, то и барабанная перепонка нашего уха колеблется быстро. Если же гребни звуковой волны значительно отстоят друг от друга, то и барабанная перепонка будет колебаться гораздо медленнее.

Скорость звука в воздухе является на удивление постоянной величиной. Мы уже видели, что частота звука непосредственно связана с расстоянием между гребнями звуковой волны, то есть между частотой звука и длиной волны существует определенное соотношение. Мы можем выразить это соотношение следующим образом: длина волны равна скорости, деленной на частоту. Можно сказать и по-другому: длина волны обратно пропорциональна частоте с коэффициентом пропорциональности, равным скорости звука. В следующей главе на рис. 16 мы увидим, что свойства звуковых волн, а также характеристики их движения очень схожи со свойствами и характеристиками распространения волн на поверхности воды. Длина волны, как это хорошо видно из рис. 16, равна измеренному по радиусу расстоянию между двумя соседними гребнями волн,

$$\lambda = \frac{v}{\text{число волн}}, \quad \lambda = \frac{m/s}{\text{Гц}}$$

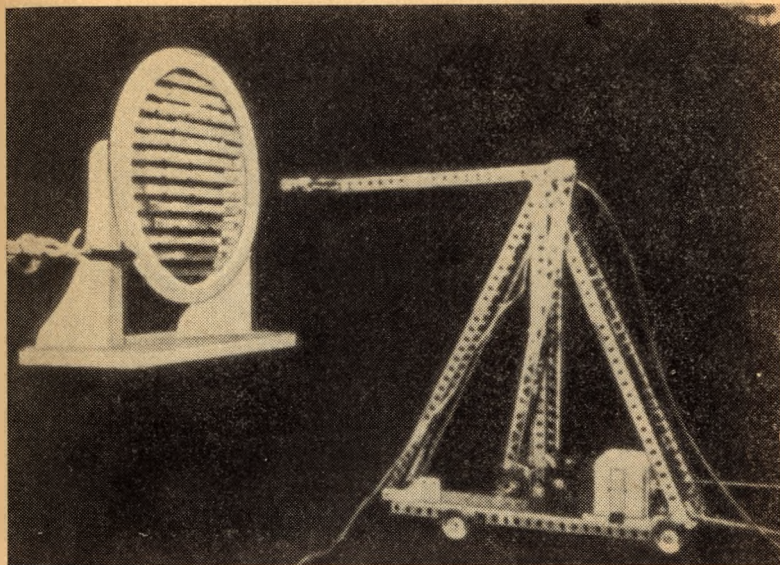


## Видимые звуковые волны

Чтобы сделать какое-либо явление или результаты измерения видимыми, нужен прибор, который может преобразовывать воздействия этого явления в видимую картину. Так, в термометре с изменением температуры ртуть или спирт расширяются или сжимаются, и эти изменения объема мы можем сравнивать и оценивать благодаря градуированной шкале, на которой закреплена трубка с ртутью или спиртом. Скорость автомобиля мы узнаем, глядя на спидометр, который воспринимает скорость вращающихся колес; соответственно этому вращению стрелка спидометра занимает определенное положение на шкале.

Для того чтобы видеть звук, используют электронный прибор — микрофон. Этот прибор фиксирует переменное давление проходящей звуковой волны и преобразует его в переменный электрический ток. Так, например, микрофон в телефонной трубке преобразует звуки нашего голоса в электрические сигналы, которые передаются на другой конец телефонной линии, где с помощью приемной части телефонной трубки снова превращаются в первоначальные звуки речи. Громкий звук микрофон преобразует в сильный электрический сигнал, а тихий — в слабый.

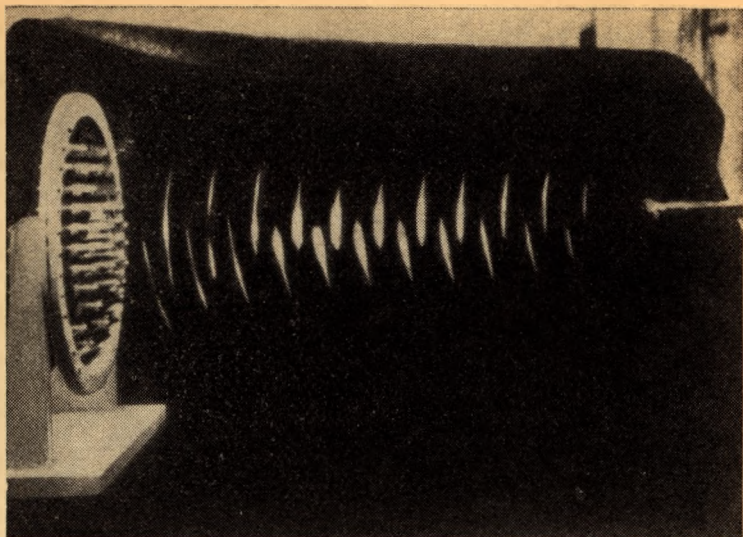
Электрический сигнал микрофона можно увидеть с помощью электрической лампочки. От громкого звука (сильный электрический сигнал) лампочка будет светить ярко, а от слабого, наоборот, — тускло. Для любого прибора всегда существует некоторое время задержки; у обычной электрической лампочки оно велико, а вот маленькая неоновая лампочка успевает следить за изменением громкости, поэтому ее и применяют в установках для обнаружения и исследования звука, о которых говорится ниже. Чтобы измерить интенсивность звука во всех точках некоторой



Р и с. 6. Сканирующее устройство с электрическим приводом.

области и получить видимую картину этой интенсивности, неоновую лампочку прикрепляют к микрофону. Система микрофон — лампочка движется в интересующей нас области, и изменение яркости фиксируется обычным фотоаппаратом. По яркости лампочки в рассматриваемой точке мы судим о громкости звука. Когда система микрофон — лампочка сканирует звуковое поле, фотокамера записывает изменение интенсивности света от точки к точке. В результате мы получаем фотографию громкости рассматриваемого звукового поля.

На рис. 6 представлен такой прибор для сканирования звукового поля. Система микрофон — лампочка закреплена на движущемся устройстве, изготовленном из деталей детского механического конструктора. Когда рычаг, на котором находятся лампочка и микрофон, движется вверх и вниз, система микрофон — лампочка движется по большой круговой дуге, при этом вся конструкция в целом медленно перемещается вправо. В процессе сканирования мы и получаем картину звукового поля.

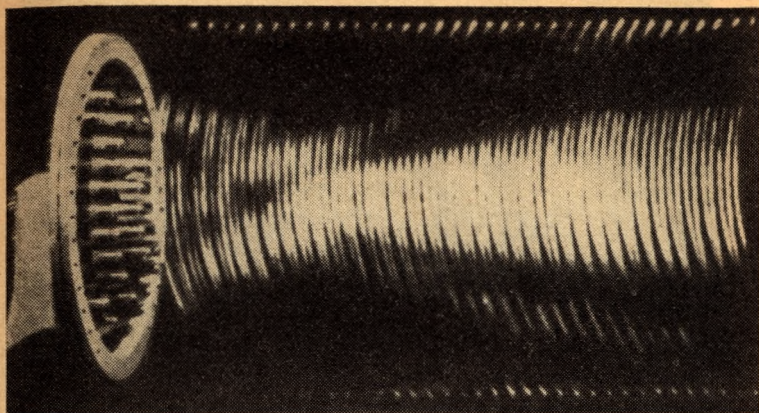


Р и с. 7. Картина звукового поля.

Получена при помощи сканирующего устройства, изображенного на рис. 6, в котором использовалась обычная электрическая лампочка накаливания. Ее инерционность дает нежелательные задержки, отчего полученные полосы расположены далеко друг от друга.

На рис. 7 дана фотография яркости лампочки, установленной на приборе, показанном на рис. 6. Рычаг прибора пересекал стационарное звуковое поле перед акустической линзой. Акустическая линза фокусирует звуковые волны точно так же, как оптическая линза фокусирует солнечный свет. В данном случае вместо неоновой лампочки использовалась обычная электрическая лампочка накаливания. Время задержки между сильными звуковым и световым сигналами приводит к тому, что на фотографии появляется система светлых верхних и нижних полос, причем нижние полосы не являются продолжением верхних. Так как установка двигалась в горизонтальном направлении довольно быстро, расстояние между полосами получилось на фотографии большим.

На рис. 8 представлена картина того же звукового поля, но только вместо обычной использована неоновая лампочка. Яркие части зигзагообразных полос, относящие-



Р и с. 8. Картина звукового пучка за акустической линзой.

Получена с помощью сканирующего устройства, в котором использовалась чувствительная неоновая лампочка. Хотя пучок в данном случае виден лучше, чем пучок на рис. 7, все же это грубая модель звукового поля.

ся к центральной сфокусированной области, соответствуют сильному звуку, менее яркие — слабому. Картина сфокусированного звука в этом случае более отчетлива, однако вследствие быстрого перемещения установки вертикальные линии по-прежнему сильно раздвинуты. Чтобы устранить этот недостаток, был построен сканирующий прибор несколько иной конструкции (рис. 9), позволивший более точно «рисовать» картину звукового поля. На рис. 9 справа мы видим фотокамеру, которая приготовлена для экспонирования. В центре находится сканирующий стержень. На его конце укреплены маленький черный микрофон и неоновая лампочка. Слева помещена акустическая белая линза, а позади нее — рупор, который является источником звука. Электрический мотор двигает стержень вверх — вниз, а также медленно перемещает всю установку от источника звука (по направлению к читателю).

На рис. 10 представлена фотография звукового поля (того же, что и на рис. 7 и 8), полученная с помощью этой установки. Вертикальные линии, возникающие в результате зигзагообразного движения, располагаются на фотографии очень плотно, даже перекрываются, так что разглядеть отдельную линию практически невозможно. В центре фо-

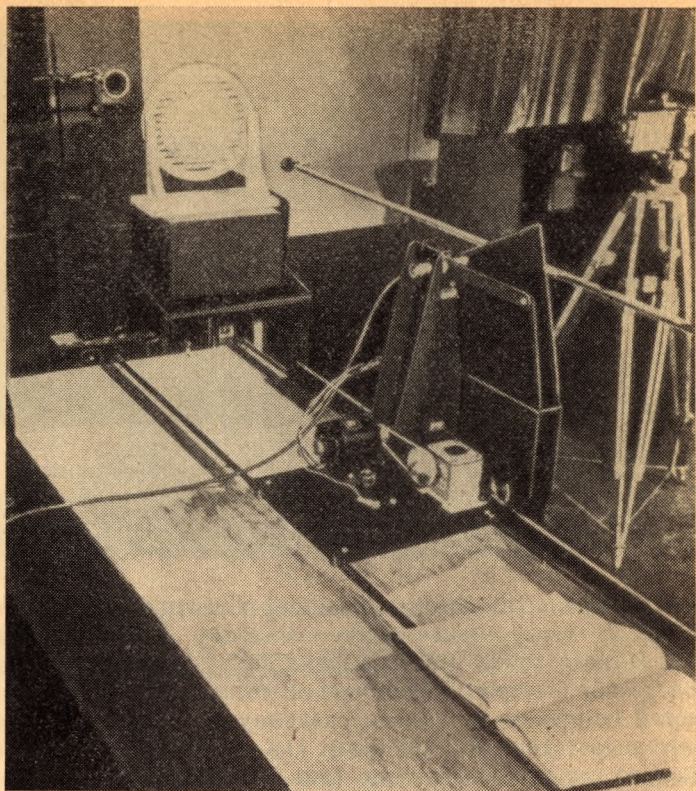
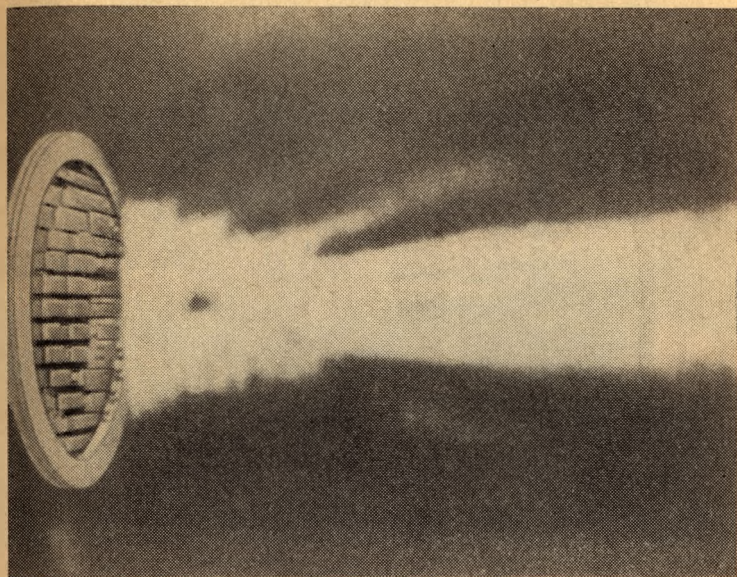


Рис. 9 Улучшенная модель сканирующего устройства.

тографии видна светлая полоса. Это область сконцентрированной звуковой энергии, в которой звук наиболее интенсивен.

На рис. 11 видна картина звукового поля перед рупором пирамидальной формы, или мегафоном. С помощью мегафона энергия человеческого голоса распространяется в строго определенном направлении. Яркая полоса света на фотографии свидетельствует о том, что звук сильной интенсивности сосредоточен в одном направлении — в том, куда обращен рупор. Таким образом, рупор обладает способностью концентрировать звуковую энергию вдоль своей оси.

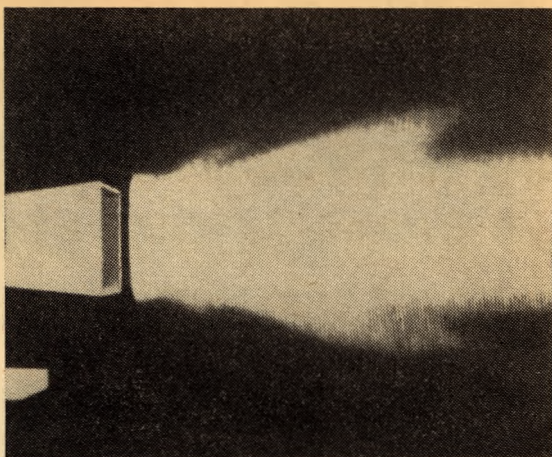


Р и с. 10. Сплошная картина звукового пучка.

Получена с помощью высокочувствительного сканирующего устройства, представленного на рис. 9. Акустическая линза диаметром 25 см фокусирует звуковые волны, частота колебаний которых 9000 Гц, а длина волны около 4 см.

С помощью рассмотренных выше устройств можно получать картины не только интенсивности звука, но и его распространения, то есть мы будем видеть движение звуковых волн так же, как видим движение волн на поверхности воды.

Фотопортрет движения волн удастся получить с помощью интерференционных эффектов, возникающих в результате наложения двух наборов волн. Если одновременно на каком-то расстоянии друг от друга бросить в пруд два камешка, то каждый из них создаст свой набор расходящихся кругами волн. Встречаясь, эти наборы волн накладываются друг на друга, или *интерферируют*. В тех точках, где гребни одного набора волн складываются с гребнями другого набора, получается волна с большим гребнем, а там, где совпадают впадины двух волн, получается комбинированная волна с еще более глубокой впади-



Р и с. 11. Картина интенсивности звуковых волн, исходящих из  
рупора пирамидальной формы.

Получена с помощью сканирующего устройства, изображенного на рис. 9. Площадь апертуры рупора около  $40 \text{ см}^2$ , а частота излученных звуковых волн 9000 Гц.

ной. Если же гребни одного набора волн налагаются на впадины другого набора, то результирующая волна имеет меньший гребень. В таких случаях говорят, что происходит *деструктивная интерференция*. В тех точках, где амплитуды двух волн складываются, происходит *конструктивная интерференция*.

Интерференционные эффекты, свойственные волнам на поверхности воды, характерны также и для звуковых волн. Если исходящие из рупора звуковые волны вызваны двумя генераторами, испускающими два набора волн противоположной полярности, то есть в тот момент, когда один из генераторов создает гребень, другой создает впадину, то о таких источниках звука говорят, что они работают в *противофазе*.

На рис. 12 показана картина звука, образованная двумя такими источниками, которые расположены один над другим. Вдоль линии, точки которой находятся на одинаковом расстоянии от источников звука, происходит его гашение, то есть создается область тишины. На рис. 12 она представлена черной расширяющейся полосой вдоль осевой

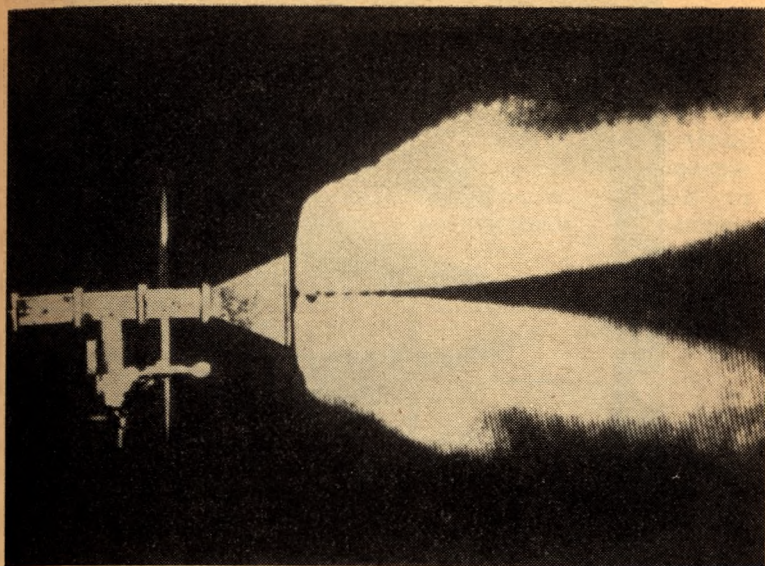


Рис. 12. Картина звукового поля двух разделенных источников, излучающих монохроматические звуковые волны противоположной полярности.

линии — это следствие деструктивной интерференции. И если на рис. 11 картина интенсивности звука от одного источника представляла собой одну сплошную светлую полосу, на рис. 12 эта полоса разделилась черной областью на две части.

Если два источника звука, действующие в противофазе, раздвинуть на некоторое расстояние, то картина звукового поля примет вид, показанный на рис. 13. Вдоль горизонтальной линии, проходящей посередине между двумя источниками звука, ясно видна черная полоса, обусловленная деструктивной интерференцией. Кроме нее, имеются еще побочные темные полосы — области с очень слабым звуком, появление которых вызвано тем, что источники звука раздвинуты на расстояние, равное трем длинам волн. В связи с этим возникли новые области деструктивной интерференции, где гребни волн одного источника налагаются на впадины волн другого.

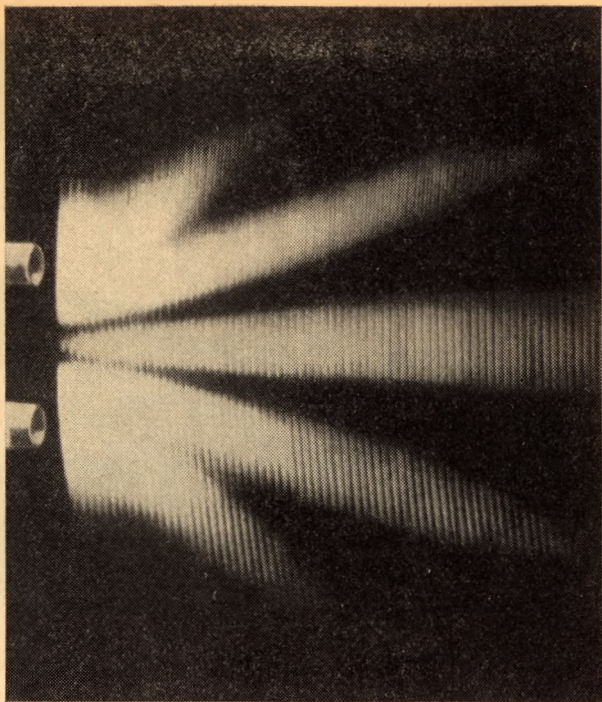


Рис. 13. Интерференция звуковых волн, исходящих от двух разделенных источников, излучающих монохроматические звуковые волны противоположной полярности.

На рис. 14 показано, каким образом происходит конструктивная (слева) и деструктивная (справа) интерференция двух волн  $A$  и  $B$ . В первом случае получается волна с большим гребнем и более глубокой впадиной, во втором случае — с меньшим гребнем и неглубокой впадиной. Если во втором случае обе волны находятся точно в противофазе и имеют строго равные амплитуды, происходит полное гашение волн во всей области. На рис. 13 амплитуды обеих волн в области вдоль горизонтальной линии, проходящей посередине между источниками звука, одинаковы, поэтому здесь и происходит полное гашение волн. Вдоль боковых темных линий полного гашения не происходит, поскольку они расположены не строго одинаково по отно-

шению к каждому источнику, а поэтому приходящие сюда от них сигналы оказываются разной силы.

Тот факт, что эффекты гашения волн всегда возникают на интервалах, кратных длинам волн, позволяет нам использовать интерференционные эффекты для получения картины волнового движения. Обычно для этого электрический сигнал складывается с сигналом, полученным от микрофона. Оба сигнала практически одинаковы.

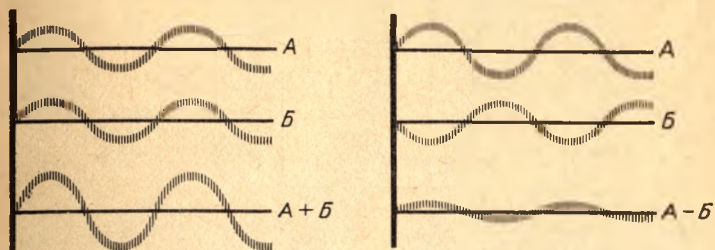
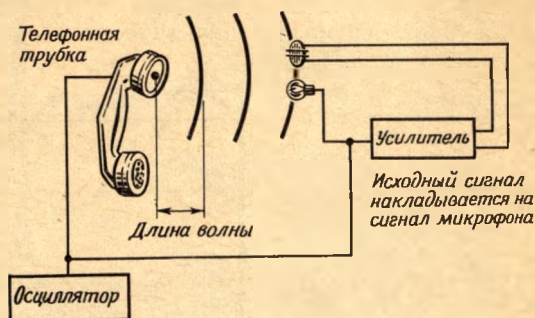


Рис. 14. Амплитуды двух волн одинаковой длины складываются, если имеют одну и ту же фазу (слева), и вычитаются, если их фазы противоположны (справа).

На рис. 15 показано, как сигнал, генерированный электрическим осциллятором, складывается с усиленным сигналом от микрофона. Этот комбинированный сигнал, воздействуя на неоновую лампочку, заставляет ее светиться. Исследуемое нами поле создается звуком, исходящим из телефонной трубки, которая испускает монохроматические волны, полученные ею от осциллятора. Эти монохроматические звуковые волны, подобные волнам на поверхности воды, порождают движущуюся картину круговых волн с центром в приемной части телефонной трубки.

На рис. 15 волновые гребни представлены черными дугами, между которыми находятся впадины волн. Микрофон вы видите на правой крайней дуге (на гребне); предполагается, что в этот же момент сюда приходит гребень волнового сигнала осциллятора. Поскольку электрические сигналы на выходе двух источников (микрофона и осциллятора) складываются, электрические всплески возрастают. Когда же место всплесков одновременно от двух источников занимают впадины, они становятся более глубокими (как слева на рис. 14). В этом случае происходит конструк-

тивная интерференция и неоновая лампочка горит ярко. Если же микрофон поместить посередине между гребнями (на рисунке между черными дугами), куда приходят сигналы противоположной полярности, то комбинированный сигнал будет слабым, а неоновая лампочка соответственно либо будет едва гореть, либо погаснет.

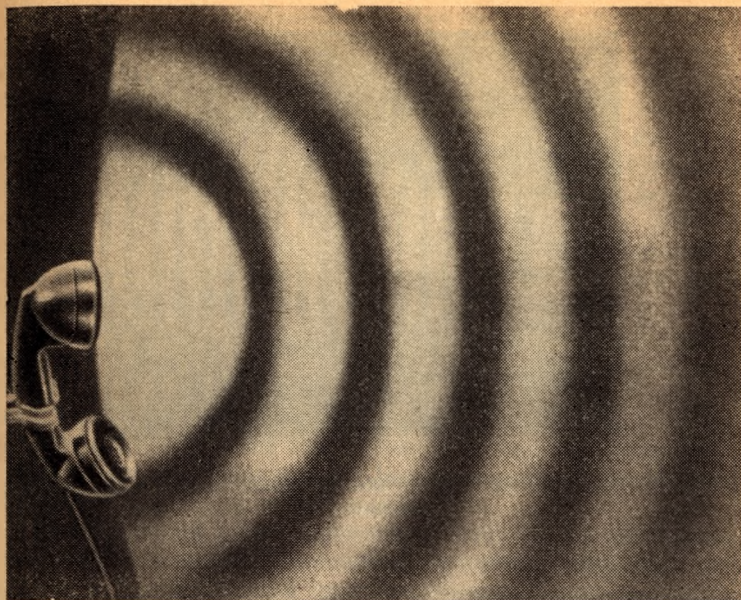


Р и с. 15. Устройство для изучения картины звуковых волн.

Комбинируя сигнал микрофона с сигналом осциллятора, в зависимости от положения микрофона относительно источника звука можно получать либо сложение, либо вычитание волн.

Особенно сильных интерференционных эффектов удастся достигнуть в тех случаях, когда на выходе двух источников получают почти тождественные сигналы. Тогда волновая картина перед той же телефонной трубкой будет выглядеть, как система чередующихся светлых и темных дуг (темные дуги те же, что и на рис. 15). Светлые области соответствуют очень слабому комбинированному сигналу (гашение волн), темные — сильному сигналу (усиление волн). Неоновая лампочка, будучи помещенной в области темных дуг, будет гореть ярким светом. В тех точках пространства, которые отстоят от приемной части телефонной трубки на расстояние, равное целому числу длин волн, сигналы будут складываться, так что помещенная в этой области неоновая лампочка будет светить ярко. В тех точках, которые отстоят от приемной части телефонной трубки на расстояние, равное нечетному числу полувольт, сигналы будут вычитаться и свет неоновой лампочки будет тусклым.

Когда система микрофон — неоновая лампа движется от источника звука, световая картина соответствует поло-

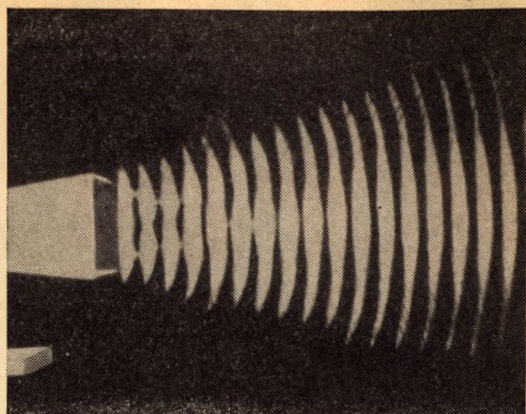


Р и с. 16. Картина фронтов звуковых волн, испущенных телефонной трубкой.

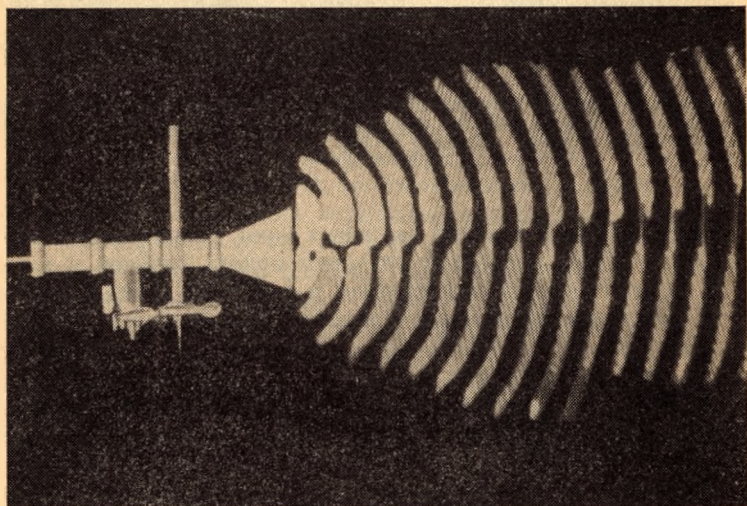
Получена с помощью устройства, представленного на рис. 15. Телефонная трубка излучает волны частотой 4000 Гц. Она не обладает ориентирующей способностью, поэтому звуковые волны расходятся от трубки во всех направлениях.

жению впадин и гребней звуковых волн, исходящих от источника звука, поскольку световая модель гребней и впадин, прослеженных микрофоном и неоновой лампой, остается фиксированной в пространстве. Поэтому куда бы мы ни двигали систему микрофон — неоновая лампа в звуковом поле, вверх — вниз или из стороны в сторону, мы всегда будем получать одну и ту же световую модель этого поля. Такая модель звукового поля, порожденного приемной частью телефонной трубки, представлена на рис. 16.

Вы видите, что волны расходятся от приемной части телефонной трубки кругами. Сходство этой картины с картиной волн на поверхности воды вполне очевидно. Телефонная трубка испускает однотонный звук с частотой 4000 Гц. Так как размеры приемной части телефонной трубки по сравнению с длиной порожденной ею звуковой



Р и с. 17. Профиль фронтов пучка звуковых волн, изображенного на рис. 11.



Р и с. 18. Профиль волновых фронтов звукового поля, представленного на рис. 12.

Полярности волн верхнего и нижнего пучков противоположны: темные вертикальные полосы верхнего пучка лежат против светлых вертикальных полос нижнего.

волны малы, то телефонная трубка не обладает ориентирующей способностью подобно рупору (рис. 11), а потому звуковые волны расходятся от нее кругами во всех направлениях.

На рис. 17 показана картина волнового фронта звукового поля, представленного на рис. 11, которая получена с помощью описанного выше устройства. Кривизна фронтов волн, как это видно на фотографии, очень мала. Малая ширина дуг (дуга — фронт волны) на концах говорит о том, что интенсивность испущенного рупором звука в этих местах чрезвычайно мала.

На рис. 18 представлен волновой фронт картины звукового поля, изображенного на рис. 12. Здесь отчетливо видно, особенно вдоль центральной линии, что верхний и нижний источники генерируют волны в противофазе; белые полосы верхнего пучка лежат как раз напротив черных полос нижнего. Иными словами, гребень волны верхнего луча налагается на впадину волны нижнего.

В следующей главе описанный здесь метод исследования картин распространяющихся звуковых волн мы используем для получения многочисленных картин звуковых полей различных типов. Следует заметить, что такое визуальное представление позволяет отчетливее понять некоторые дифракционные и рефракционные звуковые процессы.

## Некоторые волновые картины

В этой главе мы рассмотрим отдельные картины звуковых полей, которые помогут нам глубже проникнуть в такие волновые явления, как интерференция, дифракция и рефракция.

На основе интерференционных и дифракционных явлений возникла новая интересная область оптики — голография, позволившая нам получать удивительные объемные фотографии. А совсем недавно появилась акустическая голография, с помощью которой мы можем восстанавливать видимую картину звуковых волн. (Об этом поговорим в главе VII.)

Дифракционные эффекты возникают всякий раз, когда волны встречают на своем пути непрозрачные<sup>1</sup> предметы. Для определенных ситуаций волновая теория предсказывает довольно необычные явления. Некоторые из этих предсказаний трудно принять даже с помощью теории дифракции.

Одно из таких явлений состоит в следующем. Если на пути солнечных лучей поместить непрозрачный диск, то на экране в центре тени, отбрасываемой диском, появляется светлое пятнышко. Тени в солнечный день — явление обычное, но трудно поверить, что в центре каждой тени интенсивность, или яркость, солнечного света такая же, как если бы совершенно не было отбрасывающего ее предмета. Этот эффект для световых волн продемонстрировать очень трудно, даже если взять экран величиной с монету, поскольку длина световых волн весьма мала. В свое время

<sup>1</sup> По отношению к звуковым волнам непрозрачность предмета следует понимать в том же смысле, как и непрозрачность для световых волн; это значит, что звуковые волны через предмет не проходят. — *Прим. перев.*

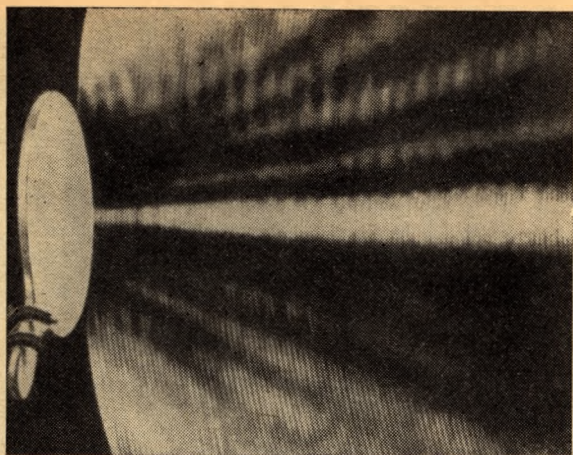


Рис. 19. Профиль распределения амплитуд звуковых волн за диском, в области «тени».

Отчетливо виден ярко выраженный центральный лепесток.

Рэлей описал методы такого рода наблюдений для высокочастотных звуковых волн, которые проводились с помощью звукового детектора (чувствительного пламени газа или слуховой резиновой трубки). По поводу дифракционной картины от диска Рэлей писал: «...хотя она и не ограничена математической точкой на оси, но имеет небольшие размеры», — и далее: «Непосредственно вблизи центрального пятна имеется кольцо почти полного молчания, а за ним снова наблюдается некоторое усиление эффекта»<sup>1</sup>.

Картина звукового поля, существующего в области тени, отбрасываемой непрозрачным диском, показана на рис. 19. Она получена с помощью описанной в предыдущей главе установки. На фотографии отчетливо видно светлое пятно, но ответа на вопрос, почему оно возникло, мы не получаем.

Дополнительная информация, содержащаяся в видимой картине движения волн в области тени, помогает нам более глубоко проникнуть в сущность рассматриваемого явления. Картина распространения звуковых волн, прошедших возле края непрозрачного тела, в области тени показана

<sup>1</sup> Д. Рэлей, Теория звука, т. II, М.—Л., 1944, стр. 147.

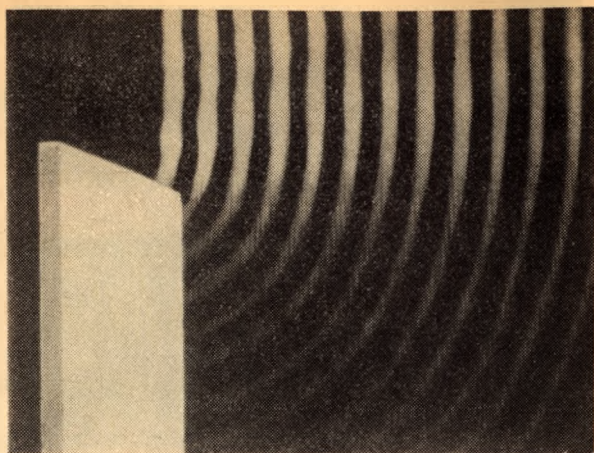
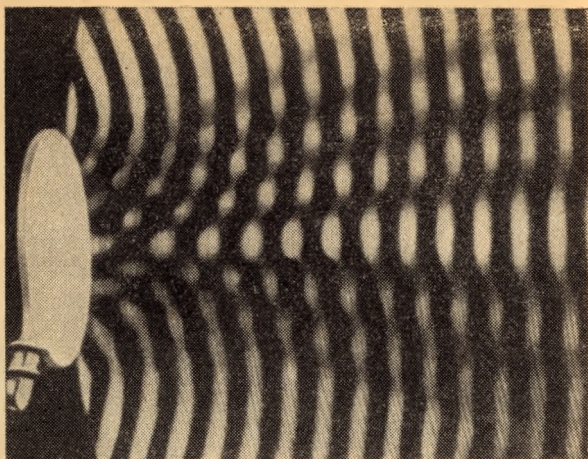


Рис. 20. Диффракция звуковых волн на ребре прямоугольного бруска.

Поступающие слева плоские звуковые волны в верхней части не претерпевают никаких искажений. Ниже, в теневой области, слабо видны круговые фронты, вызванные дифракцией волн на краю предмета, создающего «тень».

на рис. 20. Край бруска служит как бы источником волн. Фронт волн, отклоненных им в область акустической тени, имеет цилиндрическую форму. Выше бруска, как это видно на фотографии, плоские звуковые волны проходят беспрепятственно (система белых вертикальных параллельных полос). Интенсивность же цилиндрических волн намного слабее. Общая ось фронтов этих волн находится на краю бруска.

На рис. 21 показана волновая картина звука позади непрозрачного диска. Как и на рис. 20, здесь отчетливо видны круговые фронты волн, испущенных верхней и нижней частями диска. Верхняя и нижняя части диска являются как бы новыми источниками звука — они порождают два набора волн, которые интерферируют между собой в области тени. В действительности же роль источника звука играет каждая точка по краю диска, а поскольку все эти точки находятся на одинаковом расстоянии от центральной оси, то становится понятным, почему в этой области происходит концентрация энергии и почему в области тени на рис. 19 образуется белое пятно. Светлый централь-



Р и с. 21. Картина звукового поля позади непрозрачного диска. Звуковые волны, дифрагировавшие на диске, комбинируются друг с другом, создают в области тени интерференционную картину. Центральный пучок (центральный лепесток на рис. 19) на этом рисунке представляет собой систему параллельных волновых фронтов.

ный конус окружен «кольцом тишины» (две темные полосы, примыкающие сверху и снизу к конусу), которое в свою очередь окружено светлой областью, где снова сосредоточена звуковая энергия. Такое чередование повторяется несколько раз. В процессе сканирования мы можем обнаружить лишь верхнюю и нижнюю части следующего конического объема (вторые светлые области на фотографии). Однако из круговой симметрии нетрудно заключить, что существует полный кольцевой конический объем, где сосредоточена энергия звуковых волн. Фазы этих волн противоположны фазам волн в центральной зоне. Действительно, гребни волн (белые области) ближайшего к центральному лучу пучка лежат как раз напротив впадин (черные области) центрального луча.

Но чтобы перейти от области положительных к области отрицательных фаз, мы, естественно, должны пройти область нулевой фазы. На рис. 21 эта область изображена двумя темными полосами, непосредственно примыкающими к центральному светлomu конусу. Этот «конус тишины» соответствует рэлеевскому «кольцу тишины», окружающему

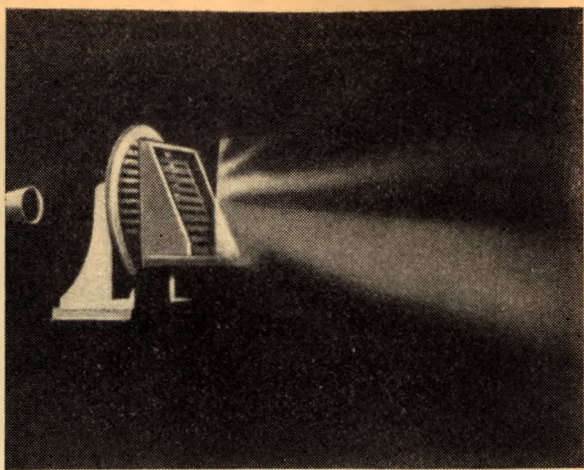
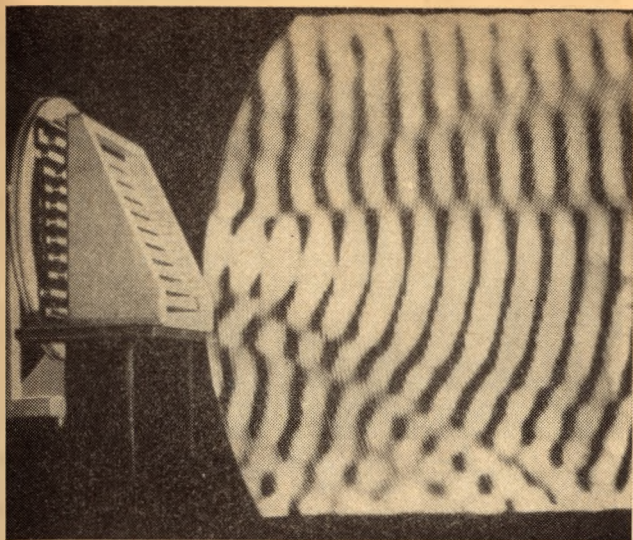


Рис. 22. Отклонение сфокусированного акустической линзой луча звуковых волн с помощью акустической призмы.

щему светлое центральное пятнышко. В областях отрицательных фаз снова наблюдается усиление звука.

Метод визуализации позволяет глубже понять и преломление (*рефракцию*) волн. Простейшие виды преломления волн мы наблюдаем в оптике при прохождении пучка света через стеклянную призму. Параллельные фронты волн, движущихся в одном направлении, после выхода из призмы меняют направление своего распространения. Поскольку скорость света в стекле меньше, чем в воздухе, то световые волны, прошедшие через широкие участки призмы, отстают от волн, прошедших через ее более узкие участки. Для объяснения процесса преломления света часто прибегают к сравнению его с шеренгой марширующих солдат: если на одном конце шеренги солдаты идут более медленно, чем на другом, то они неминуемо отстанут.

На рис. 22 показано отклонение звуковых волн акустической призмой. Эта призма сделана из отстоящих друг от друга металлических полос, которые уменьшают скорость проходящего сквозь нее звука. Источником звука является маленький рупор, который виден слева. Акустическая линза, изготовленная тоже из металлических полос, концентрирует звук, подобно тому как оптическая линза концентрирует свет. Без нее пучок звуковых волн был бы горизонт-



Р и с. 23. Фронты отклоненных звуковых волн, представленных на рис. 22.

тальным. Призма же отклоняет горизонтальный звуковой пучок вниз. Фронты звуковых волн, выходящих из призмы, отчетливо показывают, как пучок меняет направление своего движения (рис. 23).

Преломляющие свойства призмы можно использовать для объяснения того, как линза фокусирует волны. Фокусировка волн по существу представляет собой тот же процесс преломления, поскольку линза, меняя скорость волн, изменяет направление волнового фронта. На рис. 24 показаны сферические звуковые волны, исходящие из рупора. Проходя через линзу (она лучше видна на рис. 22), звуковые волны меняют свое направление и выпуклость фронта волн: до линзы выпуклость фронта волн обращена вправо, после линзы — влево. Линза имеет выпуклую с обеих сторон форму, а потому верхнюю ее половину в поперечном сечении можно рассматривать как призму (типа призмы, показанной на рис. 23), отклоняющую падающий на нее пучок волн вниз, а нижнюю — как призму, отклоняющую пучок волн вверх. Эффекты преломления волн отчетливо видны на рис. 24: расходящиеся от источника сферические

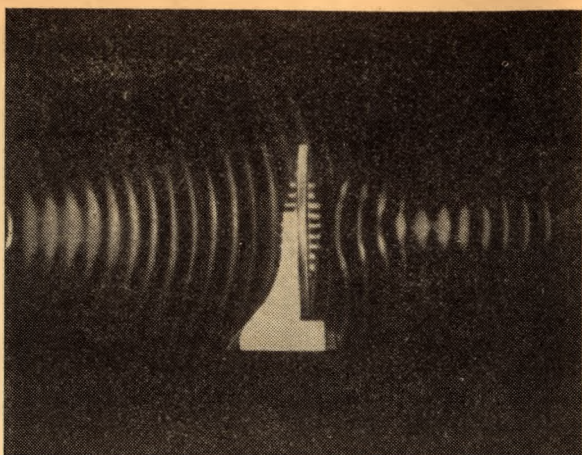


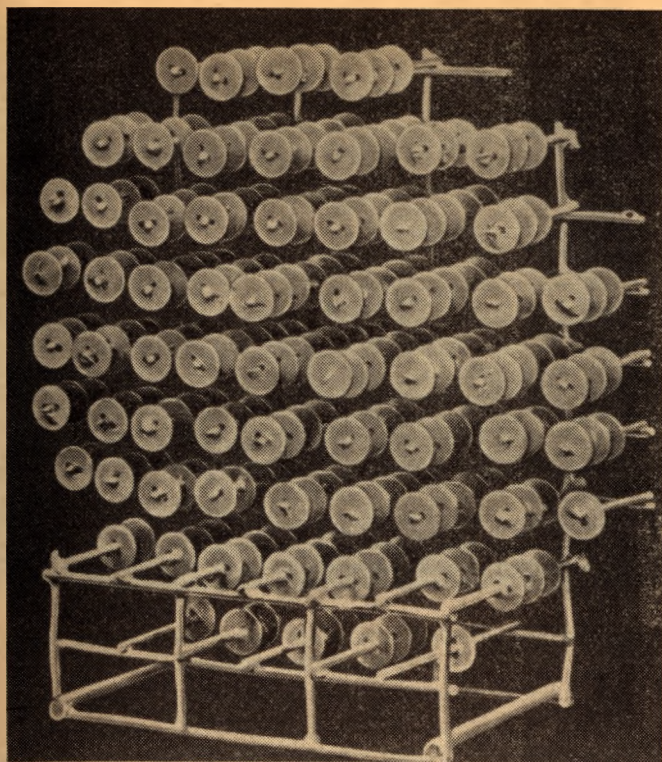
Рис. 24. Картина прохождения сферических звуковых волн через акустическую линзу.

Выпуклая поверхность акустической линзы, в которой фазовая скорость<sup>1</sup> меньше, чем в свободном пространстве, вызывает отставание фаз звуковых волн, приводящее к их отклонению и фокусировке.

звуковые волны после преломления в линзе стали сходящимися, что и привело к концентрации звуковой энергии в фокусе линзы. На волны, которые проходят выше линзы, она не оказывает действия, поэтому эти волны направления своего движения не меняют.

Преломляющие свойства акустических линз и призм, изготовленных из металлических полос, основаны на задерживающем действии их элементов, которые уменьшают скорость волн. Аналогичное уменьшение скорости вызывает решетка дисков. Акустическая линза такого типа изображена на рис. 25. Она имеет выпуклость, а потому концентрирует звуковые волны в фокусе (рис. 26). Для

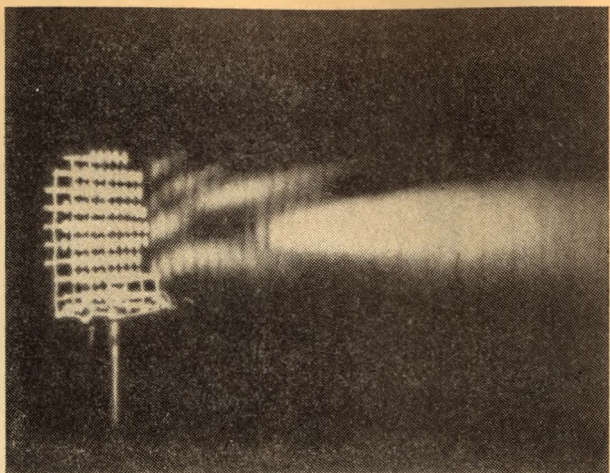
<sup>1</sup> Фазовой скоростью называется скорость распространения фронта волны (поверхности равных фаз). Кроме того, существует понятие групповой скорости, введенное Ралеем для случая распространения непохроматической волны в такой среде, где скорость распространения составляющих волны зависит от их частот (дисперсия волн). Для среды, в которой волны любой частоты распространяются с одинаковой скоростью, значения групповой и фазовой скоростей совпадают.— *Прим. ред.*



Р и с. 25. Устройство из набора рядов дисков, имеющее общую выпуклую поверхность, которое может действовать как акустическая линза.

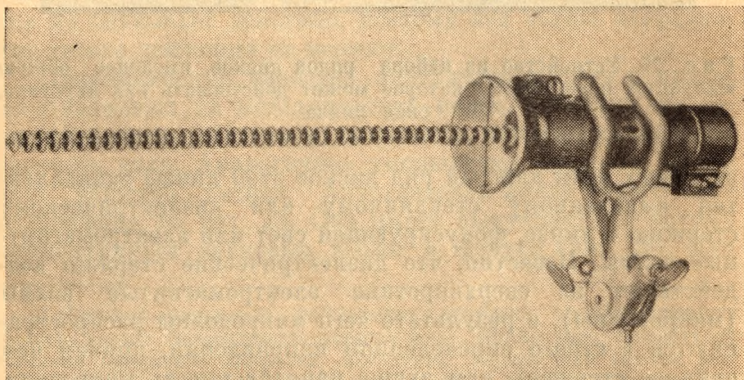
звуковых волн каждый ряд дисков этой линзы эквивалентен выделенному стеклянному или диэлектрическому стержню в линзе, фокусирующей свет или электромагнитные волны. Известно, что диэлектрические стержни воздействуют на сверхкороткие электромагнитные волны (микроволны), в результате чего микроволны распространяются в строго определенном направлении, причем чем длиннее стержень, тем лучше направленность микроволн. Существует теория, согласно которой человеческий глаз аналогичным образом воспринимает падающий свет.

Подобным образом воздействует на звуковые волны акустическая линза, составленная из дисковых «стержней»



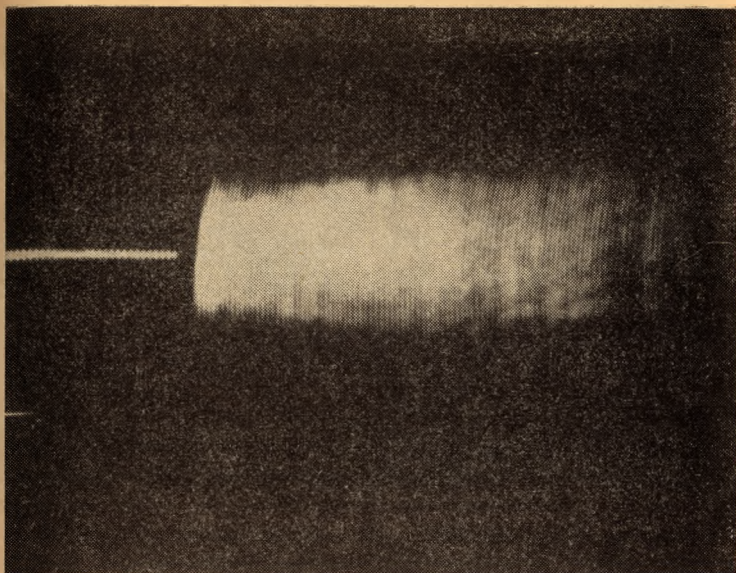
Р и с. 26. Картина прохождения звуковых волн через устройство, изображенное на рис. 25.

Падающие слева звуковые волны после прохождения через системы линз фокусируются (светлая полоса).

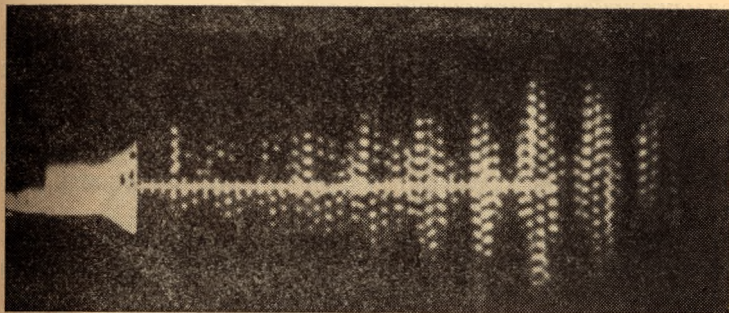


Р и с. 27. Стержень, составленный из набора дисков (один из рядов системы, представленной на рис. 25).

Вставленный в маленький рупор, он действует как направленный излучатель звуковых волн, причем пучок волн исходит с конца излучателя.



Р и с. 28. Картина звуковых волн, коллимированных излучателем, изображенным на рис. 27.



Р и с. 29. Картина фронтов звуковых волн, распространяющихся вдоль стержня.

Набор дисков уменьшает фазовую скорость волн, движущихся вблизи дисков, в результате чего сферические звуковые волны превращаются в плоские. Такой стержень обеспечивает направленность излучения волн, исходящих из рупора с большой апертурой. Если убрать стержень, то получится картина звуковых волн, расходящихся кругами.

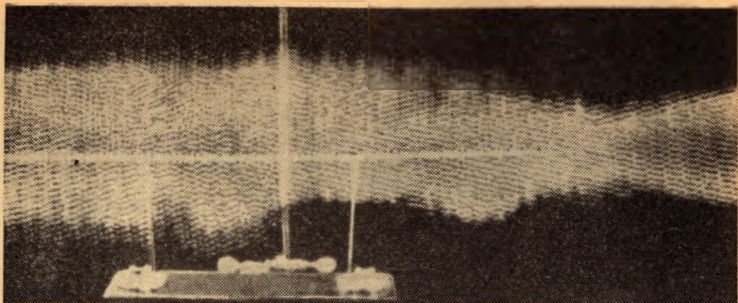
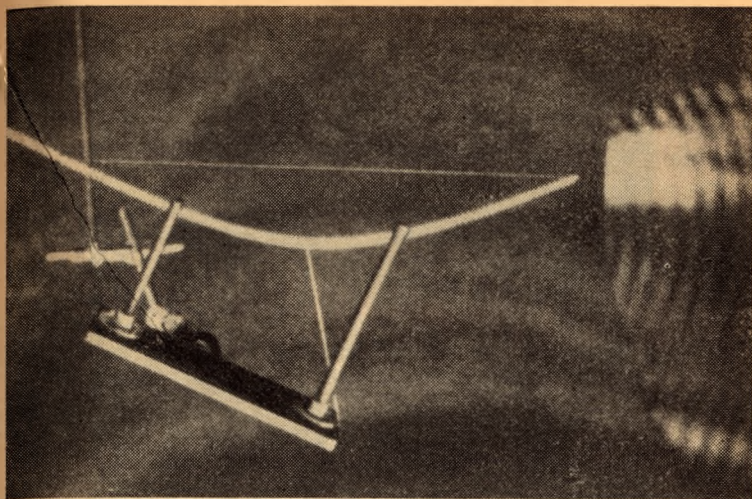


Рис. 30. Амплитудная картина звуковых волн вблизи длинного стержня, составленного из дисков.

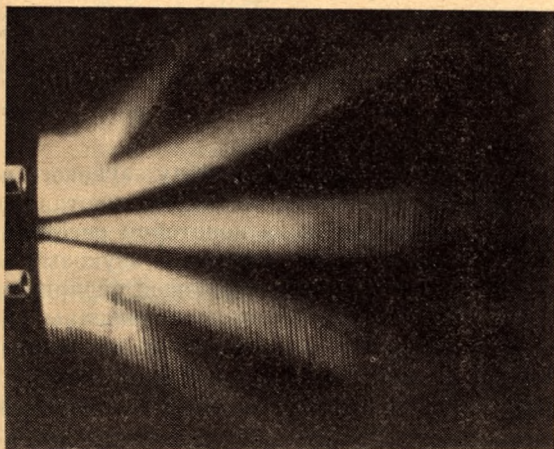
(рис. 25). Такой дисковый стержень, помещенный в раструбе рупора радиатора (рис. 27), формирует направленный пучок звуковых волн, исходящих из конца стержня (рис. 28). Как и почему это происходит, показано на рис. 29. Если убрать стержень, то исходящие из рупора звуковые волны будут иметь круговой фронт и малую направленность (рис. 24). Скорость волн в окрестности дискового стержня, как и в случае с линзой, представленной на рис. 25, уменьшается, в связи с чем фронты волн становятся скорее плоскими, нежели искривленными. Вся звуковая энергия оказывается сконцентрированной в горизонтальном направлении.

На рис. 30 показан профиль распределения амплитуд волн в окрестности длинного дискового стержня, далеко выходящего из рупора. Из фотографии видно, что слева созданы однородные условия для распространения волн, справа же из-за отражения на конце стержня возникают неоднородности, которые и нарушают равномерность распределения энергии в пучке волн.

Если дисковый стержень согнуть в дугу, как это показано на рис. 31, то все равно большая часть энергии будет сосредоточена в окрестности «волновода» (стержня), срываясь затем с его конца (светлая область справа). Белая полоска, которая видна в правом нижнем углу, свидетельствует о том, что часть звуковой энергии распространяется вдоль линии, являющейся продолжением прямолинейного участка стержня в его начальной части (на фотографии — слева).

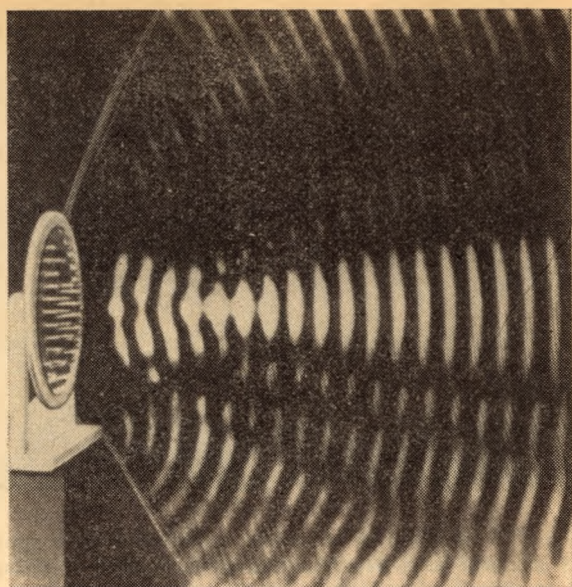


Р и с. 31 Изогнутый стержень, составленный из дисков.  
Большая часть звуковой энергии излучается с конца.



Р и с. 32. Интерференция звуковых волн, исходящих от двух  
синфазных источников.

Два разделенных источника звука действуют как две оптические щели, порождая дифракционный профиль, обусловленный конструктивной и деструктивной интерференцией волн.



Р и с. 33. Фотография фаз фронтов звуковых волн.

Высокоинтенсивные звуковые волны, пройдя сквозь линзу, образовали сложную волновую картину, на которой, кроме главного максимума (центральная радиальная полоса), отчетливо представлены боковые максимумы. Из фотографии видно, что фазы первых боковых максимумов противоположны фазам центрального максимума.

На рис. 13 мы уже видели картину звукового поля, порожденного двумя источниками звука противоположной полярности, находящимися на некотором расстоянии друг от друга. Интерференционная картина звуковых волн, исходящих от двух источников одинаковой полярности, показана на рис. 32. Светлый пучок, расположенный вдоль горизонтальной линии посередине между источниками звука, указывает на то, что в этом месте произошла не деструктивная (как на рис. 13), а конструктивная интерференция.

Кроме основного светлого пучка, на рис. 32 отчетливо видны еще два светлых пучка по обе стороны от средней горизонтальной линии. Эти три светлые полосы принято называть *лепестками*: центральную — *большим лепестком* (главный максимум), а боковые — *малыми*. На волновой

картине в области тени, отбрасываемой диском, тоже видны лепестки. Главный лепесток отчетливо представлен на рис. 19. Малые лепестки видны на рис. 21; это ближайшие к центральной оси боковые светлые пучки, фазы волн в которых противоположны, как мы уже указывали, фазам волн центрального пучка. Такое соотношение фаз — светлые вертикальные полосы первого светлого бокового пучка лежат напротив темных вертикальных полос центрального светлого пучка — типично для лепестков. Фазы ле-

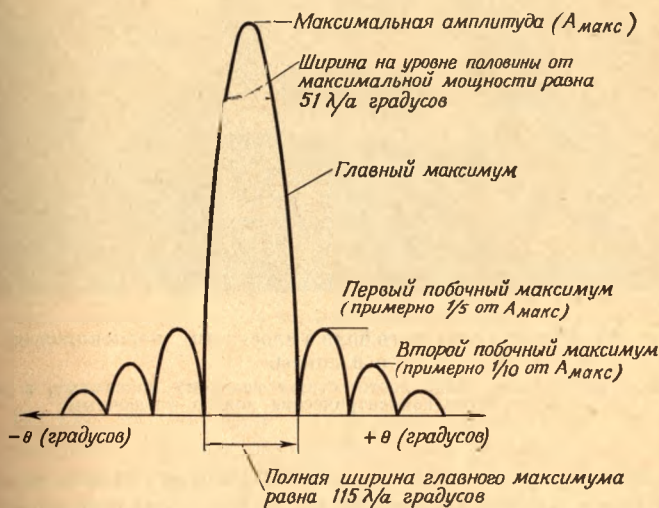
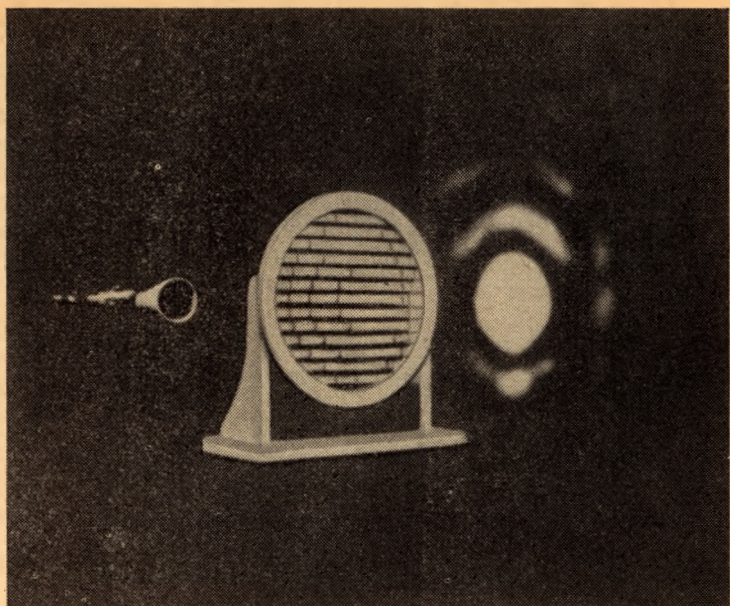


Рис. 34. Дифракционная картина распределения звукового поля за щелью.

Хотя щель «освещалась» удаленным звуковым источником и распределение энергии по ее ширине было однородным, картина звуковых волн за щелью получилась неоднородной.

пестков, следующих друг за другом, взаимно противоположны: фаза центрального лепестка обычно считается положительной, следующих непосредственно за ним лепестков — отрицательной, вторых малых лепестков — положительной и т. д.

На рис. 33 показана волновая картина, образованная той же линзой, с помощью которой мы получали ампли-

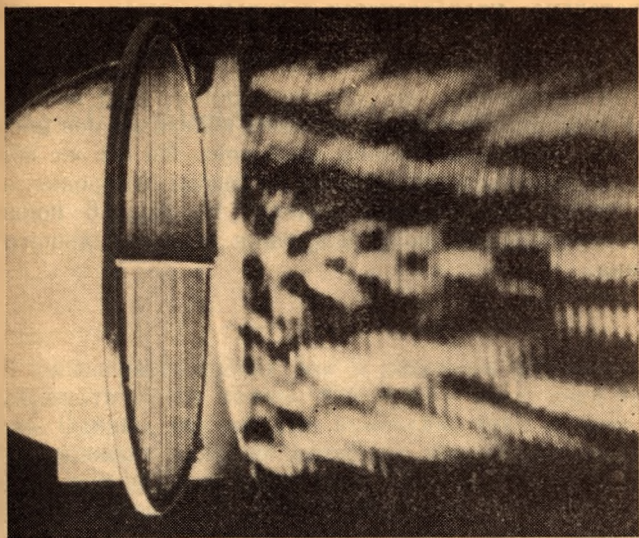


Р и с. 35. Картина звукового поля в плоскости, перпендикулярной оси линзы.

Светлое центральное пятно соответствует главному максимуму, а окружающие пятно concentric rings — побочным.

тудную картину волн на рис. 10. Однако эта запись намного богаче записей на рис. 10 и 24. Чтобы малые лепестки (боковые максимумы) были выделены гораздо отчетливей, мы использовали усиленные звуковые сигналы. Фазы первых боковых лепестков противоположны фазам главного лепестка. Это видно из совпадения светлых вертикальных линий первых боковых лепестков и темных вертикальных линий главного лепестка (рис. 33). Фазы вторых боковых лепестков совпадают с фазами главного лепестка.

Теоретическая кривая распределения поля излучения волн, исходящих из квадратного отверстия (апертуры), дана на рис. 34. Заметим, что в поперечном сечении, совпадающем с плоскостью апертуры, поле волн как по амплитудам, так и по фазам (плоские фронты волн) было однородным.



Р и с. 36. Амплитудная картина звуковых волн вблизи рупора. В апертуру рупора шириной около тридцати длин волн вставлена линза. Звуковой пучок волн остается коллимированным на некотором расстоянии от рупора.

На рис. 34 показано двумерное поперечное сечение трехмерной картины звукового поля, порожденного линзой. В действительности максимумы, созданные акустической линзой (рис. 33), являются кольцевыми. Это можно показать, если производить сканирование поля не в плоскости, в которой лежит ось линзы, как это показано на рис. 33, а в перпендикулярной ей плоскости. Полученная путем такого сканирования картина звуковых волн видна на рис. 35. Главный максимум на этом рисунке — центральное светлое пятно, похожее на торец карандаша. Незамкнутое кольцо вокруг пятна показывает структуру первого бокового максимума. Здесь же видны и другие светлые незамкнутые кольца, относящиеся к следующим боковым максимумам. Из-за деструктивной интерференции между светлыми кольцами имеются темные кольца — «кольца тишины».

Визуальная картина волн, выходящих из апертуры, помогает нам проследить, как звуковое поле в апертуре пос-

ледовательно преобразуется в дальнейшее поле излучения волн.

На рис. 34 мы уже видели картину распределения энергии излучения за щелью (поперечник квадрата). Вдоль всей ширины щели, а также вблизи от нее энергия звукового поля практически одинакова. Но все же вблизи от щели распределение энергии не совсем однородно, а потому также представляет интерес. На рис. 36 показано такое неоднородное поле излучения вблизи большого источника.

## Визуализация структуры звука

В предыдущих главах мы в основном рассматривали монохроматические волны. Структура этих волн весьма проста. Однако, как мы уже отмечали, звук может быть очень сложным, если он содержит множество гармоник (рис. 4) или подобен шуму (рис. 5), кроме того, он может быстро меняться во времени. Визуальное представление этих свойств звука открывает большие возможности для исследователя.

До сих пор мы разбирали лишь *пространственные картины* звука, а в настоящей главе рассмотрим, как можно получить визуальное представление его *структуры*. Такое представление позволит исследовать тональную сложность звука и его изменение во времени. Следует заметить, что представление, которое мы использовали в главе I, вполне удовлетворительно описывает звуки, не меняющиеся во времени (например, звук органной трубы). Нажав клавишу органа, вы услышите однотонное звучание, которое будет оставаться неизменным до тех пор, пока вы не отпустите клавишу. Свойства такого звука легко изобразить на графике, по одной оси отложив частоту, а по другой — громкость (см. главу I).

Однако большинство звуков изменяется во времени. Например, у фортепьяно после нажатия клавиши звук быстро затухает, а поскольку одни гармоники гаснут скорее других, то меняется и окраска самого звучания. Аналогичным образом, меняя положение скользящей кулисы тромбона, музыкант изменяет частоту его звука. Быстро меняются во времени и звуки речи. Частота гласного звука может изменяться даже за время, в течение которого этот звук произносится. Кроме того, звуки речи сравнительно быстро меняются от гласных звуков к согласным.

Чтобы представить эти динамические вариации звуков от их зарождения до затухания, нужно было бы провести множество анализов, подобных тем, которые мы рассматривали в начале книги. Поэтому необходима такая форма визуализации звукового поля, которая могла бы показать нам изменение качества звука и его частоты в тех случаях, когда это изменение происходит. Наиболее эффективный способ такой записи разработан Р. Поттером. Прибор для анализа звука получил название *звукового спектрографа*, а записи речи, которые он воссоздает, — *визуализированными спектрограммами речи*. Основная цель этих исследований состояла в разработке методики визуального анализа звуков речи, анализа, который помогает глубже понять природу звуков речи и разрешить проблему их передачи по телефону. Разработанная Поттером методика записи позднее успешно использовалась и в других областях. В настоящее время с помощью звукового спектрографа записываются картины подводных звуков, звука самолета, корреляции звуков и даже звуковые оттенки, свойственные голосу человека.

Для графического представления звука Поттер использовал частотную и временную координаты: по горизонтальной оси откладывается время, по вертикальной — частота. В таких координатах многочисленные гармоники, которые на рис. 4 были представлены вертикальными линиями, изображаются горизонтальными линиями. Громкость или интенсивность каждой частотной компоненты соответствует интенсивности затемнения линии.

На рис. 37 дана схема анализатора звука, предложенного Поттером. Звук, который мы хотим исследовать и представить в виде спектрограммы, сначала записывается на магнитном барабане (аналог магнитной ленты, используемой в обычном магнитофоне). Затем, вращая непрерывно барабан, с него снимают записанный сигнал, анализ которого производится, и многократно пропускают через фильтр переменной частоты. После каждого поворота барабана (за это время сигнал успевает пройти через фильтр) частотная полоса пропускания фильтра меняется и устанавливается нужная область частот. Выходящий из фильтра сигнал усиливается и затем воздействует на стальную иглу, которая касается электрочувствительной бумаги, обмотанной вокруг второго барабана, синхронно вращающегося с первым. За время каждого поворота стальная игла

рисует на бумаге линию переменной черноты, которая соответствует меняющейся узкочастотной амплитуде сигнала, прошедшего через фильтр. Если мы устанавливаем, например, более высокую частоту фильтра, то синхронно с этим меняет свое положение и стальная игла. Под воздействием сильного сигнала, прошедшего сквозь фильтр, стальная игла оставляет на бумаге темный след, а под воздействием слабого — светлый или вообще не оставляет никакого следа.

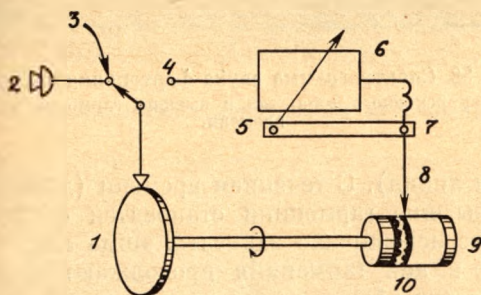
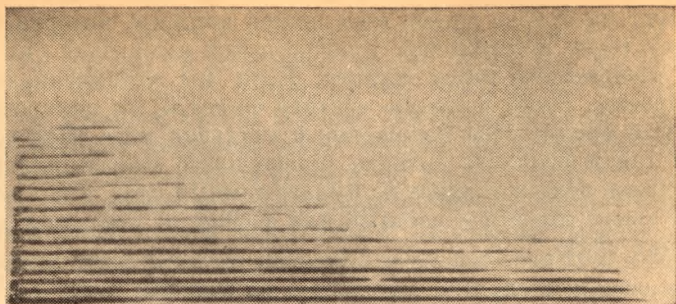


Рис. 37. Анализатор звука.

1 — барабан с магнитной лентой; 2 — микрофон; 3 — магнитная запись; 4 — запись спектрограммы; 5 — блок записи и воспроизведения; 6 — переменный фильтр; 7 — механический шарнир; 8 — стальная игла, которая записывает на электрочувствительной бумаге сигналы, прошедшие фильтр; 9 — электрочувствительная бумага; 10 — звуковая спектрограмма.

Таким образом, спектрограф позволяет производить полный анализ звука, делая зарисовки амплитудной и частотной картин звукового поля. Подобно тому как с помощью светового переменного фильтра можно узнать цвета составляющих исследуемого света, так и с помощью электронного фильтра переменной частоты мы определяем частоты, представленные в спектре исследуемого звука. Причем одновременно с частотной картиной мы получаем и картину изменения силы сигнала во времени для каждой частотной составляющей.

На рис. 38 дана спектрограмма звука, меняющегося во времени. Это звук фортепьяно, который мы слышим, нажав на клавишу. В начальный момент после удара по клавише (левая часть спектрограммы) фортепьянная струна генерирует большое количество гармоник. Частота этих гармоник в целое число раз превосходит основную частоту (ниж-

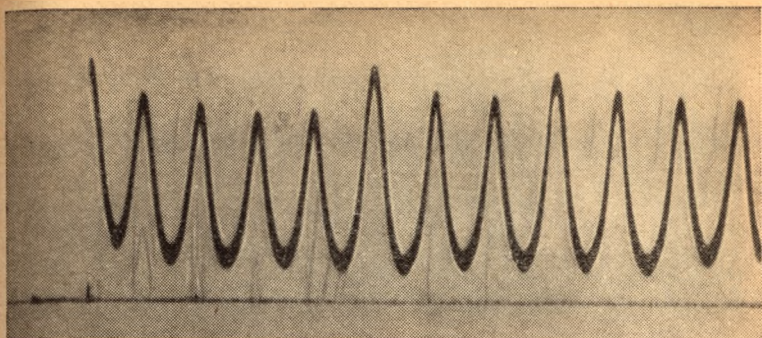


Р и с. 38. Спектрограмма звука фортепьянной струны. Амплитуды как основного тона, так и высших гармоник изменяются во времени.

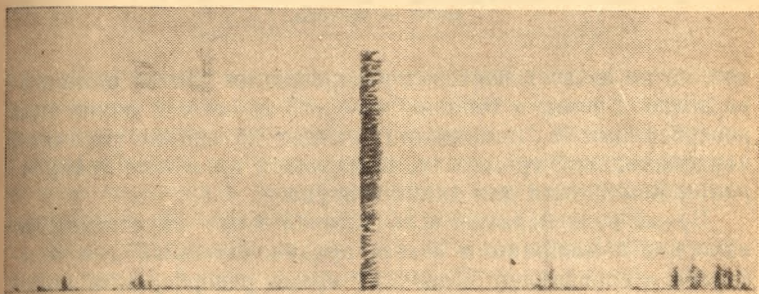
ная темная линия). С течением времени (движение слева направо) высшие гармоники становятся столь слабыми, что их даже невозможно записать, тогда как основная и ближайшие к ней гармоники продолжают еще звучать. Темные участки вблизи левых концов линий свидетельствуют о том, что первоначально все тоны были сравнительно громкими. Но с течением времени звуки затухают и линии из черных становятся серыми, все более и более светлея. На спектрограмме в самом начале записи видна узкая вертикальная полоса, образованная наложением черных и серых областей и простирающаяся практически на весь видимый на спектрограмме интервал частот. Эта область спектрограммы, подобная шуму, соответствует звуку удара молоточка фортепьяно.

Другой пример меняющегося во времени звука показан на рис. 39. Это анализ звука громкоговорителя, соединенного с осциллятором переменной частоты, который имеет постоянную амплитуду и переменную частоту, но не содержит обертонов. Представленное на спектрограмме изменение частоты звука очень похоже на вариации, которые производит с помощью кулисы играющий на тромбоне музыкант.

На следующих спектрограммах записаны звуки, подобные шуму. Звук ружейного выстрела охватывает широкий спектр шума. Если вы стреляете в поле, то длительность возникающего при этом звука будет очень мала. Но если выстрел произведен в помещении, то вследствие реверберации продолжительность звучания намного возрастает.



Р и с. 39. Анализ звука с меняющейся во времени частотой.



Р и с. 40. Анализ звука ружейного выстрела, произведенного в комнате с сильно поглощающими звук стенами.

Поскольку выстрел был произведен в комнате без реверберации, получилась спектрограмма очень малой длительности.

Звук, представленный на рис. 40, похож на произведенный в поле ружейный выстрел холостым патроном. Но на самом деле это звуковая картина выстрела, произведенного из детского ружья в комнате, в которой нет эха, то есть стены комнаты сильно поглощают звук, предотвращая тем самым его отражение. Из спектрограммы видно, что звук имеет очень широкую полосу частот (звуковой сигнал заполняет всю вертикальную ось), но весьма малую продолжительность (мала ширина по оси времени).

На рис. 41 вы видите запись выстрела, сделанного из того же самого ружья, но в обычном помещении. Запись свидетельствует о реверберации звука в течение некоторого времени. Хотя звук и охватывает широкую область час-

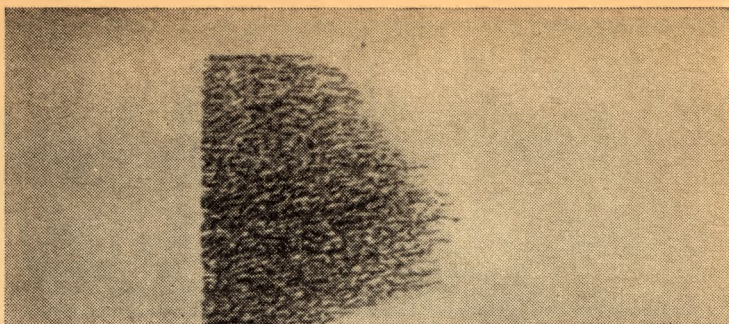


Рис. 41. Анализ звука ружейного выстрела, произведенного в обычном помещении.

Из-за реверберации в помещении продолжительность звучания увеличилась. Как видно из спектрограммы, время реверберации существенно зависит от частоты.

тот, но не на всех частотах реверберация длится одинаково долго. Время, в течение которого громкость звука при реверберации в помещении упадет до одной тысячной первоначальной громкости, называется *временем реверберации* помещения для данного звука.

Время реверберации есть важная мера акустического качества помещений и залов, предназначенных для концертов и спектаклей. Поначалу время реверберации определяли, используя монохроматический звук, и стандартной считалась частота 512 Гц (она приблизительно соответствует ноте до второй октавы). Иногда этот стандарт используется и сейчас; когда говорят «время реверберации», не указывая частоты, имеют в виду, что время реверберации было определено для частоты 512 Гц.

Такое определение времени реверберации в терминах одной частоты было бы совершенно правильным, если бы стены помещения одинаково поглощали звук в области всех интересующих нас частот. Однако на самом деле так не бывает. Например, комната со стенами, покрытыми гипсовой штукатуркой, могла бы иметь для частоты 512 Гц весьма удовлетворительное время реверберации, равное 1,2 с, но для частоты 128 Гц оно равнялось бы 7,2 с, а для частоты 2048 Гц — 0,6 с. Стены такой комнаты очень хорошо поглощали бы высокочастотные звуки речи, но плохо — басовые музыкальные звуки, от которых в комнате стоял бы неприятный гул. На рис. 41 мы видим, что в од-

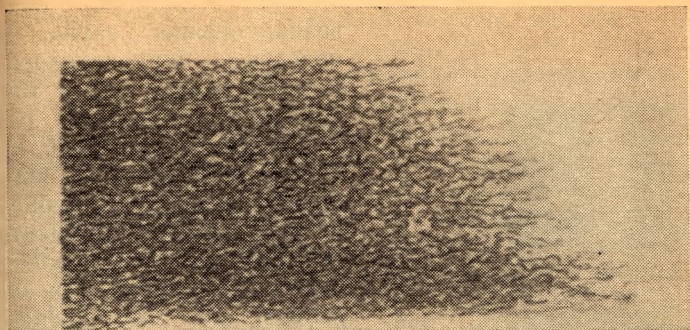


Рис. 42. Анализ звука ружейного выстрела, произведенного в коридоре с очень сильной реверберацией.

них областях частот звуки реверберируют гораздо продолжительнее, чем в других. Следовательно, время реверберации помещения существенно зависит от частоты звука. Таким образом, с помощью звуковой спектрограммы мы можем определить реверберационные характеристики помещения в области всех интересующих нас частот.

Если выстрелить из того же, что и в предыдущих случаях, ружья в сильно реверберирующем коридоре (стены коридора слабо поглощают звук), то звук будет ревербировать очень продолжительное время (рис. 42). Как и на рис. 41, на рис. 42 отчетливо видно, что время реверберации зависит от частоты звука.

Мы уже говорили, что первоначально звуковой спектрограф был предназначен для анализа речи. С его помощью визуализировали важные звуковые характеристики речи. Однако в анализе речи часто важнее знать положение весьма широкополосных областей, а не положение и амплитуды индивидуальных гармоник в узкой полосе частот (узкочастотный анализ). С этой целью в спектроскопии звуков речи используется фильтр, полосу пропускания которого можно расширять или сужать. Широкополосный фильтр подавляет информацию о положении и амплитудах индивидуальных гармоник речи, но зато хорошо обрисовывает широкополосные области, столь важные в анализе речи. По сравнению с узкополосным широкополосный фильтр гораздо быстрее реагирует на внезапные изменения речи, такие, как мгновенное затухание или мгновенное

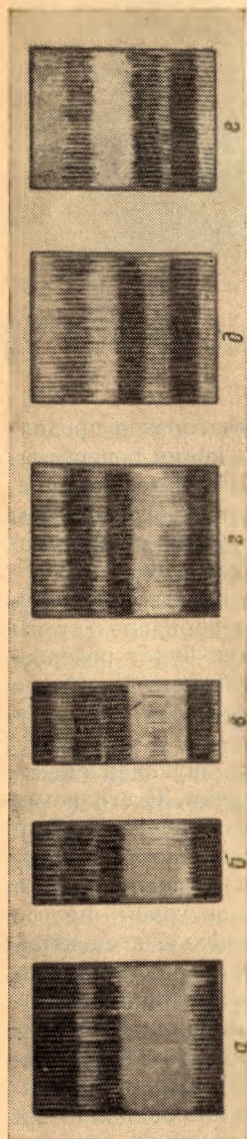


Рис. 43. Спектрограммы произнесенных гласных звуков.  
 а — [a:] в слове *еее*; б — [ɒ] в слове *и*; в — [e] в слове *и*; г — [e] в слове *и*; д — [e] в слове *и*; е — [a:] в слове *и*.

возникновение звука. Используя широкополосный фильтр, можно более точно проследить динамику речи.

На рис. 43 показано, чего можно достигнуть в анализе речи с помощью широкополосного фильтра. На спектрограммах рис. 43 изображены шесть различных гласных звуков. Все они являются звуками человеческого голоса, то есть воспроизведены голосовыми связками человека. Наряду с основной частотой эти звуки содержат многочисленные гармоники.

Анализ с помощью узкополосного фильтра дал бы нам картину гармонической структуры гласных звуков, показав многочисленные индивидуальные гармоники как тоны частот, кратных основной частоте звука, изданного голосовыми связками. Но широкополосный фильтр, который использовался для записи, представленной на рис. 43, не различает индивидуальные гармоники. С его помощью можно изображать в частотной шкале только частотные области громкого звука. Столь сильное звучание происходит из-за резонансных явлений, возникающих в человеческом горле и полости рта. Резонансные свойства этих областей определяются физической структурой горла и рта. Гармоники, которые попадают в области ре-

зональных частот, звучат гораздо сильнее, чем все остальные.

Эти области резонанса называются *формантами*. Анализ речи позволил установить, что именно форманты дают ключ к разгадке произнесенных звуков. Исследуя форманты, можно установить личность человека, поскольку положение формант на частотной шкале для разных людей совершенно различно, даже если они произносят один и тот же звук. Из рис. 43 видно, что форманты различных гласных звуков занимают разные положения на частотной (вертикальной) шкале.

На рис. 43, *а* изображен звук [i:], каким он слышится в слове, *eve*, на рис. 43, *б* и *в* представлены гласные звуки [i] в слове *it* [ei] в слове *hate* и т. д. Различное положение формант на этих спектрограммах очевидно.

Обратите внимание на перемещение двух наименьших по частоте формант при последовательном рассмотрении спектрограмм слева направо. Нижняя из этих двух формант движется вверх по частотной шкале, верхняя — вниз. Исключение составляет лишь последняя спектрограмма (крайняя справа), на которой обе эти форманты сместились вниз. Положение этих формант на частотной шкале — своего рода ключ к идентификации некоторых гласных звуков (в частности, представленных на рис. 43). Далее, поскольку место форманты определяется положением языка и челюстей, то форманта не переместится по частотной шкале, даже если изменится частота гласного звука, определяемая голосовыми связками. Таким образом, широкополосный фильтр подавляет нежелательную информацию о положении индивидуальных гармоник и дает отчетливое представление о положении наиболее важной форманты вне зависимости от высоты тона.

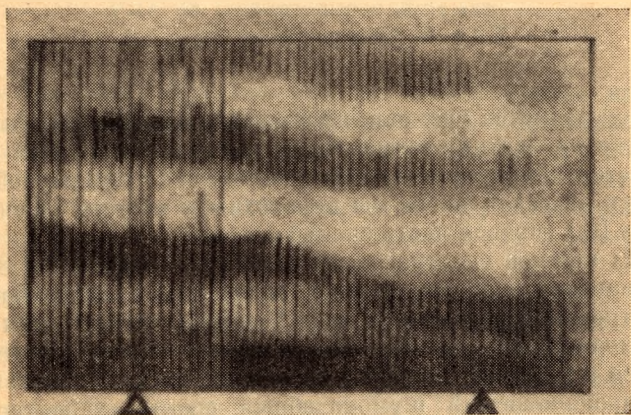
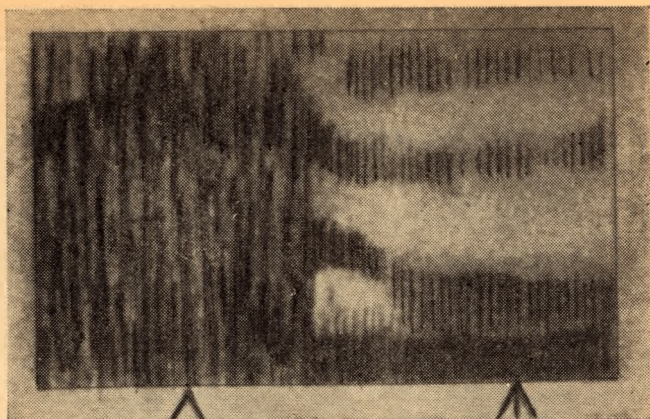
## Изображение некоторых звуков речи

На спектрограммах, изображенных на рис. 43, представлены картины устойчивых гласных звуков, то есть звуков, которые не изменялись во время записи. Воспользовавшись методом записи звуков речи, описанным в предыдущей главе, можно визуально наблюдать изменение звука во времени, столь характерное для человеческой речи. Рассмотрим некоторые из наиболее важных звуков речи.

### Изображение звуков речи

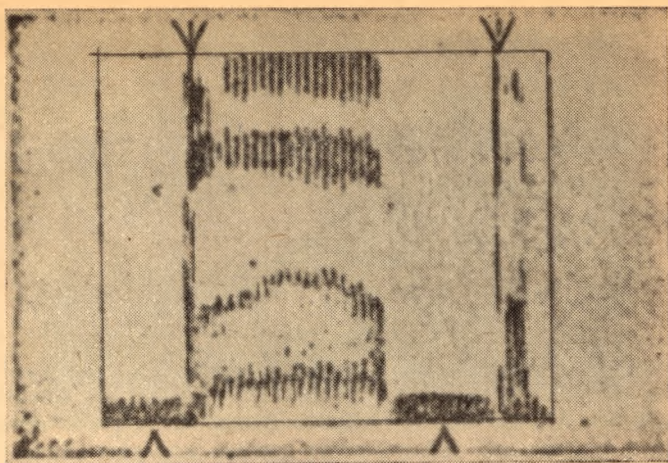
**Звонкие и глухие фрикативные звуки.** Свистящие и шипящие звуки, такие, как [s] в слове *sister* и [ʃ] в слове *she*, называются сибилантными или фрикативными (соответственно от латинских *sibilans* — свистящий шипящий и *fricare* — тереть). Когда мы произносим эти звуки, рот почти закрыт и струя выходящего воздуха испытывает сильное трение, за счет чего и образуются свистящий или шипящий звуки. Звук [ʃ] в слове *she* произносится без участия голосовых связок, поэтому он и называется глухим фрикативным согласным звуком. Но если этот же фрикативный звук произнести с помощью голосовых связок, он превратится в звонкий согласный фрикативный звук [ʒ], каким он слышится в слове *azure*. Аналогичное превращение происходит со звуком [s] (в слове *sister* — это глухой согласный фрикативный звук), когда звучание голосовых связок преобразует его в звук [z], каким он слышится, например, в слове *zoo*. Звук [z] также называется звонким согласным фрикативным звуком.

Характеристики этих звуков представлены на рис. 44. На верхней спектрограмме дан анализ слова *sue*, содержа-



Р и с. 44. Спектрограммы слов *sue* (вверху) и *zoo* (внизу).

шего глухой звук [s], за которым сразу следует гласный [u:]. Наиболее типичные области каждого из этих двух звуков указаны стрелками. Весьма отчетливо виден переход от одного звука к другому. Свистящий звук [s] похож на шум, поэтому он имеет очень широкий спектр частот, сплошь покрывающий всю спектрограмму. Когда же мы переходим к звуку [u:], в спектре появляются характерные для звонкого звука полосы — форманты (о них говорилось в предыдущей главе). В момент перехода, то есть в корот-

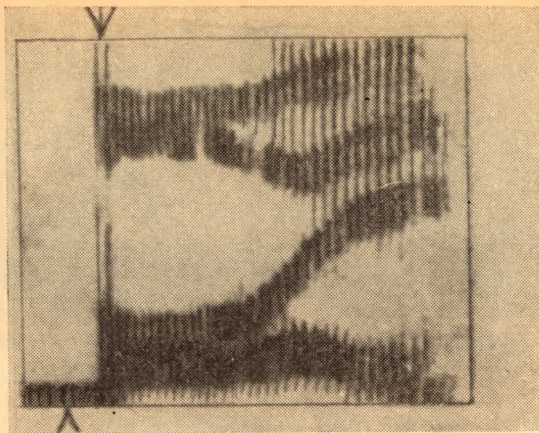


Р и с. 45. Спектрограмма слова *bob*.

кий промежуток времени, резонансная картина как бы наложена на картину шума, иначе говоря, в это время звук является комбинированным. Окончательно шумоподобный спектр исчезает, когда мы переходим к чистому гласному звуку [u:] (правая часть спектрограммы).

На нижней спектрограмме дан анализ слова *зоо*. Здесь резонансные полосы хорошо видны как в обеих частях спектрограммы (звуки [z] и [u:] соответственно), так и в переходной области. На участке спектрограммы, относящемся к звуку [z], наряду с резонансными полосами виден и широкополосный шумоподобный спектр, характерный для глухого согласного звука [s] в слове *sue*. Когда мы переходим к чистому гласному звуку [u:], этот «шум» исчезает.

**Взрывные звуки.** Как звонкие, так и глухие звуки, которые мы только что рассмотрели, являются продолжительными. Но кроме продолжительных, существуют и другие звуки — звуки, которые мгновенно возникают и так же мгновенно затухают. Такие звуки называются взрывными. Чтобы их воспроизвести, необходимо приостановить дыхание и задержать поток выдыхаемого воздуха. Причем задержать поток воздуха можно либо у самого горла, либо в средней части полости рта, либо губами.



Р и с. 46. Спектрограмма слова *boy*.

Как выглядит взрывной звук на спектрограмме, видно на примере картины слова *bob* (рис. 45). Поскольку мы полностью приостанавливаем дыхание в начале и в конце этого слова, данный звук не содержит высокой частоты («чистый» участок в верхней части рис. 45). Аналогичные картины будут и для звука [k] в слове *back*, [t] в слове *hit* и [p] в слове *up*.

**Дифтонги.** Гласный звук, состоящий из двух элементов и произносимый в пределах одного слова, называется дифтонгом. На рис. 46 дан анализ слова *boy*, в котором дифтонгу предшествует взрывной звук [b]. Гласный звук в этом слове быстро изменяется от [ɔ] к [i], образуя тем самым созвучие [ɔi]. Как на спектрограмме слова *bob* (рис. 45), так и на спектрограмме слова *boy* (рис. 46) имеется светлая область, характерная для звука [b]. За этой областью сразу же появляются резонансные полосы, свойственные гласному звуку. Однако в этом случае резонансные полосы занимают новые положения в частотной шкале достаточно плавно. Именно такие спектрограммы и характерны для дифтонгов. Из рис. 46 видно, как резонансные полосы звука [ɔ] переходят в резонансные полосы звука [i].

Комбинация звуков [u] и [j] может также образовывать дифтонги. На рис. 47 звук [u:] изображен слева, а переход

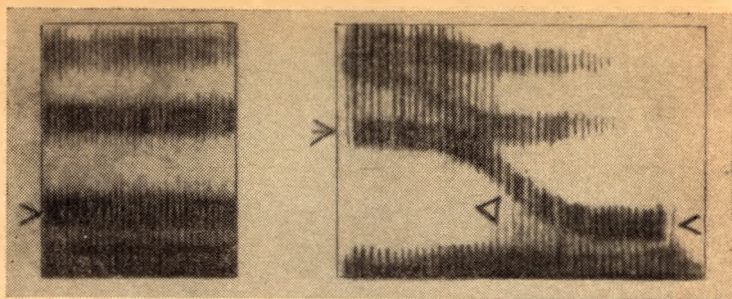


Рис. 47. Спектрограмма звука [u:] в слове *you* (слева) и спектрограмма полного слова *you* (справа).

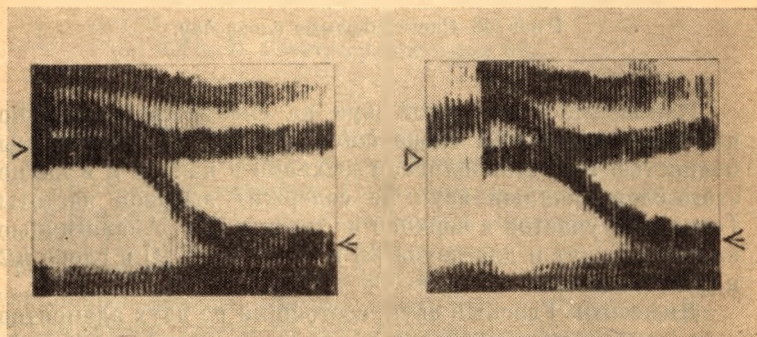
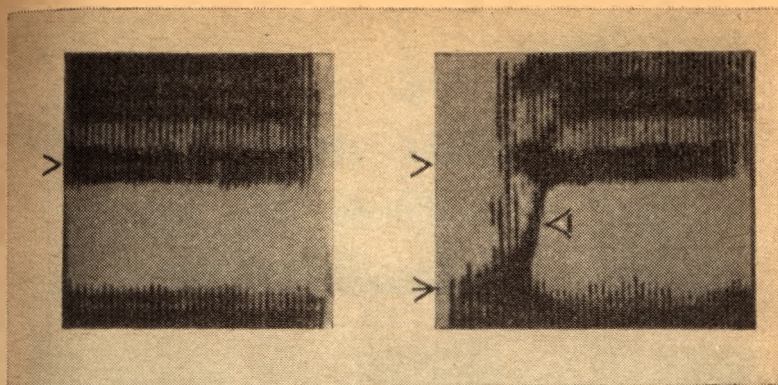


Рис. 48. Спектрограмма дифтонга [ju:] в слове *new* (слева) и спектрограмма полного слова *new* (справа).

от звука [j] к звуку [u:], как, например, в слове *you*, показан справа. В отличие от картины слова *boy* (рис. 46) резонансные частоты слова *you* (рис. 47) при переходе от одного гласного звука к другому падают.

Тот же дифтонг, что и на рис. 47, показан на рис. 48 слева, а в сочетании со звуком [n] в слове *new* — справа. Звук [n] является звонким согласным, поэтому в левой части спектрограммы слова *new* видны резонансные полосы. Звук [n] мгновенно переходит в чистый гласный звук [j], который в свою очередь постепенно переходит в звук [u:], образуя тем самым дифтонг.



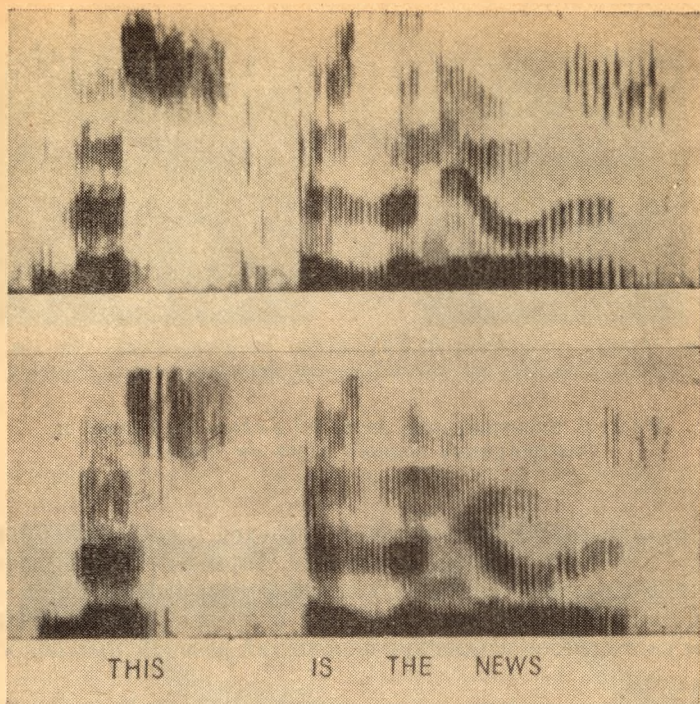
Р и с. 49. Спектрограмма звука [i:] в слове *we* (слева) и спектрограмма полного слова *we* (справа).

Можно рассмотреть и такой переход, как, например [w] — [i:]. Он происходит в слове *we*, формируя другой дифтонг. На рис. 49 слева дан конечный звук [i:], а справа — дифтонг [w] — [i:] в слове *we*. Как и прежде, здесь мы видим постепенное изменение положений резонансных полос.

## Звуковые картины синтезированной речи

В последние годы предпринималось немало попыток создания синтезированной речи. Чтобы хорошо разбирать человеческую речь и к тому же узнавать голос говорящего, передающая система, например телефон, не должна искажать звуки, частота которых лежит в пределах от 300 до 3500 Гц. (Для большей уверенности частотную полосу следует расширить от 100 до 12 000, а то и 15 000 Гц.) Если же посылать закодированный сигнал, который в приемном устройстве преобразуется в свою первоначальную форму, то его можно передавать без искажений по каналу с гораздо более узкой полосой пропускания, чем обычно.

**Вокодер.** Наиболее успешно позволяет кодировать звуки речи прибор, который получил название вокодера и был разработан Х. Дадли. Поскольку кодирующие системы очень отчетливо изображают основные характеристики речи, то для демонстрации того, насколько хорошо вокодер или любой другой синтезатор могут восстанавливать пер-



Р и с. 50. Спектрограммы фразы *This is the news* (Это новости). Вверху — оригинальная речь, внизу — речь, воспроизведенная вокодером.

воначальную речь, чаще всего используется методика изображения звуков голоса, рассмотренная в этой главе.

На рис. 50 даны спектрограммы фразы *This is the news*. На верхней спектрограмме ее произносит человек, а на нижней — представлена эта же фраза, восстановленная вокодером. На основании этих спектрограмм мы можем судить о схожести двух картин одного звука, полученных разными способами. Однако у закодированного звука есть преимущество — его можно передавать по цепи с более узкой полосой пропускания. На рис. 50 нижняя спектрограмма получена с помощью вокодера, усовершенствованного Р. Л. Миллером.

**Вобанк.** Звуки речи можно передавать по каналу с более узкой, чем обычно, полосой пропускания, используя

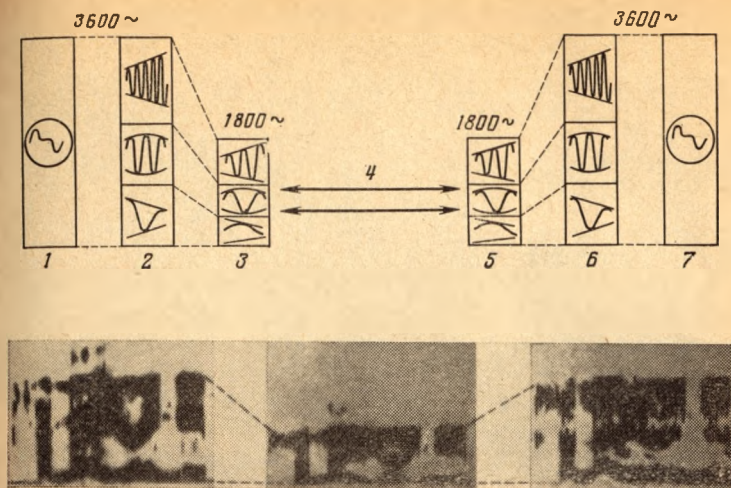


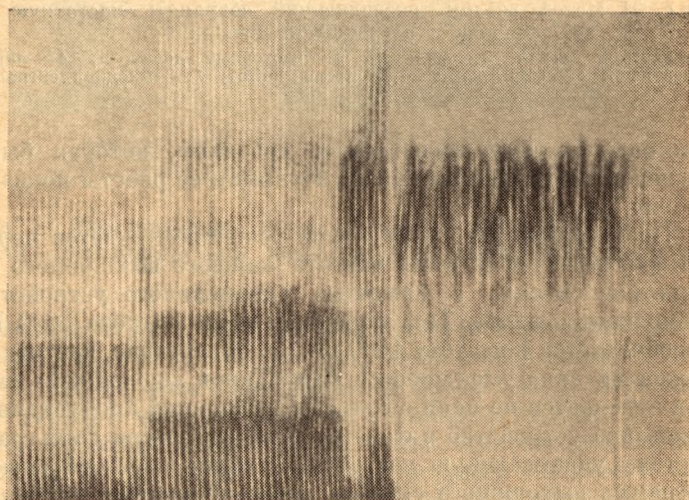
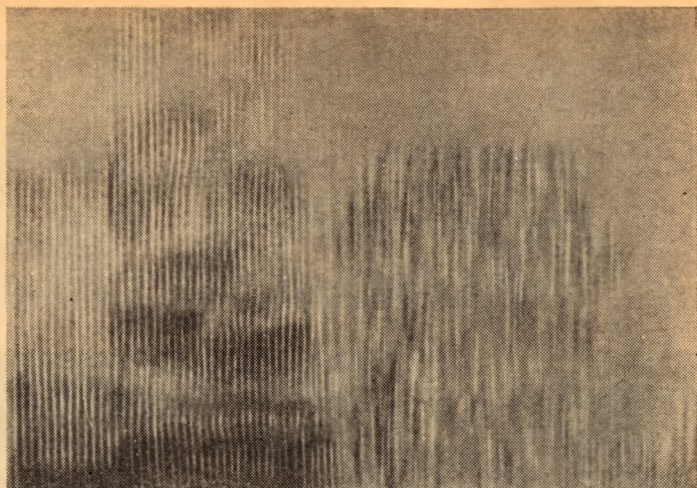
Рис. 51. Метод вобанк, позволяющий сохранять частотную полосу переданного сигнала.

1 — входной сигнал; 2 — фильтры; 3 — частотные делители; 4 — линия передачи; 5 — фильтры; 6 — удвоители частот; 7 — выходной сигнал.

еще одну систему, называемую вобанком, которая была исследована Б. П. Боджертом. Принцип ее работы показан на рис. 51.

Посылаемый звуковой речи пропускается через три фильтра, после чего частота каждого выходящего из фильтров сигнала с помощью специального устройства уменьшается вдвое. Так, первоначальная частота 3600 Гц преобразуется в частоту 1800 Гц. Следовательно, частотная полоса сигнала уменьшается вдвое. Такой «суженный» сигнал передается по цепи с более узкой полосой пропускания. Приемное устройство в свою очередь имеет три фильтра и систему, удваивающую частоту. Как видно из рис. 51, спектрограмма выходящего сигнала (нижний правый рисунок) весьма близка по структуре к спектрограмме входного сигнала (нижний левый рисунок). Это говорит о несущественности искажений при таком преобразовании.

**Фонематический вокодер.** Синтезированную речь можно создать и без использования оригинала, с помощью особых переключателей, которыми в соответствии с особенностями звуков речи управляет оператор. Соответственно



Р и с. 52. Спектрограммы слова *nurse*.

Вверху — произнесенное слово, внизу — последовательность четырех звуков речи, симулирующих это слово.

этому запрограммирована и работа электронно-вычислительной машины, перераспределяющей звуки, которые мы хотим услышать, в надлежащем порядке. На рис. 52 ввер-

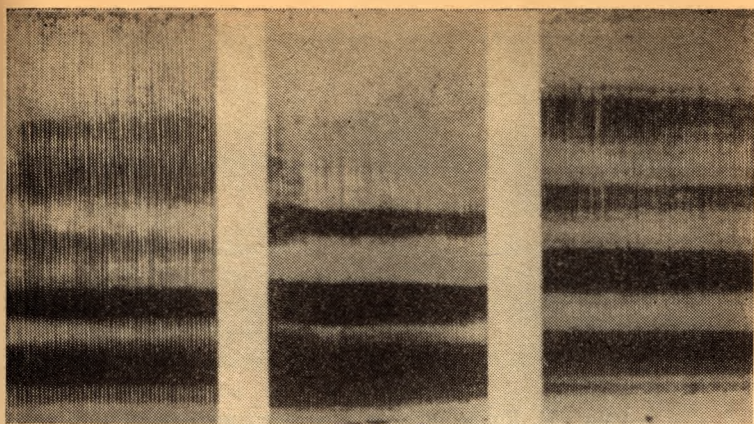


Рис. 53. Спектрограммы звука [æ] в слове *at*, произнесенного соответственно мужчиной, женщиной и ребенком.

ху показана спектрограмма слова *nurse*, внизу представлен ряд четырех звуков (фонем) [n], [ə:], [r] и [s]. Близкое сходство этих двух спектрограмм очевидно.

Рассмотренную систему можно использовать и как вокодер. Для этого приемное устройство системы с помощью электронных приборов выделяет из слова (фразы) подряд каждый звук, на выходе полученные сигналы синтезируются и немедленно озвучиваются. Таким образом можно получить большой выигрыш, сократив полосу пропускания, но, естественно, за счет большой потери качества звука речи.

**Проблемы, возникающие при чтении изображений речи.** В принципе человек мог бы научиться читать спектрограммы произнесенных слов так же, как он читает обычный печатный текст. Это позволило бы понимать речь людям, лишенным слуха. Однако при этом возникает некоторая трудность. На рис. 53 показаны три спектрограммы одного и того же гласного звука [æ] в слове *at*. Слева дан анализ этого звука, произнесенного мужчиной, в центре — женщиной и справа — ребенком. Все три спектрограммы отличаются друг от друга расположением резонансных частот, которое зависит от размеров полости рта; вполне естественно, что эти размеры у разных людей не одинаковы. Именно эта разница в положении резонансных частот и



Рис. 54. Динамические спектрограммы речи.

затрудняет безошибочную интерпретацию видимой речи.

**Динамические спектрограммы.** Попытки сделать спектрограммы речи более распознаваемыми привели к модификации обычного анализа речи, при этом основное внимание было уделено тем областям, где происходит изменение в положении резонансных полос.

На верхней части рис. 54 показаны спектрограммы трех произношений слова *bird*, причем анализ этих звуков был произведен обычным образом, то есть способом, который мы только что рассмотрели. На нижней части рис. 54 показаны *динамические* спектрограммы тех же звуков. Слева в каждой из этих спектрограмм (нижний ряд) имеются темные области, которые мгновенно переходят в две резонансные полосы (это переход от взрывного звука [b] к гласному звуку). Если бы резонансные полосы не менялись во времени, то даже на спектрограмме никаких отметок не было бы. Однако в действительности запись показывает (рис. 54, внизу), что частота верхнего резонанса возрастает, а нижнего — падает. Из записи также отчетливо видно, что звук [d] произносится с помощью голосовых связок, то есть на спектрограмме существуют темные полосы, на верхнем же снимке в этом месте вообще ничего нет (белое пятно). И наконец, конечный звук [d] можно также легко распознать из спектрограмм, представленных на рис. 54 внизу.

**Электрический голосовой тракт.** На рис. 55 показаны спектрограммы гласных звуков, произнесенных специаль-

ным прибором, который был создан Х. К. Данном и получил название электрического голосового тракта. В этом приборе электрическая схема моделирует весь путь, который проходит звук от гортани до губ включительно, причем некоторые звуковые параметры, которые обычно мы изменяем за счет положения языка или губ, с помощью этого прибора можно варьировать. Как видно из спектрограмм на рис. 55, прибор воспроизводит гласные звуки, очень близкие к гласным звукам, произносимым человеком.

**Машинная речь.** В последние годы в анализе и синтезе речи все большую роль играют электронно - вычислительные машины. Эти машины могут выполнять теперь спектральный анализ речи (анализ Фурье). Методика такого анализа, основанная на использовании всевозможных фильтров, была разработана Р. Поттером. Чтобы произвести анализ речи, необходимо взять модель в форме какой-либо волны, например, такой, полный

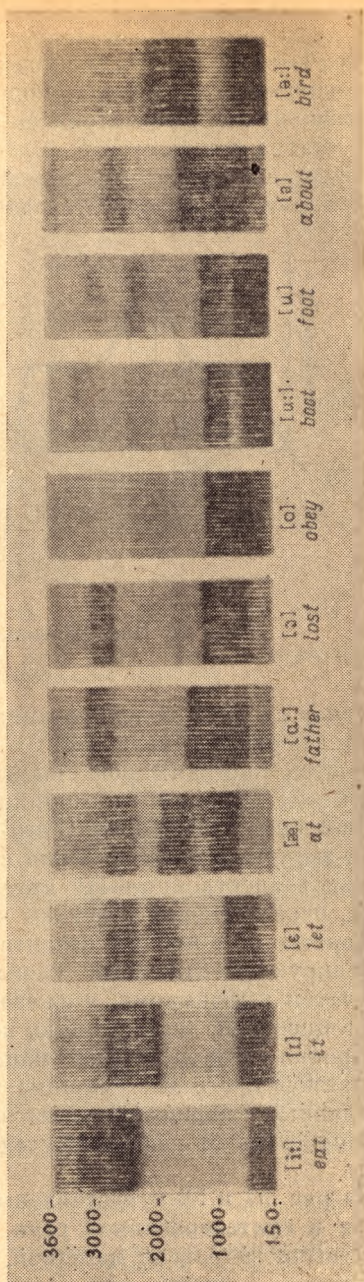
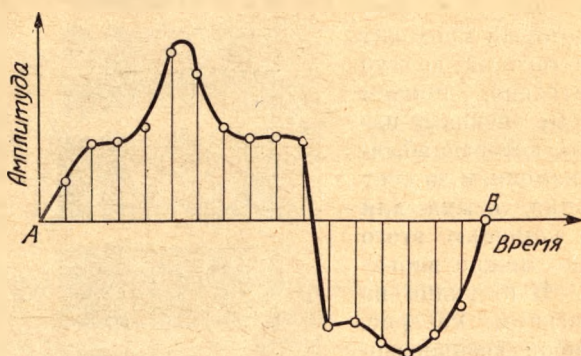


Рис. 55. Спектрограммы звуков, воспроизведенных искусственно электрическим голосовым трактом.

период которой представлен на рис. 56. Спектральный анализ, основанный на такой модели, будет вполне точным. (Поскольку мы рассматриваем только дискретные точки, этот анализ называется *дискретным фурье-анализом* или для волн, спектр которых изменяется с течением времени, *дискретным фурье-преобразованием*.)



Р и с. 56. Пример произвольной волны.

Такая система моделирования очень хорошо подходила для *цифровых* вычислительных машин, поэтому был создан метод программирования для фурье-преобразований. Этот метод требует мало машинного времени, а потому нашел широкое применение. С его помощью можно находить и тон звукового сигнала. Зная спектр и тон, можно было заставить электронно-вычислительную машину создавать звуки, очень близкие к звукам человеческой речи.

Коротко весь процесс сводится к следующему. Сначала анализируются отдельные слова, произнесенные человеком, затем информация, высказанная словами, преобразуется в цифровую информацию, которая и закладывается в электронно-вычислительную машину. А уже потом по разработанной программе машина объединяет вложенные в нее данные в цифровой эквивалент предложений и после этого преобразует цифровые сведения в синтезированную речь.

На рис. 57 и 58 представлены спектрограммы речи человека и синтезированной речи, воспроизведенной электронно-вычислительной машиной.

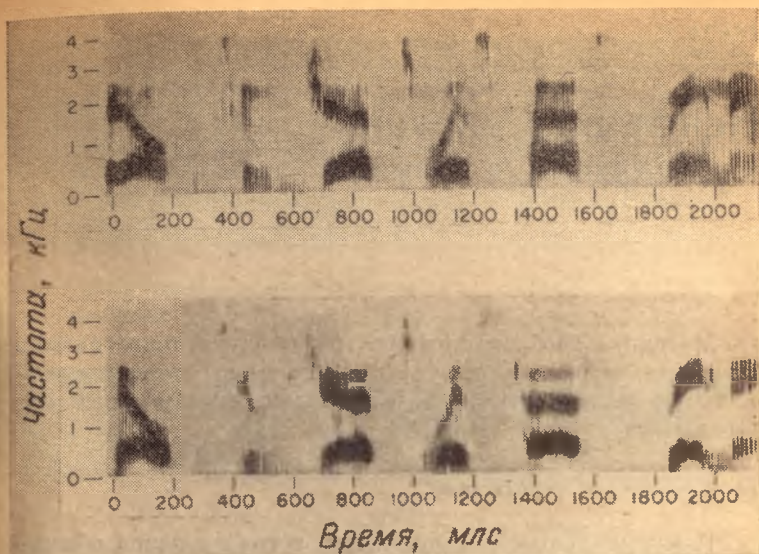


Рис. 57. Спектрограммы фразы *High-altitude jets whiz past screaming.*

Вверху — подлинная человеческая речь, внизу — речь, синтезированная электронно-вычислительной машиной.

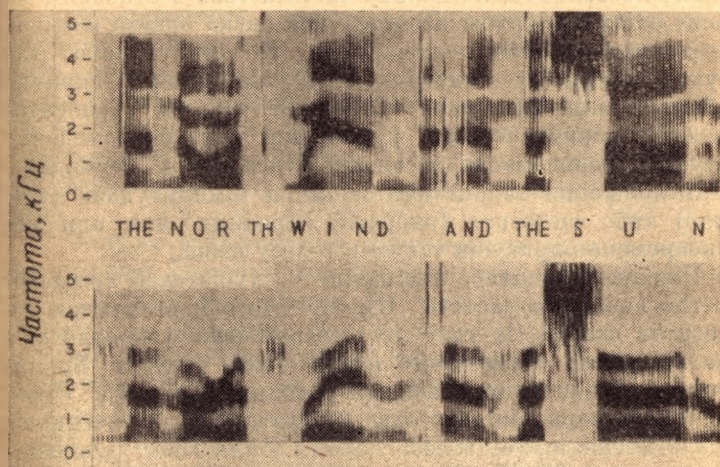


Рис. 58. Спектрограммы естественной и синтезированной речи.

При создании синтезированной речи, анализ которой дан на нижней спектрограмме, электронно-вычислительная машина фактически «прочитывала» печатный текст, а затем уже с помощью нескольких указаний была в состоянии воспроизвести речь, очень близкую к естественной.

## Некоторые картины музыкальных звуков

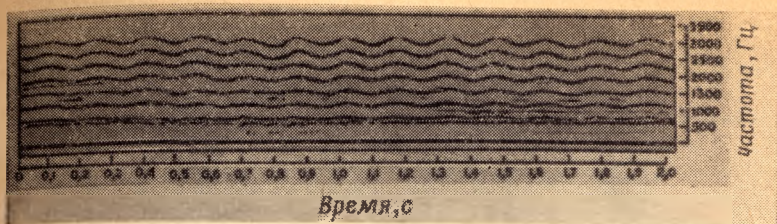
Методика изображения структуры звука, применяемая для анализа речи, пригодна и для анализа многих музыкальных звуков. Рассмотрим несколько спектрограмм музыкальных звуков.

### Вибрато и тремоло

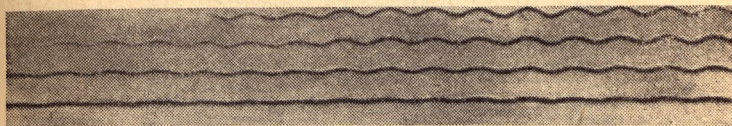
И музыкальным инструментам, и голосу певца обычно свойственна периодическая вариация звука, приблизительно равная 5 Гц. Если варьируется частота, вариация называется *вибрато*, если варьируется амплитуда — *тремоло*.

Частота тонов, издаваемых органом, является относительно постоянной, поскольку частота тона в основном зависит от длины трубы. Поэтому для звука органа возможно только изменение амплитуды, то есть тремоло. Для звуков струнных инструментов, например скрипки и виолончели, возможна вариация частоты (вибрато) за счет периодического удлинения или укорачивания струны — исполнитель достигает этого путем периодического движения пальца или запястья. Амплитудная (тремоло) либо частотная (вибрато) вариации или они обе одновременно присущи также и голосу певца.

Наиболее приятное ощущение у слушателей вызывает чистая вариация частоты. Именно этого и стараются достигнуть певцы. На рис. 59 представлен узкополосный анализ голоса знаменитого итальянского тенора Энрико Карузо, обладавшего красивым и сильным голосом. Периодическая вариация частоты (вибрато) здесь очевидна. Аналогичная запись голоса певицы Лили Понс (сопрано) дана на рис. 60. Из спектрограммы отчетливо видно, что интенсивность третьей и четвертой гармоник во время записи возрастает.



Р и с. 59. Узкополосный анализ голоса Энрико Карузо.  
Отчетливо видно периодическое изменение частоты — вибрато.



Р и с. 60. Запись голоса Лили Понс (сопрано).  
Гармоники в этой записи довольно далеко отстоят друг от друга. Это значит, что данная нота была высокой.

## Форманты музыкального инструмента

Многочисленные спектрограммы гласных звуков, приведенные в предыдущей главе, показывают наличие формант, которые достаточно ясно видны благодаря использованию в процессе анализа широкополосных фильтров. Поскольку при переходе от одного гласного звука к другому положение формант меняется, естественно связать положения формант на частотной шкале с характеристиками звука.

У многих музыкальных инструментов есть резонансные полости (резонирующие структуры). Поскольку воспроизведенный звук обычно богат гармониками, резонаторы выделяют (усиливают) те гармоники, частоты которых попадают в частотную полосу резонаторов. Известно, что различные форманты придают звуку характерные оттенки, благодаря которым один музыкальный инструмент отличается от другого. Экспериментально установлено, что место форманты тромбона на частоте 1020 Гц, одной из основных формант валторны — на частоте 1350 Гц и форманты трубы — на частоте 1520 Гц. Постараемся определить форманты музыкальных инструментов так же, как

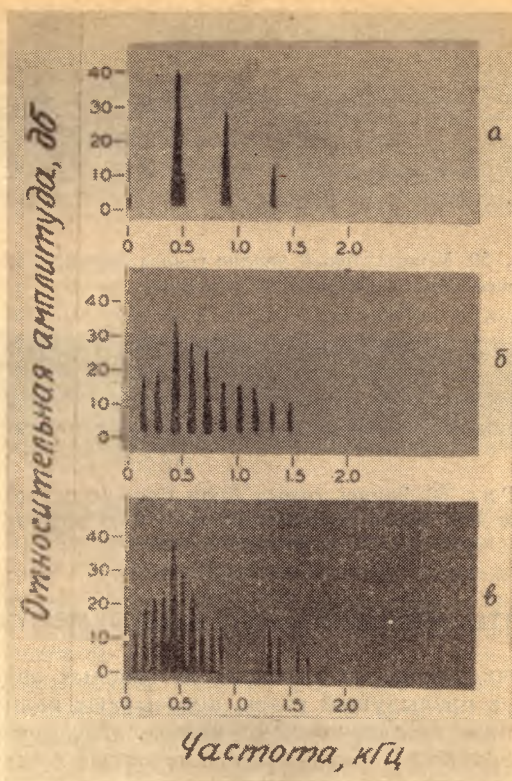


Рис. 61. Спектральный анализ трех нот, сыгранных на фаготе. а — ля первой октавы (440 Гц); б — до малой октавы (139 Гц); в — фа большой октавы (87 Гц).

делали это для звуков голоса: форманты суть области сильных резонансов, усиливающие гармоники, которые попадают внутрь них.

На рис. 61 дан спектральный анализ трех нот, сыгранных на фаготе. На верхней спектрограмме, соответствующей более высокой ноте, гармоники отстоят друг от друга дальше, чем на нижних. На всех трех спектрограммах наиболее усилены гармоники, частота которых близка к 500 Гц.

Величина резонансного эффекта в этом случае сравнима с действием формант человеческого голоса. При пере-

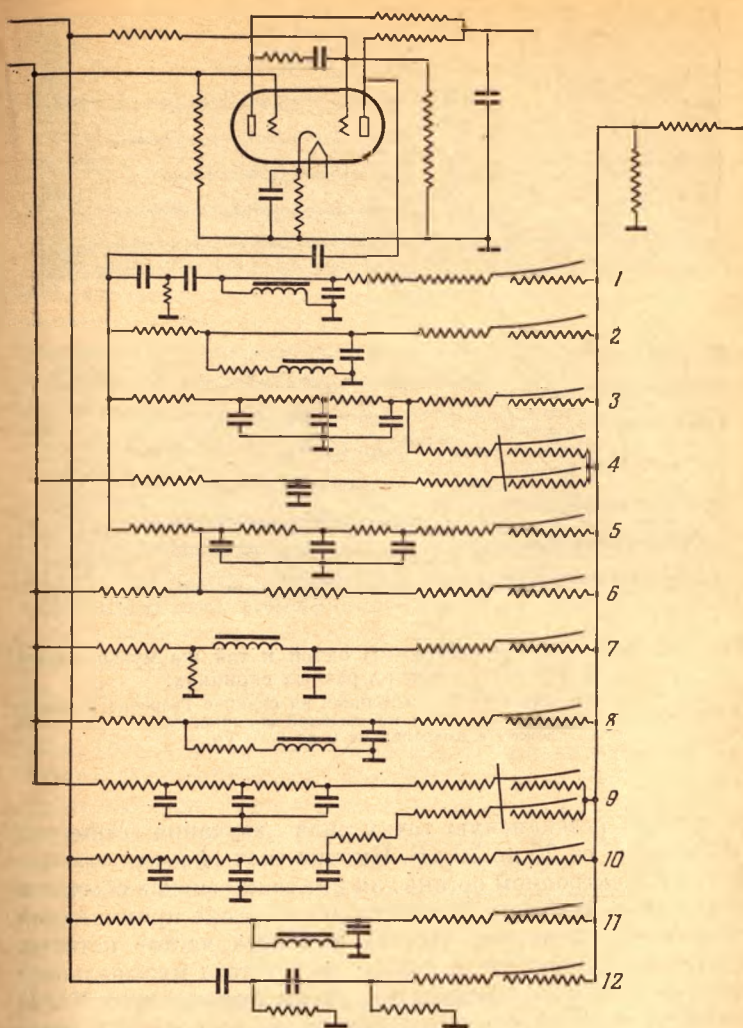


Рис. 62. Электрическая схема электрооргана.

Чтобы воспроизвести эффект формант, в электрические цепи электронного органа, создающие тональную окраску, часто включаются резонансные контуры. Из схемы видно, что цепи, имитирующие звуки гобоя, кларнета, трубы, арфы, рожка, содержат индуктивность.

1 — гобой 8'; 2 — кларнет 8'; 3 — закрытый диапазон 8'; 4 — скрипичный диапазон 8'; 5 — валторна 8'; 6 — человеческий голос 8'; 7 — труба 8'; 8 — арфа 8'; 9 — открытый диапазон 8'; 10 — флейта 4'; 11 — рожок 4'; 12 — свирель 4' (8' и 4' — вторая октава и кварта соответственно).

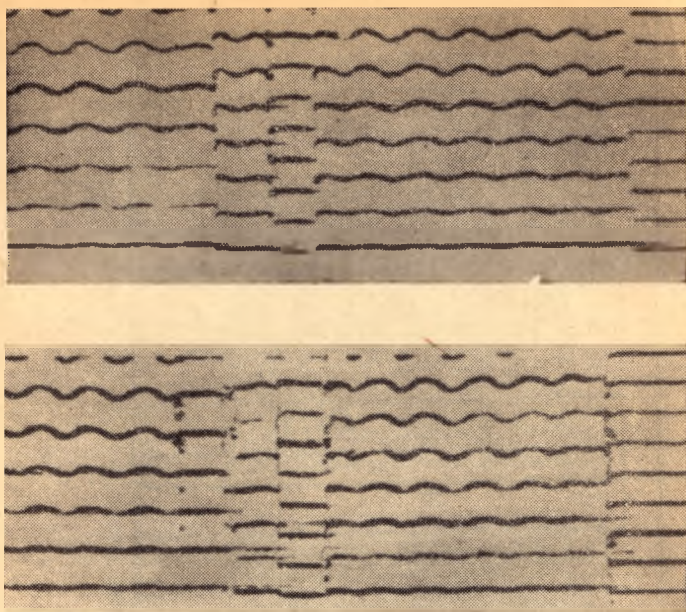


Рис. 63. Звуковые спектрограммы одной и той же музыкальной фразы, сыгранной на разных скрипках.

Верхняя спектрограмма — фраза, сыгранная на скрипке Гверсана; нижняя спектрограмма — фраза, сыгранная на обычной скрипке. Частотная шкала лежит в пределах от 0 до 6500 Гц.

ходе через резонансную точку сила звучания гармоник изменяется от 20 до 30 дБ. Именно этот эффект используется в электронном органе для имитации звуков обычного органа или оркестра. В электронном органе применяются резонансные контуры, частота и полоса частот которых соответствуют частоте и полосе частот того музыкального инструмента, звук которого мы хотим имитировать. Когда любой из звуков органного осциллятора, содержащий большое количество гармоник, проходит через резонансный контур, то гармоники с частотами, соответствующими частотам резонансного контура, усиливаются. Тем самым независимо от частоты первоначального тона осциллятора мы получаем желаемый звук того инструмента, которому подражает электронный орган. Из рис. 62 видно, что различные электрические цепи, создающие тональную окрас-

ку звука, содержат комбинации индуктивностей и емкостей, что и обеспечивает цепи желаемую полосу пропускания. Этот электронный орган разработан автором.

## Качество инструмента и его визуальное представление

Одной из проблем, с которыми обычно сталкивались при исследовании музыкальных инструментов, является установление критерия их качества. Это довольно трудоемкая работа, особенно для скрипок. Веками исполнители предпочитали скрипки старых мастеров, таких, как Страдивари, Гварнери и Гверсан, но долгое время не удавалось научно обосновать преимущество этих скрипок перед обычными.

Однако метод, используемый для анализа звуков речи, позволяет установить причины популярности некоторых музыкальных инструментов и, следовательно, их превосходного звучания. На рис. 63 представлен узкополосный анализ музыкальной фразы, сыгранной на скрипке в комнате с полностью поглощающими звук стенами. На нижней спектрограмме дан анализ музыкальной фразы, сыгранной на обычной скрипке, на верхней — картина той же самой музыкальной фразы, сыгранной на скрипке Гверсана. Обычной скрипке свойственны сильнозвучащие низкочастотные гармоники, которые видны на спектрограмме слева и справа. Кроме того, при переходе от одной ноты к другой она порождает много посторонних звуков (шум) между гармониками. При быстром переходе от одной ноты к другой этот посторонний шум будет уменьшать чистоту тона.

## Воспроизведение формант в органе регистрами призывков

Известно, что форманты создают тональную окраску звука, то есть определяют тембр музыкальных инструментов. В органах аналогичная окраска достигается особыми устройствами — регистрами призывков, называемыми смесями. В таких регистрах, нажав лишь одну клавишу, можно вызвать звучание нескольких труб. Когда нажата одна

клавиша, основной регистр-диапазон соответствует звучанию одной трубы, следовательно, для диапазона требуется только один набор труб (по одной трубе для каждой клавиши клавиатуры — мануала). Для смеси же необходимо несколько труб. Число звучащих труб и определяет название смеси, например смесь четвертого порядка создают четыре звучащие трубы.

Воспроизведение формант органными смесями достигается особым приемом, который состоит в том, что органист с помощью других регистров открывает или закрывает нужные отверстия органных труб. Таким образом, когда нажата клавиша, в нижних октавах звучат высшие призвуки, а в верхних октавах, наоборот, — низшие. Таким образом, когда мы последовательно нажимаем на клавиши мануала слева направо, устройство перекрывания отверстий гасит верхние призвуки (гармоники) и добавляет нижние. Такой прием придает блеск нижним октавам, богатство средним и полноту верхним. Гельмгольц сравнивал форманты скрипки с эффектом смесей в органе. По этому поводу он писал: «Обертоны струнных инструментов, например скрипки, усиливаются резонатором пропорционально их близости к его тонам. В низких тонах скрипки резонатор выделяет их октавы и квинты, верхние же ноты подзвучиваются низкими обертонами. В органах аналогичный эффект достигается с помощью регистров призвуков следующим образом: серии высших гармоник, исходящие из различных труб, звучат менее широко для высоких нот, нежели для низких».

Чтобы показать, как получается такой эффект, исследуем несколько особенностей смеси. На рис. 64 показано расположение смеси третьего порядка с шестью регистрами для переключения отверстий труб. Это звучание цимбалы в органе «Эолов пастух» из церкви в Хьюстоне. Самая длинная линия на этом рисунке соответствует нажатой клавише, относящейся к основной ноте. Таким образом, если мы нажмем самую левую клавишу мануала, соответствующую нижнему до —  $C_2$ , то в смеси третьего порядка будут звучать три ноты (три гармоники). На рис. 64 это линия, исходящая из  $C^3$  на горизонтальной прямой, и ближайшие к ней две линии справа. Для самой правой клавиши мануала  $C^4$  в этой смеси наряду с  $C^5$  — первый обертон (вторая гармоника)  $C^4$  — будут звучать также третья и четвертая гармоники. Независимо от частоты ос-

повного тона генерированные гармоники лежат приблизительно в той же области частот, то есть между  $C^3$  и  $C^6$ . Таким образом, рассмотренные гармоники соответствуют действию обычного резонатора, производящего форманты. Из представленной на рис. 64 схемы видно, что с ростом основной частоты гармоники понемногу сдвигаются вверх

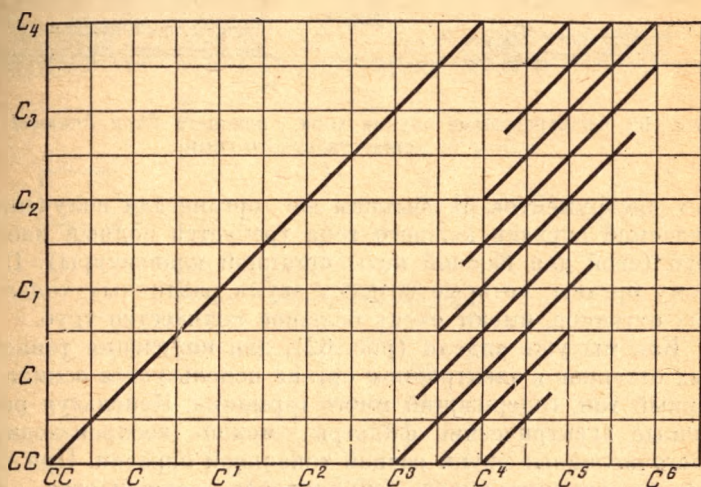
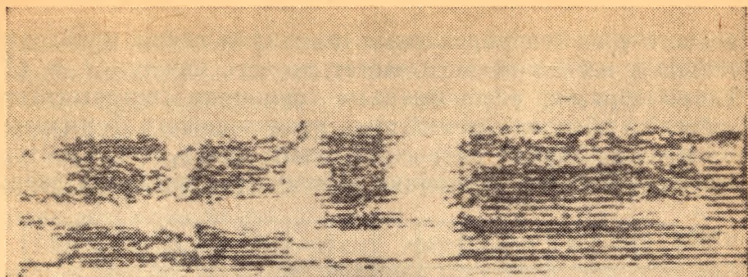


Рис. 64. Расположение смеси третьего порядка (цимбала III) органа.

по частотной шкале. Следует отметить, что этот эффект наблюдается и для формант музыкальных инструментов оркестра.

## Видимое представление хорового эффекта

В последние годы семейство музыкальных инструментов пополнилось электронным органом. В этом инструменте транзисторы генерируют и усиливают электрические сигналы, которые преобразуются громкоговорителем в музыкальные звуки. Электронный орган намного меньше обычного благодаря тому, что в нем используется только один электронный осциллятор, который может генерировать совершенно различные звуки: основной тон, тоны струнных, языковых и деревянных духовых музыкаль-



Р и с. 65. Спектрограмма звуков хора, поющего *Thou knowest it telling* из рождественского гимна.

ных инструментов. В обычном же органе для получения желаемой окраски каждого тона требуется полный набор труб (свой для каждой ноты органной клавиатуры). Поэтому органы, которые создают звуки различных тональных оттенков, имеют очень большое количество труб.

Как мы уже видели (рис. 62), для получения тональных оттенков в электронном органе используется осцилляторный тон, содержащий много гармоник. Используя различные электрические фильтры, можно воспроизводить многочисленные звуки разной тональной окраски. При такой конструкции число осцилляторов сокращается, но электронный орган уже не может воспроизводить хоровой эффект. Именно из-за хорового эффекта мы можем отличить вокальный квартет от хора, поющего ту же самую мелодию на четыре голоса.

Характерный звук хора возникает вследствие эффекта уширения полосы частот, что, в свою очередь, происходит из-за небольшой разницы в частоте у отдельных певцов, поющих в хоре. Такая же разница существует между струнным квартетом и симфоническим оркестром, исполняющим ту же самую мелодию на четыре партии. Обычный орган так же воспроизводит хоровой эффект. При определенном положении регистров трубы, звучащие в унисон, издадут звуки, слегка отличные друг от друга по частоте. В электронном органе такой эффект трудно воспроизвести, поскольку в нем для получения тональной окраски звука используется только один электронный осциллятор.

С помощью методики изображения звуков речи можно получить спектрограмму хора для изучения хорового

эффекта. Это может помочь конструкторам в поисках путей воспроизведения такого эффекта в электронных инструментах.

На рис. 65 представлена запись хора, сделанная с помощью метода, который мы использовали для записи голосов солистов. Следует иметь в виду, что при такой записи

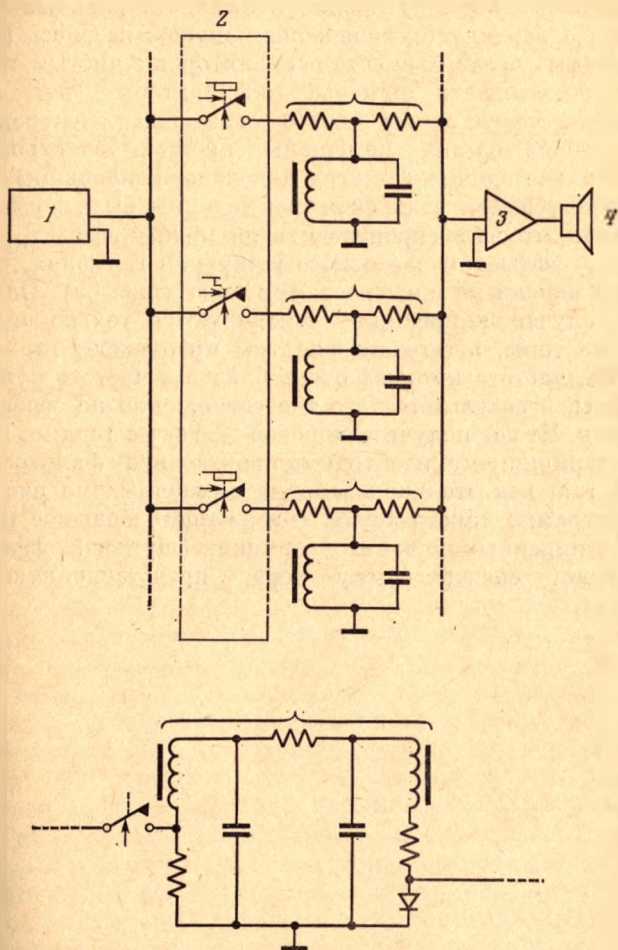


Рис. 66. Схема с источником шума, которая позволяет воспроизвести эффект хора.

1 — генератор шума; 2 — клавиатура; 3 — усилитель; 4 — громкоговоритель.

применяются узкополосные фильтры. Отдельные гармоники гласных звуков на спектрограмме хора (рис. 65) уже не представлены столь отчетливо, как это было на спектрограммах голосов солистов (рис. 59 и 60). Даже малые отличия в частоте голоса каждого хориста приводят к уширению спектра гармоник.

Поскольку такое уширение напоминает расплывчатую частотную картину шумоподобных звуков, казалось бы, в электронных органах вместо осцилляторов с чистым тоном лучше использовать шумовые осцилляторы (рис. 66). В верхней части схемы вместо отдельных электронных осцилляторов органа помещены простые электронные фильтры (по одному фильтру для каждой клавиши). Полосы пропускания этих фильтров должны быть достаточно узкими, чтобы воспроизводить тональный эффект, сравнимый с эффектом частотного уширения гармоник, который мы видели на спектрограмме хора (рис. 65). Однако в этом случае по-прежнему генерируются только чистые основные тоны, поскольку фильтры пропускают гармоники шума, частота которых очень близка к частоте нужной нам ноты, в результате чего тон совершенно не содержит гармоник. Чтобы получить хоровой эффект с тонами, богатыми гармониками, необходимо производить фильтрацию звуков так, как это показано на нижней схеме рис. 66. Спектрограмма такого звука, содержащего большое количество уширенных по частоте гармоник (шумовой эффект), напоминает спектрограмму хора, представленную на рис. 65.

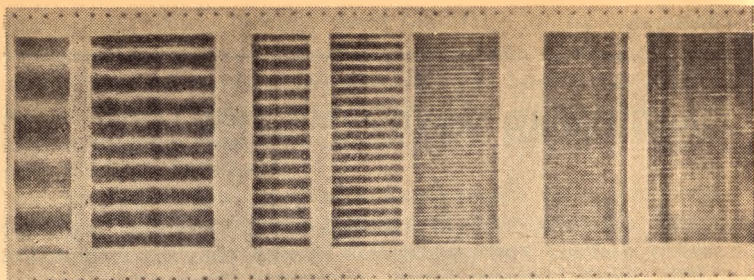
## Различные звуковые картины

### Картины корреляций

Один из способов изображения структуры звука основан на использовании корреляционного процесса. Рассмотрим две абсолютно одинаковые волны, амплитуды которых по определенному закону меняются во времени. Если амплитуды этих волн будут иметь одинаковые знаки, то их произведение будет положительным. Весь интервал изменения амплитуды мы можем разбить на очень маленькие участки, на каждом из которых амплитуду можно считать постоянной. Если соответственно перемножать последовательно взятые амплитуды с маленьких участков одного и другого графиков, а затем полученные произведения складывать (интегрировать), то полученная положительная величина с увеличением координаты, вдоль которой распространяется волна, будет непрерывно возрастать.

В действительности же амплитуды волн очень быстро изменяются во времени. Однако, используя быстродействующие электронно-вычислительные машины, можно не только перемножать амплитуды двух волн, но и производить непрерывное суммирование (интегрирование) полученных положительных произведений. Непрерывное перемножение двух очень похожих друг на друга волн и последующее непрерывное суммирование перемноженных сигналов в конце концов дает сигнал очень большой величины. Такой процесс умножения и сложения двух одинаковых волн называется корреляционным процессом.

Теперь мы рассмотрим корреляционный процесс для случая, когда перемножаются и суммируются две совершенно одинаковые волны, которые *сдвинуты* относительно друг друга во времени. Сначала рассмотрим две идентичные монохроматические синусоидальные волны. Когда эти две волны никак не сдвинуты, то есть временные коорди-



Р и с. 67 Коррелятограмма синусоидальной волны.

наты волн совпадают, их перемножение и суммирование, как и в предыдущем случае, дают положительное значение конечного результата. Однако если временная координата одной из волн смещена относительно временной координаты другой волны, то наибольшее значение суммы мы получим лишь в случае, если этот сдвиг равен длине волны или целому числу длин волн. Если же теперь сдвиг во времени *непрерывно* и *равномерно* изменять, то корреляция (результат умножения и суммирования) двух волн будет поочередно изменяться от своего положительного *максимального* значения (перемножение амплитуд с одинаковым знаком с последующим сложением полученных произведений) до отрицательного *минимального* значения (перемножение амплитуд с противоположными знаками с последующим сложением полученных произведений).

Визуальное изображение конечного результата этого процесса показано на рис. 67. Вдоль вертикальной оси отложено относительное изменение временной координаты двух волн, вдоль горизонтальной оси — реальное изменение времени. Поскольку в этом случае мы рассматривали непрерывную монохроматическую синусоидальную волну, то в горизонтальном направлении полученная картина горизонтальных полос остается постоянной, то есть положение горизонтальных полос не меняется со временем. По аналогии со спектрограммой назовем полученную картину (рис. 67) коррелятограммой.

Если же исследовать автокорреляционные процессы волн, амплитуды которых хаотически меняются во времени, то на полученных коррелятограммах мы не увидим не меняющихся во времени горизонтальных полос; кроме

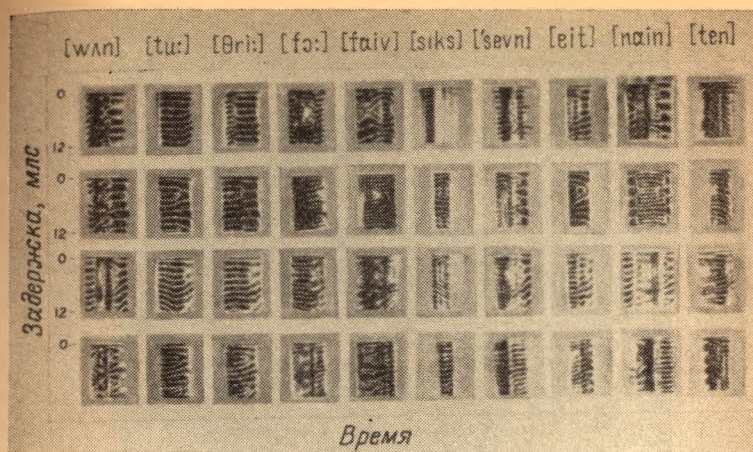


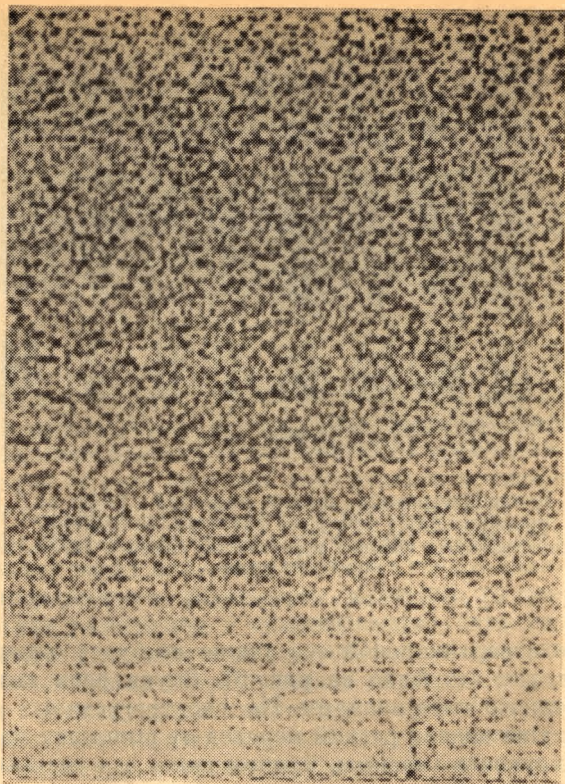
Рис. 68. Коррелятограммы десяти названий цифр от 1 до 10, произнесенные четырьмя различными людьми.

Над коррелятограммами указаны фонетические символы звуков, составляющих эти слова.

того, вдоль вертикальной оси также не будет однородной картины, как это было на рис. 67. Звуки речи являются именно такого типа волнами. На спектрограммах звуков речи мы уже видели резкий переход от шипящих или свистящих звуков к гласным, причем даже для гласных звуков характерно быстрое изменение частоты основного тона. На рис. 68 представлены коррелятограммы названий цифр от единицы до десяти, которые произнесли четыре разных человека.

## Звуки в море

Звуковые волны хорошо распространяются в воде. Поэтому они нашли широкое применение в устройствах, называемых сонарами. Свое название сонары получили по аналогии с радаром, в которых используются электромагнитные волны. С помощью сонаров мы «видим» предмет и определяем его местоположение, независимо от того, движется он под водой или по поверхности воды. Ниже при рассмотрении подводных звуков мы воспользуемся их визуализацией.



Р и с. 69. Спектрограмма морского шума, постоянная во времени.

**Морской шум.** Ветры и вызванные ими сильные штормы создают в океане шумоподобный звук. Частотный спектр морского шума очень широк: обычно он сравним со спектром либо свистящего шума ветра, мчащегося сквозь ветви деревьев, либо свистящего согласного звука. Визуальное представление такого шума показано на рис. 69. Нетрудно заметить, что эта запись постоянна во времени, причем ни одна из частот на изображенной спектрограмме не является выделенной.

Когда интенсивный шум шторма достаточно локализован, как это бывает в случае тайфуна или урагана, то с помощью приборов для направленного подводного прослу-

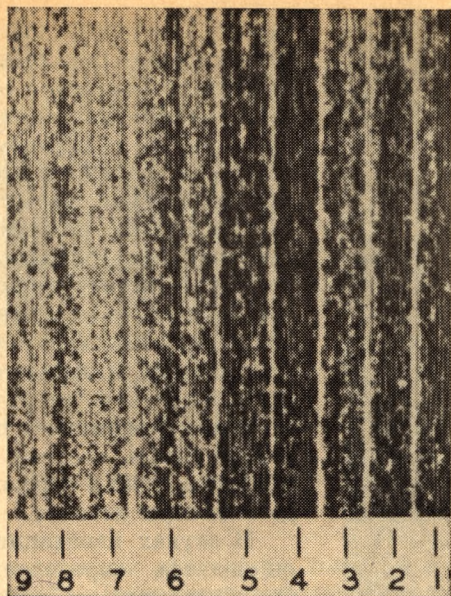


Рис. 70. Набор девяти спектрограмм, полученных с помощью подводного акустического устройства.

Приемная часть устройства регистрировала звуки, идущие из девяти различных направлений. В направлении, которому соответствует самая темная спектрограмма, бушует шторм.

шивания можно достаточно точно установить путь перемещения шторма.

На рис. 70 даны записи шума, сделанные прибором для подводного прослушивания в девяти различных направлениях. Наибольшая интенсивность морского шума зарегистрирована в направлениях, изображенных в правой половине спектрограммы.

Аналогичная картина морского шума в двух направлениях представлена на рис. 71. Прибор поочередно направлялся на центр шторма и на область, куда шторм еще не дошел. Вторая и четвертая спектрограммы свидетельствуют о том, что море в этом месте спокойно. Темные первая и третья спектрограммы указывают, в каком направлении бушует шторм.

**Шум винта.** Вследствие явления, называемого кавитацией, винт судна создает шум с очень широким спектром

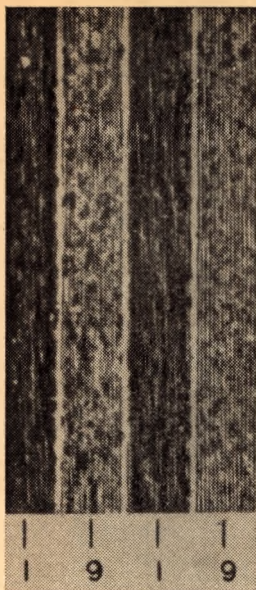


Рис. 71. Спектрограмма морского шума, принимаемого подводным акустическим устройством с противоположных сторон.

Приемник звука поочередно направляется то прямо на центр шторма, то на область, где шторма нет. На спектрограмме отчетливо видна разница в уровне шумов.

частот. Вращение винта в воде образует области повышенного и пониженного давлений. В областях пониженного давления рождаются крошечные пузырьки, которые сразу же лопаются. Каждый такой крошечный взрыв сопровождается звуком, похожим на выстрел, широкополосный спектр которого мы рассматривали в главе IV. Взрывы множества таких пузырьков, сопровождающиеся непрерывным шумом, называются кавитацией. Винт как генератор шума в принципе напоминает центр штормового вихря, поэтому с помощью приборов можно определить, откуда этот шум исходит.

В звуках кавитации отчетливо ощущается определенный ритм. Он обусловлен особенной активностью процесса вблизи водной поверхности. Оператор гидроакустического прибора, подсчитывая число ритмических ударов в минуту, на слух может оценить скорость судна (при условии, конечно, что он знает размеры винта и судна). Второй путь подсчета числа ритмических ударов — это использование в гидроакустических приборах визуального анализа звуков, аналогичного анализу речи.

**Звуки, издаваемые животными.** Рыбы и другие морские животные создают в воде шум, который можно зарегистрировать подводными микрофонами (гидрофонами). Так, киты издают одночастотный звук, похожий на вздох, а отдельные виды креветок производят звуки, напоминающие треск.

Некоторые из зарегистрированных звуков, издаваемых рыбами и морскими животными, еще не идентифицированы. Запись одного из таких звуков, в шутку названного «Зверем Барни» (по имени ученого Барни, впервые дока-

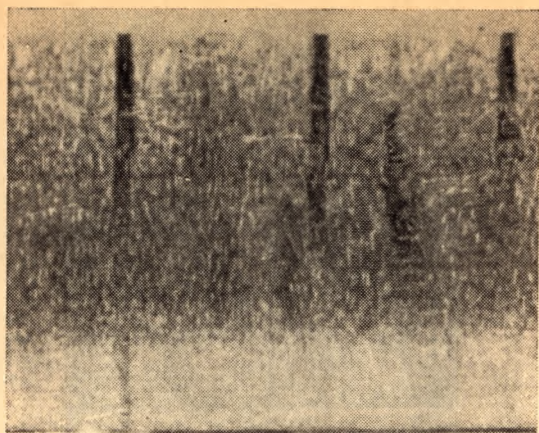
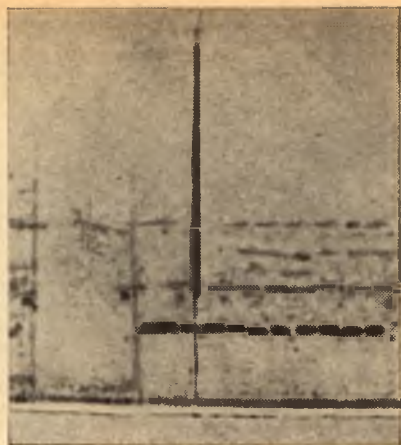


Рис. 72. Запись звуков, издаваемых морским животным.

завшего, что источник этого звука двигался по кругу), мы видим на рис. 72. Поскольку периодическая картина этого звука сохраняет устойчивость в течение нескольких минут, то кажется, что этот звук воспроизводится человеком с помощью каких-либо механизмов, например насосов или буровых устройств. Пользуясь методом корреляций, Барни установил, что источник звука двигался и, более того, звук принадлежал какому-то подводному животному. До сих пор еще не удалось установить, какое именно животное издает такой звук.

На рис. 73 представлена запись тоже нераспознанного подводного звука, который производит движущийся источник. Считается, что он также принадлежит либо глубоководной рыбе, либо глубоководному животному. Этот звук, зарегистрированный во многих местах Атлантического и Тихого океанов с частотой, равной приблизительно 20 Гц, был проанализирован Р. Х. Никольсом. Пульсирующий звук напоминает закодированное телеграфное сообщение, записанное и затем снова воспроизведенное на большой скорости. Поскольку частота этого звука мала, он слабо затухает с расстоянием в отличие от звука высокой частоты, и поэтому его можно регистрировать в очень больших областях.

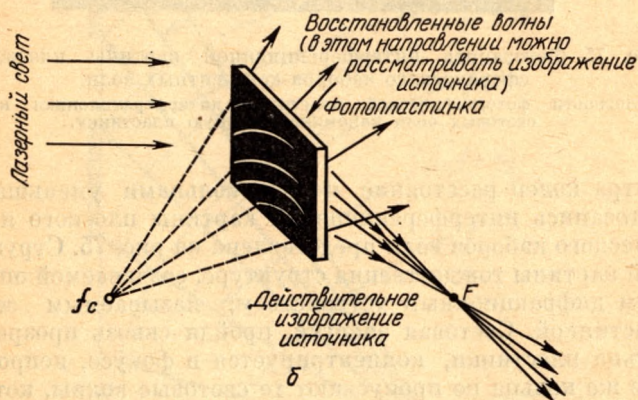
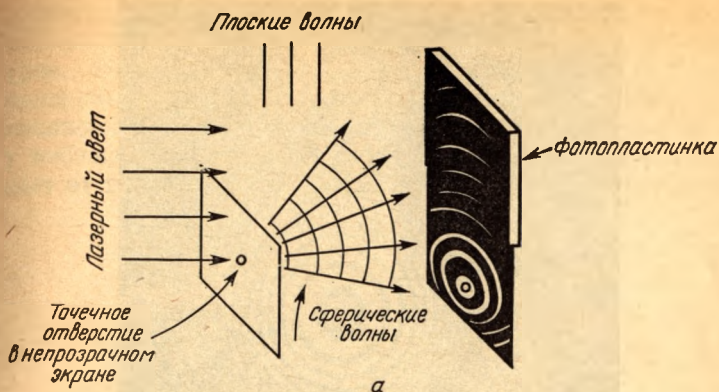


Р и с. 73. Запись подводного шума, зарегистрированного в обширных областях Атлантического и Тихого океанов. На спектрограмме отчетливо виден большой пик на частоте, примерно равной 20 Гц.

## Акустическая голография

В последние годы для записи картин звукового поля стала применяться голография. Рассматриваемая первоначально как чисто оптическое явление, сейчас голография применяется в акустике и микроволновой технике. В последних двух случаях предметы «сцены» освещаются соответственно звуковыми волнами или радиоволнами, а картина отраженных или дифрагированных волн записывается оптически, например, на фотопленку. Если осветить эту запись подобно оптической голограмме лазерным когерентным светом, то появится восстановленное изображение первоначальной «сцены», которую мы «облучали» звуковыми волнами или радиоволнами.

**Принципы голографии.** Принципы голографии проще всего объяснить, рассматривая световые голограммы как дифракционные решетки. На рис. 74, а показана фотозапись комбинации двух наборов световых волн, один из которых представляет собой плоские когерентные волны (опорный пучок), прошедшие над непрозрачным экраном с точечным отверстием, другой набор — это волны, исходящие из точечного отверстия в экране, которое и является предме-



Р и с. 74. Процесс получения и использования голограмм.

Плоские волны, интерферируя со сферическими волнами, исходящими из точечного отверстия в прозрачном экране, порождают волновую картину. Записанная на фотопленке, она представляет собой систему концентрических колец (а). Облучая даже часть такой фотопленки (фотографической зонной пластинки) лазерным светом, можно восстановить картину волн, исходящих как бы из отверстия в непрозрачном экране (б).

том исследования. Такая комбинация сферических и плоских волн создает в плоскости фотографической пластинки систему световых концентрических колец (области конструктивной интерференции). С увеличением расстояния от

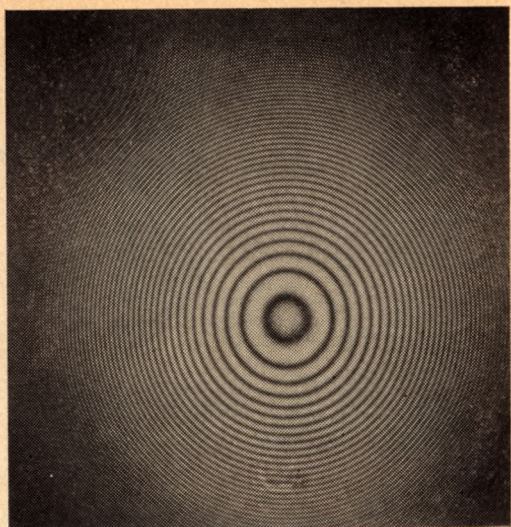


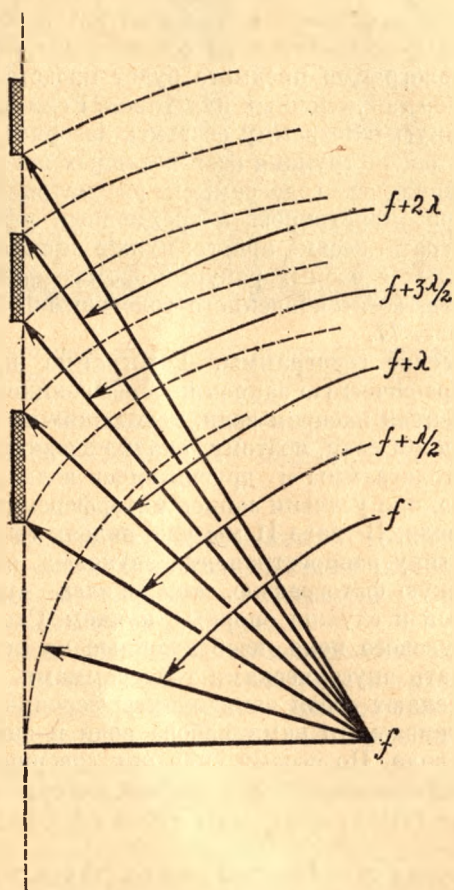
Рис. 75. Фотозапись интерференционной картины плоского и сферического наборов когерентных волн.

В плоскости фотографической пластинки интерференционная картина световых волн напоминает зонную пластинку.

центра колец расстояние между кольцами уменьшается. Фотозапись интерференционной картины плоского и сферического наборов волн представлена на рис. 75. Структура этой картины тождественна структуре, создаваемой оптическим дифракционным устройством, называемым зонной пластинкой. Световая энергия, пройдя сквозь прозрачные кольца пластинки, концентрируется в фокусе, непрозрачные же кольца не пропускают те световые волны, которые только уменьшили бы концентрацию энергии в фокусе из-за деструктивной интерференции. Поперечное сечение типичной зонной пластинки изображено на рис. 76. Из этого рисунка легко понять, как следует располагать блокирующие кольца.

Рассматривая прохождение световых волн сквозь зонную пластинку, мы обнаруживаем справа от нее не только сходящиеся волны, сфокусированные в точке  $f$ , но и набор расходящихся волн, исходящих как бы из точки  $f_c$ , сопряженной с фокусом. Оба этих набора волн показаны на рис. 74, б. Освещая голограмму лазерным светом, как это

представлено на рис. 74, а, мы получаем действительное изображение точечного отверстия справа от голограммы (рис. 74, б), кроме того, в точке, сопряженной с фокусом, появляется *мнимое* изображение точечного отверстия. Расходящиеся лучи света, фиксируемые глазом, вызвали бы у наблюдателя иллюзию, будто он видит первоначальный свет от точечного источника, расположенного за голограм-



Р и с. 76. Картина дифракции волн на зонной пластинке.

Открытые участки зонной пластинки пропускают волны, которые в фокусе конструктивно интерферируют, а непрозрачные участки препятствуют прохождению волн, которые деструктивно интерферировали бы в фокусе с волнами, прошедшими через прозрачные участки.

мой. Если бы мы сделали два отверстия в непрозрачном экране, то на фотопластинке получили бы две системы концентрических колец (две зонные пластинки). Рассматривая такую голограмму в лазерном свете, наблюдатель был бы полностью уверен в том, что он видит два точечных источника света.

Поскольку любой предмет можно рассматривать как совокупность большого количества точечных источников света различной яркости, каждый из которых будет формировать на фотопленке свою собственную зонную пластинку, то голограмма предмета будет представлять собой *суперпозицию* таких зонных пластинок. Если проявленную и закрепленную голограмму осветить лазерным светом, то будет видна реконструкция всех исходных источников света, образующих за голограммой рассматриваемый нами предмет. Продемонстрировать трехмерный реализм оптических голограмм весьма просто: нужно лишь показать несколько снятых с разных ракурсов фотографий изображения предмета, восстановленного голограммой как это показано на рис. 77.

**Акустические голограммы.** Голограмма представляет собой фотографическую запись интерференционной картины, образованной набором волн, исходящих от предмета, и опорным пучком волн, поэтому вполне очевидно, что можно сделать голограммы и других видов волнового движения, конечно, при условии записи интерференционной картины этих волн. В главе II мы уже видели сфотографированную картину распространения звуковых волн. Чтобы получить такую фотографию, понадобился второй набор волн, который и служил опорным пучком. Следовательно, картины звукового поля, изображенные на рис. 32 и 21, можно считать акустическими голограммами, поскольку они представляют собой записи интерференционных картин рассматриваемого нами набора волн и опорного пучка плоских волн. По своему виду они совершенно аналогичны интерференционным картинам когерентных световых волн, то есть представляют собой системы светлых и темных полос.

Долгое время такие записи для восстановления изображения исходной картины не использовались, они просто были интересны сами по себе, как зарисовки распространения волн. Следует отметить, что, для того чтобы записать акустическую картину полос, а затем использовать эту

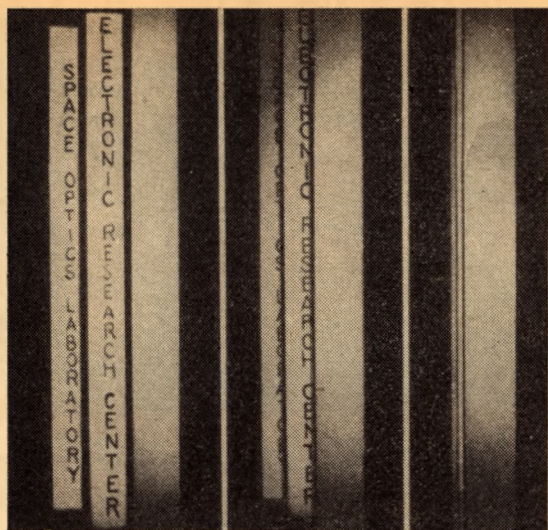


Рис. 77. Фотоснимки освещенной лазерным светом голограммы, на которой зарегистрированы изображения трех вертикальных брусков.

Перемещая последовательно фотокамеру вправо (эти три снимка были сделаны с разных ракурсов), удалось добиться такого положения, когда ближайший брусок полностью загородил собой остальные.

запись как голограмму, нужна иная методика записи, чем применялась ранее. В настоящее время акустические голограммы и восстановление с их помощью волнового фронта получены во многих лабораториях.

**Голограммы, записанные на поверхности жидкости.** Система, которая позволяет рассматривать акустические голограммы, минуя фотосъемку, изображена на рис. 78. Предмет, который представляет собой пластинку с вырезанной в центре буквой Е, помещен в жидкость и облучается снизу звуковыми волнами. Дифрагированные волны, несущие сведения о форме предмета, интерферируют с опорным пучком звуковых волн. В результате интерференции волн на поверхности жидкости образуются гребни. Стационарная интерференционная картина звуковых волн деформирует поверхность жидкость — газ (рис. 78). Гребни на поверхности жидкости соответствуют полосам на обычной голограмме. Чтобы получить изображение поме-

щенного в жидкость предмета с помощью такой акустической голограммы, ее необходимо осветить лазерным светом, который при отражении дифрагирует на гребнях голограммы. Схема получения акустических голограмм,

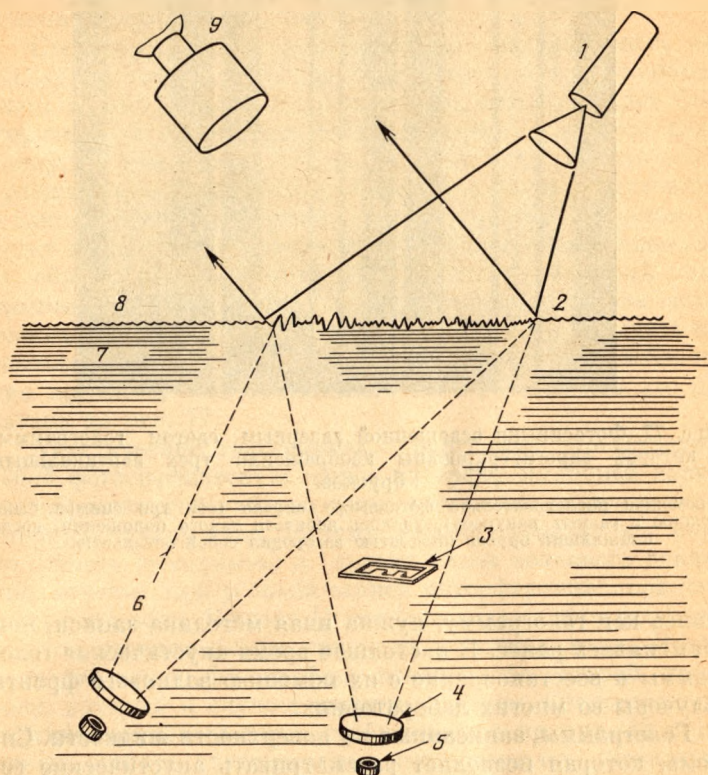
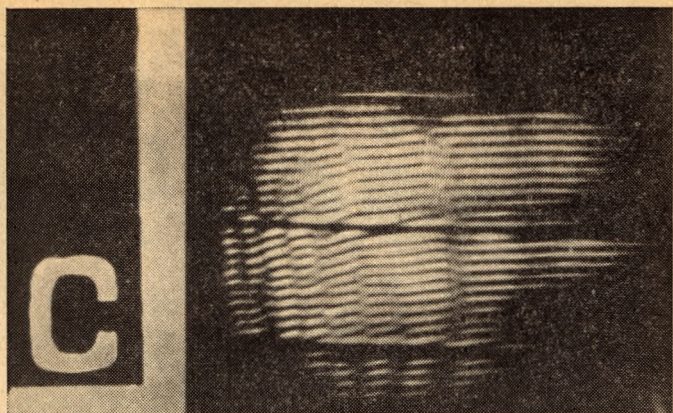


Рис. 78. Основные элементы системы для получения и использования акустической голограммы.

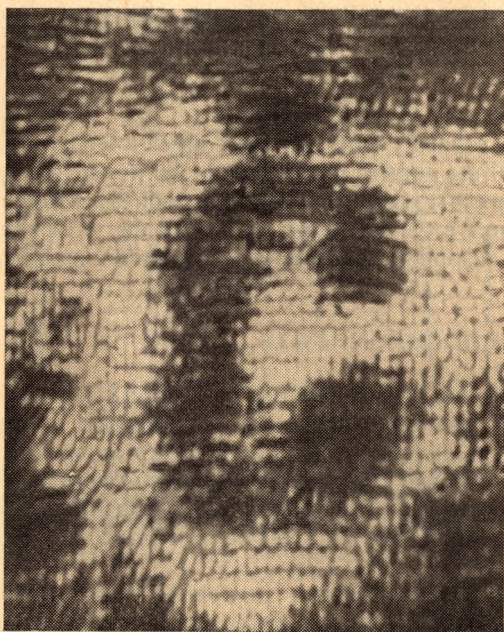
1 — лазер; 2 — звуковая голограмма; 3 — объект; 4 — акустическая линза; 5 — кварцевый кристалл; 6 — опорный пучок волн; 7 — вода; 8 — воздух; 9 — телескопический объектив.

изображенная на рис. 78, была предложена Р. К. Мюллером.

Часто при подводных исследованиях видимость вблизи дна оказывается очень плохой, что исключает использование оптических методов. Акустические методы, основанные на использовании сонаров, тоже дают неважные ре-



Р и с. 79. Акустическая голограмма буквы С, показанной слева.



Р и с. 80. Восстановленное изображение буквы С, записанное на голограмме, представленной справа на рис. 79.

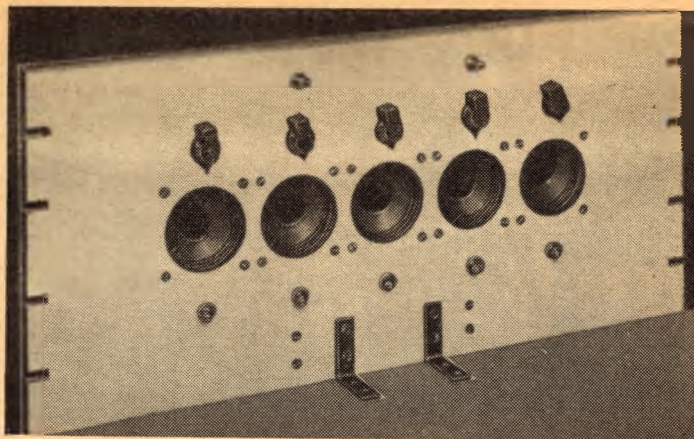


Рис. 81. Пять громкоговорителей, расстояние между которыми равно одной четверти длины волны.

Если полярности испускаемых соседними динамиками звуковых волн противоположны, то такая система создает сверхнаправленную картину излучения звука.

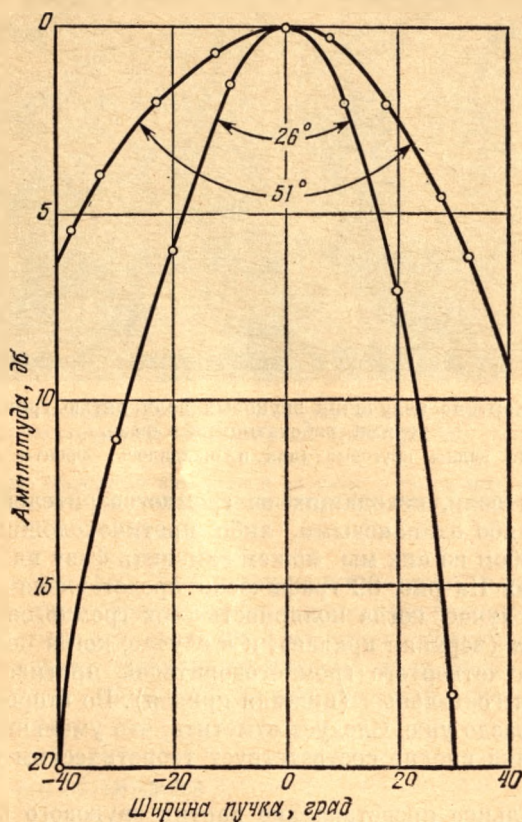
аультаты, гораздо худшие, чем акустическая голография. На рис. 79 вы видите фотографию звуковой интерференционной картины (голограммы), а изображение, восстановленное этой акустической голограммой, облученной когерентным лазерным светом, представлено на рис. 80.

## Сверхнаправленность

Визуальное представление некоторых картин звукового поля часто помогает выяснить те причины и явления, которые вызвали существование именно данной структуры поля. В качестве примера рассмотрим вопрос о сверхнаправленности в процессе излучения или приема волн. Теорию этого процесса многие ученые долгое время не принимали.

Из классической оптики мы знаем, что угловое расхождение пучка волн определяется отношением длины волны к размерам апертуры. Например, если ширина апертуры или ряда апертур равна  $L$ , то угловое расхождение пучка (граница пучка определяется точками, в которых интен-

сивность снижается вдвое) дается выражением  $51 \lambda/L$ , где  $\lambda$  — длина волны. Из теории сверхнаправленности следует, что если взять ряд динамиков одинаковой длины, которые работают в противофазе по отношению друг к другу, то



Р и с. 82. Ширина звуковых пучков, излученных пятью громкоговорителями, показанными на рис. 81.

Когда все пять громкоговорителей работают в фазе, угловое расхождение излученного звукового пучка (на уровне в 3 дБ) равно  $51^\circ$ . Если же фазы громкоговорителей противоположны, то угловое расхождение пучка оказывается равным  $26^\circ$ .

можно получить более узкий пучок, чем это следует из формулы, рассмотренной выше.

На рис. 81 показаны пять выстроенных в ряд громкоговорителей. Все громкоговорители включаются параллель-

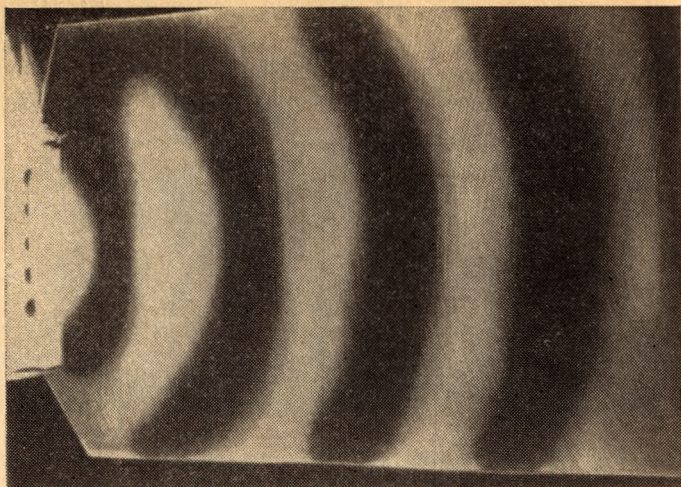


Рис. 83. Картина излучения звуковых волн пятью громкоговори-  
телями, работающими в фазе.

Хорошо видны круговые (как и ожидалось) фронты волн.

но. Фазы волн, исходящих из громкоговорителей, можно сделать либо одинаковыми, либо противоположными, то есть в любом из них мы можем заменить фазу на противоположную. На рис. 82 графически представлена ширина пучка в случае, когда полярность всех громкоговорителей одинакова (верхняя кривая), и в случае, когда полярность второго и четвертого громкоговорителей противоположна полярности остальных (нижняя кривая). Во втором случае пучок гораздо уже. Следует отметить, что уменьшение ширины пучка вполне соответствует теоретическим предсказаниям.

Визуальное представление картин звукового поля для каждого из этих двух случаев показано на рис. 83 и 84. Влияние полярности на структуру поля очевидно. Когда все громкоговорители работают в фазе (рис. 83), они излучают волны, фронт которых имеет кривизну. Плоские волны в этом случае существуют лишь вблизи громкоговорителей. В случае же сверхнаправленного излучения (рис. 84) мы видим плоские волны на всей картине излучения. Более того, линейные размеры плоских фронтов волн для любого участка поля со значительной интенсивностью, или яркостью, становятся намного больше длины системы пяти

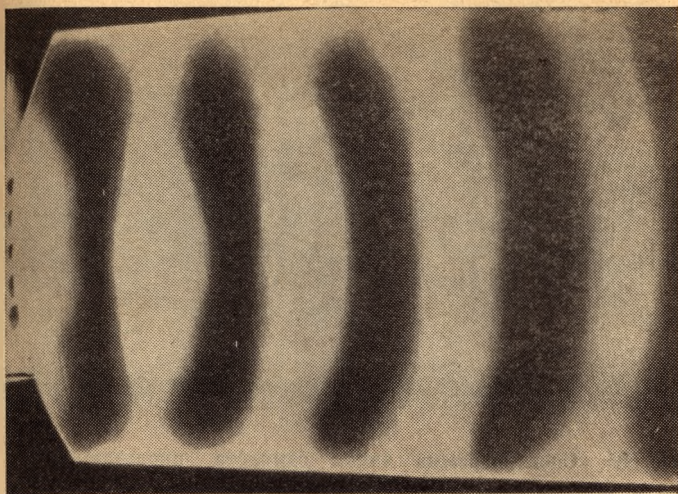


Рис. 84. Картина излучения звуковых волн пятью громкоговорятелями, работающими в противофазе (каждый по отношению к соседним).

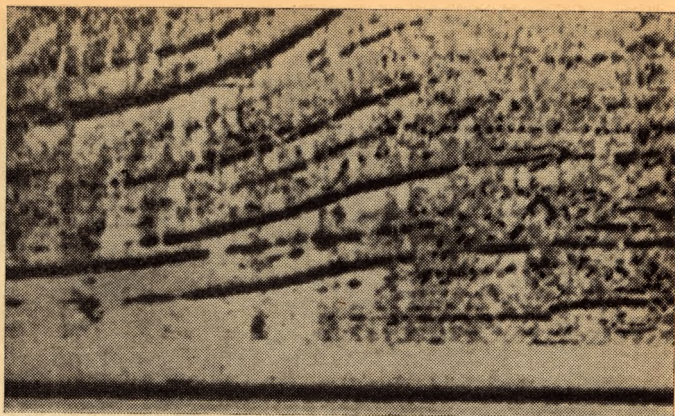
Фронты волн становятся близкими к плоским, в результате чего и появляется большая направленность излучения звука.

громкоговорителей. Точно такую же картину плоских волновых фронтов образовали бы волны, излученные системой больших размеров, состоящей из громкоговорителей, работающих в фазе. При этом эта система дала бы более узкий пучок, нежели точно так же подключенная система меньших размеров.

## Звуки механизмов

Звуковой спектрограф позволяет изучать особенности звуков, издаваемых самыми разными мощными энергетическими установками.

На рис. 85 показана запись звука винтового самолета, пролетающего над головой наблюдателя. В начале и в конце записи мы видим многочисленные линии (частоты), относящиеся к вибрациям поршня двигателя и шуму пропеллера. Вследствие эффекта Доплера эти линии во время записи сдвигаются по частоте. Когда самолет приближается к наблюдателю (либо записывающему прибору), часто-

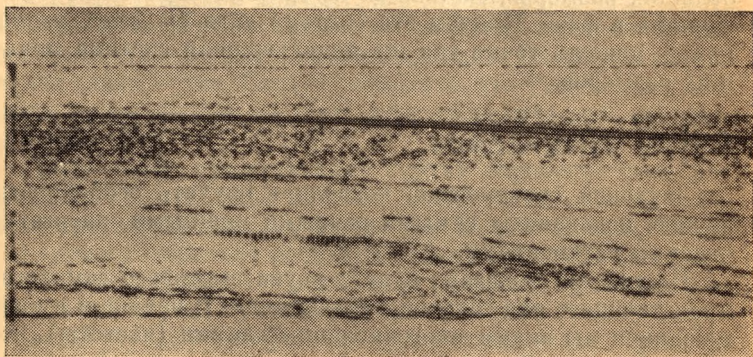


**Р и с. 85.** Спектрограмма звука самолета, пролетающего над головой наблюдателя.

Отчетливо виден доплеровский сдвиг в частотных компонентах звука. (Время увеличивается справа налево.)

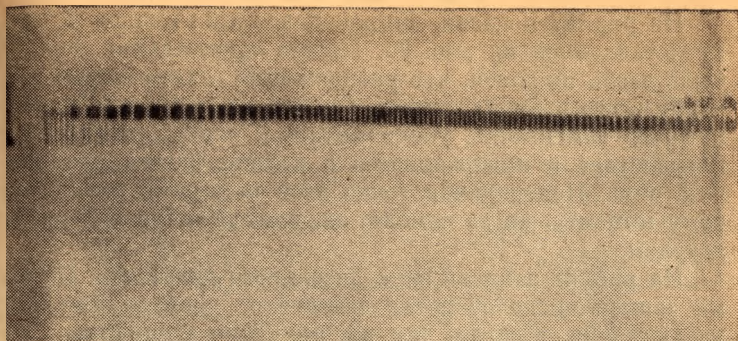
та звука из-за движения самолета повышается; когда же он удаляется, то частота звука падает.

Очень интересная частотная картина звука возникает благодаря эффекту Доплера при комбинации сигнала, полученного микрофоном, с тем же самым сигналом, слегка



**Р и с. 86.** Расщепление частотной линии.

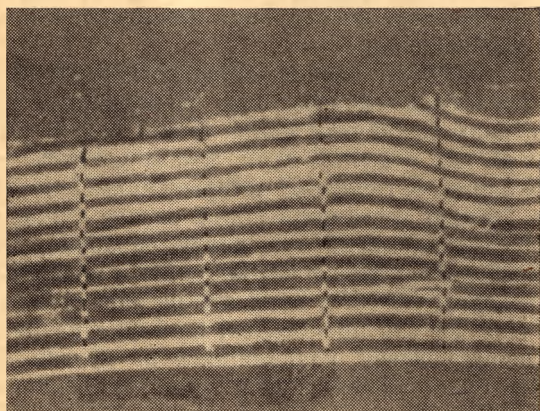
Если к звуку самолета добавлять тот же звук, но слегка задержанный во времени, то на наклонном участке частотной линии появится еще одна линия, лежащая близко к первой.



Р и с. 87. Картина биений.

Широкополосный анализ записи, представленной на рис. 86, обнаруживает биения, возникающие в результате сложения двух сигналов. Наиболее сильные биения наблюдаются в центре полосы.

задержанным во времени. На рис. 86 представлен узкополосный частотный анализ такого комбинированного сигнала с одной очень сильной частотной компонентой. В начале и в конце сигнала ничего необычного не наблюдается. Но там, где происходит уменьшение частоты, частоты основного и задержанного во времени сигналов в данный момент изменяются на разные величины, в результате чего частотная линия расщепляется и появляются две линии.



Р и с. 88. Спектрограмма звука дизельного двигателя.  
Звук состоит из большого количества гармоник.

На рис. 87 показан широкополосный анализ записи, представленной на рис. 86. Полоса пропускания фильтра была столь широкой, что расщепление линии видно в течение всего времени записи. Однако из-за биений, частота которых изменяется, увеличиваясь к центру, линии «расплываются» и превращаются в полосу, слегка наклоненную вниз. Центральная точка этой полосы соответствует тому моменту, когда самолет находится точно над наблюдателем.

На рис. 88 записан звук дизельного двигателя. Во время записи число оборотов двигателя сначала медленно увеличивали, а потом так же медленно уменьшали. При увеличении числа оборотов двигателя частоты основной и высших гармоник возрастают. Максимальное разделение гармоник происходит при наибольшей скорости вращения.

## Звуки видеотелефона

Для того чтобы, разговаривая по телефону, видеть собеседника, необходимо модифицировать передающее и приемное устройства. В одном из экспериментальных вариантов видеотелефонной связи объем информации о внешнем облике собеседников уменьшали, опуская несущественные детали (черты лица), «оставшуюся» информацию передавали только в течение каждых 2 с. Это позволило весь сигнал изображения передавать по обычной телефонной линии. Но за простоту конструкции приходилось платить качеством изображения.

Частота сигналов изображения, посланных по звуковому каналу, находится в области радиочастот. Принимая такие сигналы на другом конце линии связи, мы восприняли бы их как обычный звук. Чтобы увидеть *такие* звуки, необходимы устройства, которые применяются в телевидении. Прежде всего пришедший сигнал нужно записать в течение 2 с на магнитную ленту барабана, затем несколько раз один и тот же сигнал снять с магнитной ленты (барабан делает 30 об/с) и подать на электронно-лучевую трубку. Как все это происходит, показано на рис. 89. Таким образом, человек, находящийся на другом конце линии связи, будет видеть одно и то же изображение своего собеседника в течение 2 с, повторенное 60 раз<sup>1</sup>. В то же

<sup>1</sup> Изображение будет неподвижным, поскольку разрешающая способность человеческого глаза равна 0,1 с.— *Прим. перев.*

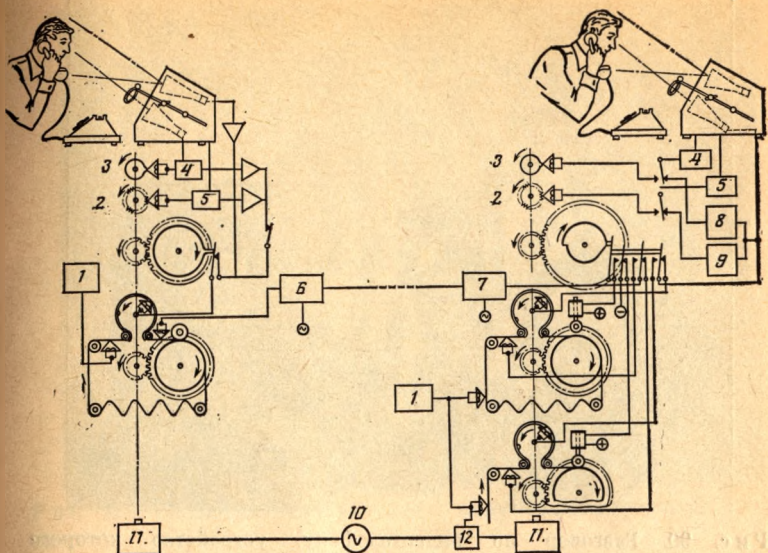


Рис. 89. Схема устройства видеотелефона.

Такая система позволяет передавать информацию об изображении по обычной телефонной линии.

1 — осциллятор; 2 — шестерня с 60 зубьями; 3 — однозубчатая шестерня; 4 — вертикальная развертка; 5 — горизонтальная развертка; 6 — модулятор; 7 — демодулятор; 8, 9 — устройства для синхронного разделения сигнала; 10 — генератор; 11 — синхронный мотор (20 об/с); 12 — регулятор фазы.

самое время на втором барабане с магнитной лентой будет записываться следующий пришедший сигнал, который потом можно будет увидеть в последующие 2 с. На рис. 90 показан внешний вид видеотелефона. Изображение, полученное на экране электронно-лучевой трубки, помещено слева.

Другой способ получения видимого изображения основан на принципе, применяемом в звуковом спектрографе Поттера. В течение тех 2 с, когда изображение передается в виде звуковых сигналов, стальная игла (либо вращающаяся спиральная проволока) несколько раз пробегает вверх — вниз по бумаге прямоугольной формы. Эта электрочувствительная бумага, аналогичная той, которая применяется в звуковом спектрографе, под действием сильных электрических сигналов становится черной, под действием слабых сигналов — серой и остается белой, если сигналы



Рис. 90. Разговор по видеотелефону, устройство которого представлено на рис. 89.  
Вставка слева показывает ограниченное разрешение изображения.

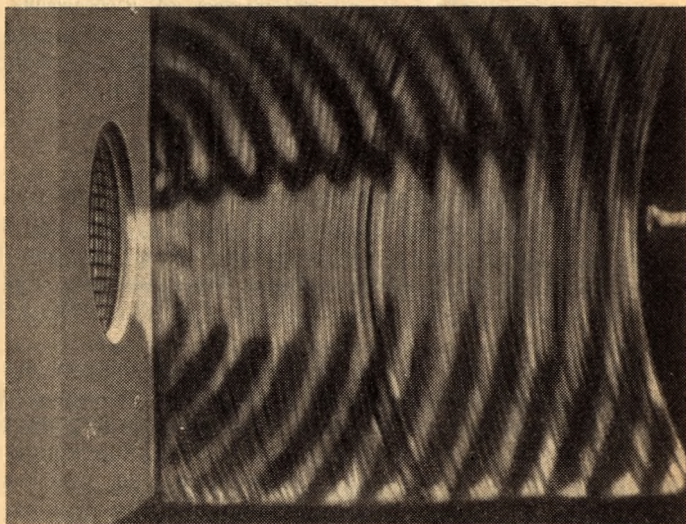
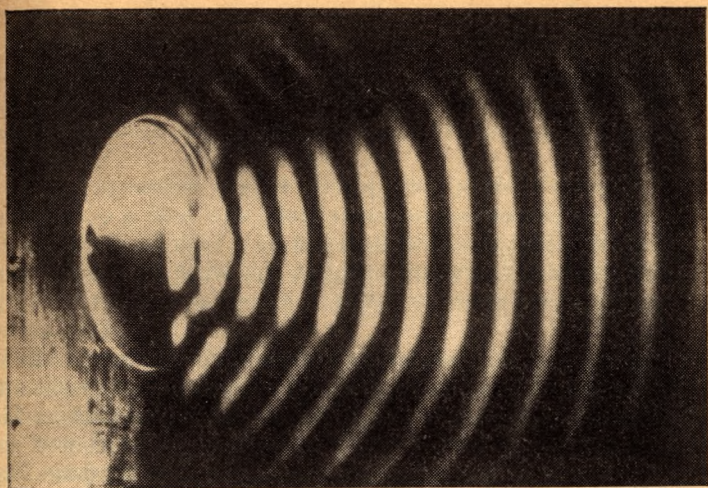


Рис. 91. Асимметричная картина излучения звуковых волн громкоговорителем.  
Асимметрия излучения указывает на неисправность громкоговорителя.



Р и с. 92. Симметричная картина излучения звуковых волн громкоговорителем.

слишком слабые или отсутствуют совсем. Приходящий сигнал «печатается» на бумаге в течение 2 с. Пока говорящий по телефону видит полученное изображение своего собеседника, другое изображение, пришедшее с последующим сигналом в эти же самые 2 с, печатается на бумаге.

### Картины звуковых волн, исходящих из громкоговорителей

Визуальное представление картин звукового поля, излученного громкоговорителями, помогает оценить качество сборки динамика. На рис. 91 мы видим совершенно асимметричную картину излучения звука. Сразу за центральным максимумом сверху имеется темная полоса (зона тишины), снизу же такой зоны нет. Более симметричная картина излучения звука (рис. 92) говорит нам о высоких акустических свойствах громкоговорителя.

## Послесловие

---

Предложенная вниманию советского читателя книга «Видимый звук» является третьей научно-популярной книгой Уинстона Е. Кока, изданной в Советском Союзе. Как и в двух предыдущих книгах «Звуковые и световые волны» (изд-во «Мир», 1966) и «Лазеры и голография. Введение в когерентную оптику» (изд-во «Мир», 1971), автор излагает в ней вопросы, относящиеся к старейшим разделам физики — акустике и оптике.

Казалось бы, что нового и интересного можно рассказать о предмете, история изучения которого исчисляется не одним тысячелетием? Однако для современного развития науки, и в частности физики, характерно, что наряду с созданием и бурным развитием ее новых направлений (например, физики плазмы) стремительный толчок получают и старые, традиционные области. К существующим в настоящее время «горячим точкам» физики (определяемым по количеству публикаций и практических исследований этого направления) относятся и некоторые разделы акустики и оптики.

Круг проблем, рассматриваемых сегодня акустикой, весьма существенно отличается от того, что являлось предметом исследований 30—40 лет назад. Наряду с такими традиционными проблемами, как музыкальная акустика, речь в ее акустическом аспекте, электроакустика, строительная и архитектурная акустика, в исследованиях прочное место заняли и совершенно новые проблемы: распознавание звуковых образов, акустическая голография, акустооптика, нелинейная акустика, квантовая акустика, молекулярная и прикладная ультраакустика, акустика океана, геоакустика, аэротермоакустика, акустика эхолоцирующих животных, воздействие шумов и вибраций на человека,

медицинская акустика и т. п. То же самое наблюдается и в оптике. Уже давно научные конференции посвящаются только отдельным ее разделам, так как специалисты в одних областях этой части физики оказываются незнакомыми с узкими вопросами, относящимися к другим ее разделам.

Я не случайно говорю одновременно об акустике и оптике. Дело в том, что настоящая книга посвящена не просто звуку (акустике), но и его оптическому представлению, оптическим методам его анализа, вместе с тем она касается более тонких вопросов — связи звука и света. Какие же это вопросы?

Заметим, что У. Кок не дает определения понятию, которое он вынес в название своей книги. Понятие «видимый» обычно ассоциируется с предметом, информацию о котором переносит свет, либо излучаемый атомами этого предмета, либо отражаемый или пропускаемый ими.

Звук, так же как и свет, может излучаться предметом, отражаться от него, проходить сквозь предмет с различной степенью поглощения и создавать звуковые изображения предмета. Видимый звук в этом случае — это воспроизведенное в свете звуковое изображение предмета. Проблема визуализации звукового изображения имеет чрезвычайно важное практическое значение, так как звук может хорошо распространяться в тех средах, в которых свет либо совсем не распространяется, либо поглощается или рассеивается настолько быстро, что не успевает донести изображение предмета до зрителя или приемника светового изображения.

Получение видимого изображения предмета путем визуализации электромагнитного излучения, более длинноволнового, чем видимый свет (например, радиоволны), или более коротковолнового (например, рентгеновские лучи), по тем или иным причинам часто также оказывается невозможным или непригодным. В таких случаях выручает визуализация звукового изображения.

Итак, одна сторона взаимосвязи звука и света заключается в визуализации звуковых изображений предметов, а другая — в визуализации явлений, связанных с распространением звука. Визуализация распространения звука позволяет хорошо иллюстрировать и представлять в виде моделей волновые процессы, характерные и для звука, и для оптических явлений. Речь идет не только о явлениях

интерференции и дифракции волн, о которых говорится в настоящей книге, но и об изучении на соответствующих моделях особенностей распространения как звуковых, так и радио- и световых волн с учетом этих явлений в исследуемых ситуациях.

Практическое применение визуализации явлений, связанных с распространением звука, для изучения самого звука и его источников хорошо показано в книге. Однако зачем моделировать распространение света и изучать его на особенностях распространения звука, если свет непосредственно воздействует на наши органы зрения и позволяет судить о некоторых его характеристиках? Дело в том, что из-за малых размеров волны света (приблизительно от  $4 \cdot 10^{-5}$  до  $7,6 \cdot 10^{-5}$  см) и главным образом вследствие высоких частот световых колебаний (соответственно приблизительно от  $7,5 \cdot 10^{14}$  до  $4 \cdot 10^{14}$  Гц) как глаз, так и другие приемники света способны регистрировать лишь интенсивность света, но не фиксируют мгновенную структуру волнового поля. В то же время косвенным путем, с помощью явления интерференции, можно получить картину светового волнового фронта и даже восстановить его в отсутствие предмета, под воздействием которого возник этот фронт. В таких случаях используют голографический метод записи и восстановления волнового фронта.

При исследовании звука мы имеем дело с частотами, намного меньшими, чем световые: от десятков до тысяч герц для слышимого звука и до единиц и десятков гигагерц в ультразвуковой области. Для таких частот имеются приемники, способные записать характеристики звука за интервал времени, составляющий долю периода, и, следовательно, зарегистрировать в данной точке как фазу, так и амплитуду звуковой волны. Но наряду с непосредственной записью в акустике, как и в оптической голографии, для записи фронта звуковой волны пользуются явлением интерференции. Благодаря некоторым особенностям взаимодействия световых и звуковых волн восстанавливать волновой фронт можно не только с помощью звуковой волны, но и с помощью света. Это взаимодействие представляет собой третье направление в проблеме связи между звуком и светом. Можно сказать, что уже сформировалось новое направление, которое рассматривает механизм и особенности такого взаимодействия, — акустооптика. Практическую важность этого направления мы покажем ниже.

Возвращаясь же к книге, заметим, что У. Кок наиболее подробно излагает вопросы визуализации процессов распространения звука (главы II—IV) и анализа звуков с помощью спектрограмм и более сложных картин, отражающих характеристики звука. Интересны главы о структуре речи (глава V) и структуре музыкальных фраз (глава VI). В известной степени продолжением этих глав служит глава VII, в которой даются иллюстрации звуков механизмов и различных морских шумов (штормовых ветров, голосов морских животных, шума винта и т. п.). Однако эта глава представляется наименее удачной: в ней несколько беспорядочно собраны самые разные вопросы, относящиеся к методологии анализа и визуализации звуков и к их иллюстрации. Такая важная проблема, как визуализация звуковых изображений, лишь затронута, а проблема взаимодействия звука со светом практически не рассматривается. Однако без рассмотрения этих проблем картина визуализации звуков оказывается неполной.

Остановимся коротко на этих двух проблемах.

Чтобы звуковые изображения сделать видимыми, необходимо прямо или косвенно с помощью звука промодулировать световой пучок. В самом общем случае при такой модуляции волновой фронт светового пучка должен иметь распределение амплитуд и фаз, соответствующее (но, очевидно, не тождественное) распределению амплитуд и фаз в звуковом изображении. Наиболее часто (практически во всех случаях, за исключением акустической голографии) производится модуляция с помощью звукового изображения распределения интенсивностей светового пучка (которое, как известно, соответствует распределению квадратов амплитуд световых колебаний).

Прямая визуализация звуковых изображений, очевидно, может быть осуществлена только в результате непосредственного взаимодействия звука со светом. Такое взаимодействие носит сложный характер, поэтому на пути осуществления прямой визуализации встречаются значительные трудности. К достоинствам этого метода следует отнести возможность видеть звуковые изображения в те же моменты времени, в какие они возникают, иными словами, в реальном масштабе времени.

Непрямая визуализация звукового изображения является процессом многоступенчатым и осуществляется с некоторым запаздыванием к моментам образования звуково-

го изображения. В этом случае, пользуясь действием звуковых волн (механическим, химическим, тепловым и т. д.), можно записать звуковые изображения в виде распределения оптических свойств некоторых материалов (таких, как прозрачность, коэффициент отражения и т. п.) или в виде распределения электрических или других характеристик. Последние могут быть в свою очередь преобразованы в распределение оптических свойств, с помощью которого может быть получено видимое звуковое изображение.

Техника визуализации звуковых изображений к настоящему времени достигла сравнительно высокого уровня, хотя и сейчас еще содержит немало нерешенных проблем. Основные ее идеи еще в 30-е годы были сформулированы как советскими учеными (С. Я. Соколов с сотрудниками и др.), так и учеными других стран.

Необходимым этапом развития средств визуализации звуковых изображений явились успехи в области ультразвука, чему в немалой степени способствовали работы советских ученых И. Г. Михайлова, Л. Д. Розенберга и др. Ультразвуковые колебания отличаются от слышимых лишь более высокими частотами — свыше 10—15 кГц. Формирование звукового изображения с помощью ультразвука позволяет получать более четкое изображение; благодаря короткой длине волн значительно лучше передаются границы предметов и мелкие детали. Было бы удобным во многих отношениях, если бы длина волны звуковых колебаний была близка к длине световой волны. Поскольку скорость звука значительно меньше скорости света (всего 332 м/с в воздухе и несколько тысяч метров в секунду в жидких и твердых телах), длину волны звука, равную длине волны света, можно получить лишь при значительно меньших частотах, чем световые. Так, например, длину звуковых волн в воде, равную длине волны зеленого света, можно достичь при частоте  $3 \cdot 10^9$  Гц. Следует отметить, что эта частота в жидкостях является максимальной (в твердых телах около  $10^{11}$  Гц), при этом поглощение звуковых волн столь велико, что о звуковом изображении говорить не приходится. Что же касается частот  $10^7$ — $10^8$  Гц, то эта область, в которой длины волн измеряются десятками и сотыми долями миллиметра, является достаточно доступной для формирования звукового изображения.

До 60-х годов развитие техники визуализации звуковых

изображений шло по двум направлениям: по пути создания ультразвуковых камер и по пути разработки устройств типа звуковых локаторов. В ультразвуковых камерах звуковое изображение формируется с помощью системы акустических линз и отражателей или методом теневой проекции на чувствительном к звуковым волнам детекторе, с помощью которого осуществляется дальнейшее преобразование звукового изображения в видимое. Частоты ультразвуковых колебаний при использовании таких устройств лежат в области нескольких мегагерц. Эти устройства наиболее часто используются при неразрушающем контроле и в медицинской диагностике.

Устройства типа звуковых локаторов синтезируют видимое изображение. Принцип их действия подобен принципу действия устройств, используемых в радиолокационной технике. С помощью отдельных элементов или решетки с механическим или электрическим сканированием в роли приемников звуковых импульсов, их передатчиков или того и другого одновременно определяется время и направление прихода отраженного импульсного звукового сигнала. Известны передвижные и неподвижные системы, используемые для локационных целей, которые создают видимое изображение звука в широком диапазоне частот от десятков герц до нескольких мегагерц. Такие устройства используются главным образом для видения под водой, однако область их использования может распространяться и на неразрушающий контроль образцов и на медицинскую диагностику.

Развитие голографии вообще и акустической голографии в частности внесло в технику визуализации звука новые плодотворные идеи и стимулировало развитие ультразвуковых камер и звуковых локаторов.

Акустическая голография позволила существенно повысить качество и содержательность визуализированного звукового изображения. Это связано с особенностями голографического метода:

- 1) принципиальной возможностью получить изображение объемного характера, образованное световым волновым фронтом от голограммы, записанной звуковой волной. Это может оказаться особенно полезным в медицинской диагностике. Следует только иметь в виду, что практическая реализация такого объемного видения звукового изображения сопряжена со значительными трудностями, кро-

ме того, возникают искажения в размере по глубине, связанные с различием длин звуковой и световой волн;

2) акустическая голография в некоторых своих вариантах позволяет использовать линзы для формирования изображения только на оптической его ступени. Возможность обойтись без помощи акустических линз позволяет существенно повысить качество полученного светового изображения, так как оптические линзы вносят намного меньше искажений;

3) акустическая голограмма представляется в виде, удобном для оптической обработки информации с целью улучшения качества и содержательности изображения. Дело в том, что одним из серьезных недостатков метода визуализации звукового изображения при неразрушающем контроле образцов является соразмерность представляющих интерес деталей с пределом разрешения. Размер этих деталей может колебаться от единиц до нескольких десятков длин волн, в результате чего создается ситуация, подобная той, которая имеет место при формировании изображения в микроскопе. Методы оптической обработки в когерентном свете позволяют повысить контрастность изображения, сделать его более четким и резким, отчего становятся лучше различимыми мелкие детали. Другой путь заключается в том, чтобы с помощью ЭВМ по акустической голограмме рассчитать и визуализировать изображения, свободные от искажений и, следовательно, максимально высокого качества;

4) различимость мелких деталей может быть также увеличена при использовании в акустике схемы, известной в радиолокации как схема синтеза апертуры.

Перечисленных особенностей вполне достаточно, чтобы обратить на акустическую голографию самое пристальное внимание, несмотря на ряд трудностей технического характера, которые возникают при реализации на ее основе различных визуализирующих устройств. Независимо от того, визуализируется ли звуковое изображение по акустической голограмме или создается непосредственно, необходимо иметь детекторы, чувствительные к действию звуковых волн. Прежде всего это детекторы, чувствительные к интенсивности звука. Наиболее распространенным детектором такого рода (кетати, использованным в устройстве, описанном в главе VII) служит поверхность раздела между жидкостью и газом. Звуковая волна, падающая на поверх-

ность раздела, создает на ней давление, пропорциональное интенсивности волны. Под действием звукового давления поверхность деформируется до величин, при которых давление уравнивается силами тяжести и поверхностного натяжения. Поверхностный рельеф при этом отражает картину распределения интенсивности звуковой волны.

Одним из первых детекторов, чувствительных к интенсивности звука, была фотопластинка, погруженная в кювету с проявителем. Фотопластинка, предварительно засвеченная обычным светом, погружается в кювету с проявителем таким образом, чтобы ультразвук, распространяющийся в кювете, встречал ее на своем пути. В тех областях, где интенсивность ультразвука больше, проявление происходит быстрее. После закрепления на фотопластинке можно увидеть картину распределения интенсивности звука.

Существуют также химические детекторы, использующие реакцию выделения иода из раствора иодистого калия, происходящую под действием ультразвука, причем скорость этой реакции пропорциональна интенсивности ультразвука. Однако чувствительность этого метода, как и фотографического, невелика.

Более высокой чувствительностью обладают тепловые детекторы, действие которых основано на использовании тепла, выделяющегося при поглощении ультразвука. В качестве примера такого детектора может служить детектор, основанный на термогашении флуоресценции. Предварительно возбужденный флуоресцентный фосфор облучается ультразвуковым пучком, при этом в тех местах, куда попадает ультразвук, свечение фосфора вследствие нагрева ослабляется, ослабление происходит пропорционально интенсивности ультразвука. Таким образом, мы получаем негативное изображение ультразвукового поля.

Из всех описанных выше детекторов, чувствительных к интенсивности звука, наибольшей чувствительностью обладает поверхность раздела между жидкостью и газом.

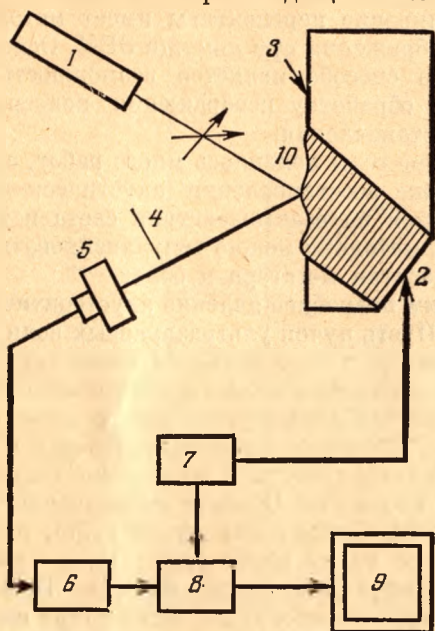
Кроме детекторов, чувствительных к интенсивности звука, существуют детекторы, чувствительные к амплитуде. Простейшим детектором такого рода, позволяющим осуществлять выборочные измерения стационарного (то есть не изменяющегося во времени) акустического поля, может служить описанный в главе II перемещающийся микрофон. Этот микрофон фиксирует амплитуду звуковых колебаний в каждой точке акустического поля. Основным

недостатком этого детектора является большое время получения изображения ультразвукового поля. Значительно меньшее время может обеспечить, например, пьезоэлектрический детектор, известный как трубка Соколова. В нем ультразвуковые колебания воздействуют на пластину кварца. Пьезоэффект создает на пластине переменный потенциальный рельеф. Будучи помещенной в телевизионную передающую трубку, пластина кварца потенциальным рельефом будет модулировать поток вторичных электронов, выбиваемых быстрыми электронами первичного пучка, который сканирует пластинку. Модулированный поток вторичных электронов образует видеосигналы, которые после соответствующей обработки подаются на вход воспроизводящего устройства и создают на экране приемной трубки изображение акустического поля.

Одним из наиболее совершенных детекторов, чувствительных к амплитуде, является прибор, в котором используется динамическая деформация поверхности. В нем происходит отражение лазерного света от зеркальной пленки, деформированной ультразвуковыми колебаниями. Принципиальное отличие этого детектора от детектора, изображенного на рис. 78 (поверхность раздела между жидкостью и газом), заключается в том, что в последнем деформация поверхности раздела вызывается давлением, пропорциональным интенсивности звука. В нашем случае колеблется мембрана, прозрачная для ультразвуковых колебаний, но принимающая участие в колебательном движении среды при прохождении через нее звука. Отклонение каждой точки этой мембраны от равновесного положения пропорционально амплитуде ультразвуковых колебаний. В результате на мембране отражается распределение мгновенных амплитуд звуковой волны. Содержащий такую информацию участок мембраны (рис. I) сканируется лазерным пучком, отклоняющимся по законам телевизионной развертки. При отражении лазерный луч модулируется по фазе из-за различия в пути лазерного луча, соответствующего положению мембраны. Когда лазерный луч после отражения падает на прикрытый ножевой апертурой фотодиод, в последнем создается электрический сигнал, пропорциональный мгновенному значению амплитуды звуковой волны в точке, от которой отразился луч. Этот электрический сигнал смешивается с электрическим сигналом, представляющим опорную волну. В результате на телевизион-

ное видеоконтрольное устройство поступает видеосигнал акустической голограммы, которая визуализируется на экране приемной телевизионной трубки.

Наиболее простой метод восстановления изображения сводится к фотографированию акустической голограммы с экрана телевизионной воспроизводящей системы и к ис-



Р и с. 1. Использование мембранного амплитудного детектора для получения изображения акустической голограммы.

1 — сканирующий лазер; 2 — преобразователь; 3 — отражающее покрытие; 4 — ножевая диафрагма; 5 — фотодиод; 6 — усилитель; 7 — генератор; 8 — смеситель; 9 — телевизионный монитор; 10 — мембрана.

пользованию полученного фототранспаранта в качестве оптической голограммы, подлежащей восстановлению обычным способом. Серьезным недостатком этого метода является значительная задержка во времени между моментами формирования голограммы и восстановления изображения. Для воспроизводящей системы, работающей в реальном масштабе времени, такой недостаток недопустим. Он может быть устранен, например, путем использования варианта приемной телевизионной трубки, на экране которой

под действием электронного луча изменяется пропускание света. Просвечивая экран светом лазера, можно получить изображение объекта, записанное сначала в виде акустической голограммы.

Кроме описанных выше устройств визуализации звукового изображения или восстановления с акустической голограммы, широкие перспективы имеет методика восстановления изображения при помощи ЭВМ. Основным достоинством этого способа является возможность проводить комплексную обработку изображения непосредственно в процессе восстановления.

В последние годы появилось много работ, посвященных новой методике восстановления акустических изображений, основанной на взаимодействии света и звука. С помощью такой методики можно визуализировать ультразвук частотой в десятки мегагерц и более.

Рассмотрим подробнее явление акустооптического взаимодействия. Пусть пучок ультразвуковых волн распространяется, например, в воде. Звуковая волна в среде представляет собой движущиеся области повышенного и пониженного давлений или повышенной или пониженной плотности вещества. Областям высокой плотности соответствует более высокий показатель преломления света, чем областям низкой плотности. Области высокой плотности будут служить «препятствием» для пучка света, падающего на ультразвуковую волну сбоку (рис. II), а области низкой плотности — дифракционными щелями. При этом часть пучка света может отклоняться. Если длина волны ультразвука значительно меньше ширины звукового пучка<sup>1</sup>, то отклонение света происходит лишь в случае соблюдения следующих условий.

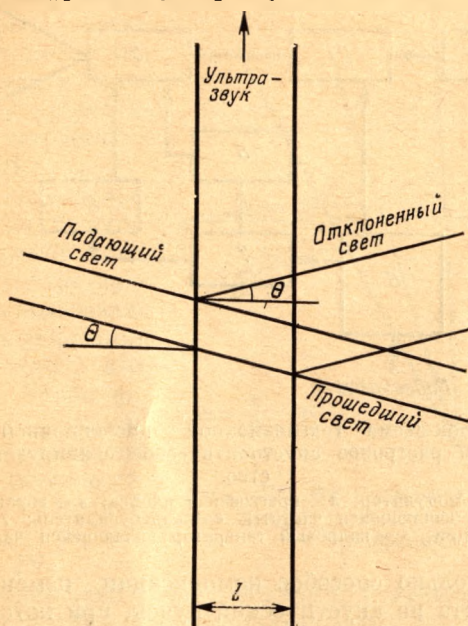
Пучок света падает на ультразвук под углом  $\theta$  к фронту ультразвуковой волны. Угол  $\theta$  приблизительно равен  $1/2\lambda/\Lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны света в среде, а  $\Lambda$  — длина волны ультразвука. Часть пучка света отклонилась также под углом  $\theta$  к волновому фронту ультразвука, а часть прошла через акустический пучок без изменений. Явление отклонения света, изображенное на рис. II, называют брэгговской дифракцией света на ультразвуковых колебаниях. Существенно, что для наблюдения брэгговской дифракции

---

<sup>1</sup> Отклонение пучка света, как показано на рис. II, происходит, строго говоря, при соблюдении соотношения  $2\pi\lambda l < \Lambda^2$ .

необходимо использовать монохроматический свет, например свет лазера.

Из рис. II видно, что за пучком ультразвука световой пучок расщепляется надвое: один пучок проходит, не меняя направления, а другой как бы зеркально отражается от волновых фронтов ультразвука. Из закона сохранения



Р и с. II. Брэгговская дифракция света на ультразвуке.

следует, что мощность падающего пучка света равна сумме мощностей прошедшего и отклоненного пучков. Мощность (интенсивность) отклоненного пучка зависит от мощности ультразвука. Изменяя мощность ультразвука, можно менять по определенному закону интенсивность отклоненного пучка. Будет происходить модуляция светового пучка по интенсивности. Изменять мощность ультразвука технически несложно.

В выражении для угла дифракции света (брэгговского угла) обращает на себя внимание обратная зависимость этого угла от длины волны ультразвука, а следовательно,

прямая линейная зависимость от частоты акустических колебаний. Изменяя частоту ультразвука, можно пропорционально менять угол отклонения света. Правда, тут же возникает трудность, связанная с изменением угла падения света, который также равен  $\theta$ . В настоящее время из-

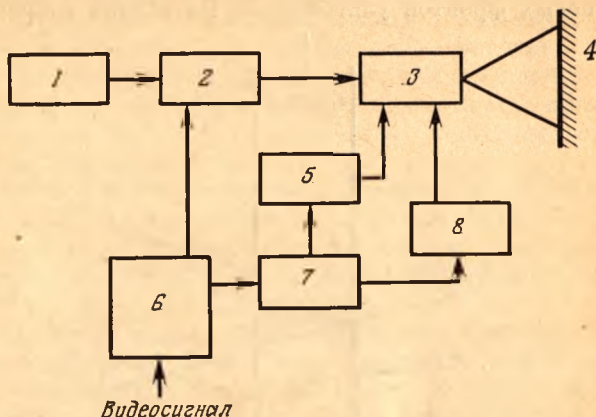


Рис. III. Блок-схема телевизионной проекционной системы, использующей растровое акустооптическое сканирующее устройство.

1 — лазер; 2 — модулятор; 3 — брэгговская ячейка; 4 — экран; 5 — строчный генератор качающейся частоты; 6 — видеоусилитель; 7 — блок синхронизации; 8 — надrowsый генератор качающейся частоты.

вестно несколько способов компенсации изменения угла падения света на акустический пучок, при которых положение падающего пучка света не изменяется. Однако при этом ограничивается диапазон возможных углов отклонения света. Используя описанный выше принцип, можно изготовить акустооптический дефлектор — прибор, в котором угол отклонения светового луча быстро изменяется по определенному закону. Пилообразно изменяя частоту, мы получаем акустооптическое сканирующее устройство, осуществляющее линейную развертку лазерного луча. Если одновременно использовать как вертикальную, как и горизонтальную развертки света (на двух взаимно перпендикулярных ультразвуковых пучках) и модулировать свет по интенсивности видеосигналом (например, используя акустооптический модулятор), можно получить телевизионную проекционную систему. На экране, находящемся за сканирующим устройством, можно наблюдать телевизи-

онное изображение. Блок-схема такой телевизионной системы изображена на рис. III. Достоинством этого устройства является отсутствие громоздких вакуумных приборов, которые малонадежны и потребляют большое количество энергии. Акустооптические дефлекторы и модуляторы могут также с успехом использоваться в запоминающих устройствах и устройствах ввода ЭВМ.

В последнее время явление брэгговской дифракции света на ультразвуке было использовано для визуализации акустического изображения. Чтобы разобраться, каким именно образом создается видимое изображение ультразвуковых волн, рассмотрим рис. IV.

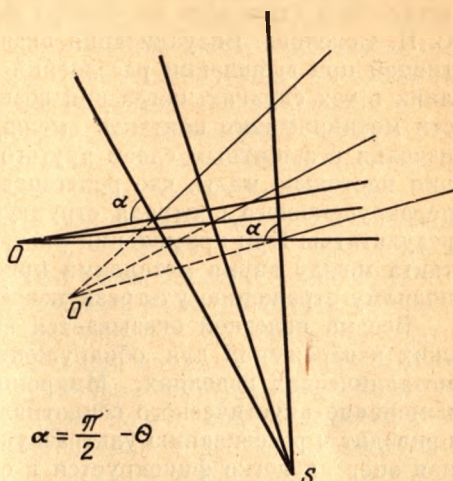


Рис. IV. Визуализация ультразвукового поля с использованием брэгговской дифракции.

Взаимодействие между волнами, излученными из точечного источника  $S$  монохроматического ультразвука и из точечного источника  $O$  лазерного света, создает дифрагированный свет, исходящий как бы из точки  $O'$  мнимого изображения звукового источника, видимого глазом. Взаимодействуют лишь лучи, пересекающиеся под углом  $\pi/2 - \theta$ , так как при этом соблюдается условие брэгговской дифракции.

Для большого числа источников звука  $S_1, S_2, S_3$  и т. д. точечные мнимые изображения  $O_1^I, O_2^I, O_3^I$  и т. д. формируют соответствующую картину. В случае такого преобразования соотношения амплитуд и фазы сохраняются и акустическое поле преобразуется в эквивалентное оптическое поле. Экспериментально этот метод впервые был реализован А. Корпелом и сотрудниками на акустической частоте 22 МГц. Объектами исследования служили простые металлические предметы.

Рассмотрим теперь области применения описанных выше методов визуализации акустического изображения.

Раньше всего, еще в 30—40-х годах, визуализация акустических изображений стала применяться при неразрушающих испытаниях различных изделий. Методика этих испытаний строилась на основе фундаментальных работ С. Я. Соколова. Визуализация оказалась особенно эффективной при выявлении расслоений в металлических изделиях в тех случаях, когда они возникают из-за непрочности механического контакта между основным металлом изделия и защитным слоем другого металла. Эти расслоения настолько малы, что рентгеновские и гамма-методы неразрушающего контроля структуры материала не дают результатов. При применении ультразвука отсутствие контакта между двумя металлами приводит практически к полному отражению ультразвуковой энергии.

Весьма полезной оказывается визуализация акустических изображений для обнаружения микропористости в металлических изделиях. Микропоры вызывают резкое изменение акустического сопротивления в материале, что приводит к рассеиванию ультразвуковой энергии. Рассеянная энергия легко фиксируется в отраженных лучах.

Совершенно незаменима визуализация акустических изображений при ультразвуковом контроле сварочных швов. Этот способ контроля сварки является наиболее чувствительным. Дело в том, что акустическое сопротивление материала чрезвычайно сильно зависит от давлений или напряжений в нем. Во время сварки в материале возникают напряженные области, которые невозможно обнаружить с помощью рентгеновского луча. Ультразвуковое излучение позволяет выявить напряженные зоны: если на своем пути ультразвуковой пучок встретит изменение акустического сопротивления, то какая-то часть его отразится.

Недостатком систем визуализации ультразвукового изображения для неразрушающего контроля является сложность расшифровки получаемой информации: испытываемые образцы могут иметь дефекты самой разнообразной формы, а потому характер распространения звука в образцах весьма сложен. Тем не менее этот недостаток искупается высокой чувствительностью акустических методов неразрушающего контроля.

Другая область применения систем визуализации звуковых изображений, практически являющаяся разновид-

ностью неразрушающего контроля, — это медицинская диагностика. Правда, пока эта область использования визуализации акустических изображений не находит массового применения из-за высокой стоимости аппаратуры (во всяком случае, по сравнению с рентгеновской) и сложности создания связующей среды — жидкости между пациентом и преобразователем. Однако акустические методы позволяют наблюдать такие мягкие ткани, как железы, кровеносные сосуды и т. д., чего нельзя увидеть с помощью рентгеновских лучей. Возможности использования систем визуализации в медицинской диагностике чрезвычайно велики, и широкое применение их в медицинской практике является, по-видимому, лишь вопросом времени.

Следующая область применения визуализированных акустических изображений основана на использовании ультразвуковых колебаний очень высокой частоты. Дело в том, что длина ультразвуковых волн диапазона от 100 до 3000 МГц находится в пределах 15—0,5 мкм, то есть сравнима с длиной световой волны видимой и инфракрасной областей спектра. Визуализируя изображения таких высокочастотных акустических полей, можно различать детали, видимые лишь в оптический микроскоп (условие различимости: размер детали должен значительно превышать длину волны излучения, которое несет нам информацию об этой детали). На этом принципе строится ультразвуковая микроскопия. Большим преимуществом ультразвуковой микроскопии является возможность «просвечивать» вещества и изделия, непрозрачные для света, получая при этом почти столь же богатую информацию, как и при рассмотрении под обычным микроскопом «открытых свету» деталей. Серьезным недостатком ультразвуковой микроскопии является сильное поглощение ультразвуковых колебаний во многих веществах, резко возрастающее с увеличением частоты акустических колебаний. Важная особенность ультразвуковой микроскопии состоит в том, что для формирования высококонтрастного изображения в ней используются различия не оптических, а механических свойств объектов. Это представляется особенно важным для биологических исследований.

Акустическая голография лежит в основе сейсмической голографии. Сейсмическая голография основана на использовании очень длинных звуковых волн (от 10 до 300 м). Расстояния между объектами в сейсмической голографии

оказываются равными сотням метров, а необходимое разрешение (расстояние между двумя различными точками) — порядка десятков метров. Поскольку достижимая дальность возрастает с убыванием частоты, для таких исследований применяются очень низкие частоты (10—1000 Гц). В настоящее время еще не научились получать высококачественные сейсмические голограммы, что вызвано крайней сложностью среды распространения звука — земной коры (в отличие от воды). Из-за многочисленных неоднородностей и множества пород с самыми разнообразными свойствами, вызывающими изменения скорости звука, характер распространения звука в земной коре весьма сложен. Вследствие шумов и искажений полученную сейсмическую голограмму почти невозможно интерпретировать однозначно. Однако в настоящее время разрабатываются сложные процессы обработки сигналов и методов фильтрации, которые окажут сейсмической голографии значительную помощь в сборе геологической информации. Проведенные недавно опыты по распознаванию с помощью сейсмической голографии простых геологических образований дали обнадеживающие результаты.

Наконец, еще одно важное применение визуализация акустических изображений нашла в системах подводного видения. В некоторых ситуациях, например в условиях замутненной воды, дальность систем прямого оптического наблюдения не превышает нескольких метров. Гидроакустические локаторы, хотя и обеспечивают сравнительно высокую дальность наблюдений, не в состоянии дать информацию, необходимую для классификации и идентификации цели. В то же время, используя акустическую голографию, можно восстанавливать довольно хорошее изображение подводных объектов, на которое не влияют оптические неоднородности среды.

Приведенные примеры ясно показывают широкие возможности практического применения методов визуализации звукового изображения, акустической голографии и взаимодействия звука со светом.

Видимый звук оказывается не только мощным инструментом познания явлений природы, но и эффективным средством технического вооружения народного хозяйства.

*С. Б. Гуревич*

# Оглавление

---

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ . . . . .                                    | 5   |
| ГЛАВА I. ПРИРОДА ЗВУКА . . . . .                         | 7   |
| ГЛАВА II. ВИДИМЫЕ ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ . . . . .               | 14  |
| ГЛАВА III. НЕКОТОРЫЕ ЗВУКОВЫЕ КАРТИНЫ . . . . .          | 28  |
| ГЛАВА IV. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ЗВУКА . . . . .         | 45  |
| ГЛАВА V. ИЗОБРАЖЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ЗВУКОВ РЕЧИ . . . . .     | 54  |
| ГЛАВА VI. НЕКОТОРЫЕ КАРТИНЫ МУЗЫКАЛЬНЫХ ЗВУКОВ . . . . . | 68  |
| ГЛАВА VII. РАЗЛИЧНЫЕ ЗВУКОВЫЕ КАРТИНЫ . . . . .          | 79  |
| С. Б. Гуревич. ПОСЛЕСЛОВИЕ . . . . .                     | 104 |

Уинстон Е. Кок  
ВИДИМЫЙ ЗВУК

Редактор А. Г. Белевцева  
Художник Ф. Инфанте  
Художественный редактор Ю. Л. Максимов  
Технический редактор З. И. Резник

Сдано в набор 10/IX 1973 г. Подписано к печати 21/XI 1973 г. Бумага № 2.  
84×108/32=1,88 бум. л. 6,3 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 5,78. Изд. № 12/6984.  
Цена 28 коп. Зак. 681.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»  
Москва, 1-й Рижский пер., 2.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государст-  
венном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полигра-  
фии и книжной торговли. Ярославль, ул. Свободы, 97.

12

