А. НИСБЕТТ

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОФОНОВ

А. НИСБЕТТ

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОФОНОВ

Москва «Искусство» 1981

ББК 32.87
Н69

The use of microphones

Alec Nisbett

Перевел с английского
В. И. Болотников

Н $\frac{32302-025}{025(01)-81}$ 118-80
4910030000

Focal Press
London—New York, 1974
© Перевод с английского, «Искусство», 1981

Об этой книге

Микрофон микрофону рознь, поэтому надо уметь выбрать такой микрофон, который лучше всего сможет выполнить поставленную перед ним задачу.

Правда, и этого еще мало: надо правильно выбрать место установки микрофона, добиться оптимального баланса звучания, проверить, соответствует ли качество звучания требуемым нормам.

Возможно, вам понадобится записать речь, музыку (а это могут быть и солирующие инструменты, и ритм-секция, и симфонический оркестр, или даже оперный спектакль) или же просто шум. В этой книге объяснено и показано на практических примерах, как справиться с любыми подобными задачами.

Рассказ не выходит за рамки монофонической звукопередачи, поскольку она по-прежнему главенствует в радиовещании, телевидении и кино.

Познакомив читателя со свойствами звука, автор описывает различные микрофоны, приводит примеры оптимального расположения микрофонов при записи музыки и речи, знакомит с вопросами, возникающими при синхронной записи звука и изображения, делится собственным богатым опытом работы.

Книга содержит практические сведения, которые могут быть полезны младшему техническому персоналу в системе радиовещания и телевидения, студентам, а также любителям звукозаписи.

Об авторе

Алек Нисбетт — режиссер телевизионных программ в Британской радиовещательной корпорации (Би-Би-Си). Его документальные фильмы, показанные в научно-популярной программе «Горизонт», были неоднократно отмечены премиями.

Ассоциация популяризаторов науки в Великобритании удостоила А. Нисбетта премии за лучшие сценарии научно-популярных программ по радио и телевидению в 1973 г.

Еще в 1971 г. Британская ассоциация содействия прогрессу науки назвала работу А. Нисбетта «Война насекомых» лучшим документальным фильмом года, посвященным научным и техническим проблемам для неспециалистов.

Помимо этого А. Нисбетт сделал такие телефильмы, как «По окончании железного века...», «Человек, разговаривающий с лягушками» (1970), «Приятная катастрофа», «Крабовидная туманность» (1971), «Как продали Судный день» (1972), «Лаборатория преступлений» и «В поисках Конрада Лоренца» (1973).

А. Нисбетт получил высшее образование в Бирмингемском университете. В 1953 г. стал звукорежиссером в одной из студий звукозаписи Британской радиовещательной корпорации (Би-Би-Си);

с 1961 г. был автором серии передач «Звук», предназначенных для любителей звукозаписи. Он написал также книгу «Оборудование студии звукозаписи», которая вышла в свет в 1962 г. и с тех пор девять раз переиздавалась: ее используют в высших учебных заведениях многих стран мира и как учебник и как справочное пособие по звукозаписи.

Введение. О качестве воспроизведения звука

Звук, излучаемый громкоговорителями или головными телефонами — результат всей деятельности звукотехников.

Источником звука в обычных домашних условиях может быть система высококачественного воспроизведения (или система «хай-фай» — от английских слов «хай файделити», что означает «высокая точность воспроизводимого звучания оригинальному»). Однако с точки зрения ценителя звукозаписи, домашняя аппаратура воспроизводит звук далеко не идеально. Источники звука дома — это радиоприемник, электропроигрыватель или магнитофон; звук сопровождает изображение в кино- и телевизионных передачах. Условия прослушивания от случая к случаю весьма различны, однако можно с полной уверенностью предположить, что за пределами своего дома слушатель едва ли будет в состоянии как-либо изменить их.

Однако качественные показатели звуковых программ, предназначенных для широкого круга слушателей, можно контролировать. При этом в первую очередь исходят из интересов того огромного большинства слушателей, чьи запросы сравнительно скромны: речь должна быть четкой и разборчивой, а в музыке внимание должны привлекать не слишком сложные ритмические и мелодические пассажи.

Звукотехники лишь во вторую очередь заботятся о тех слушателях, которые могут оценить больший частотный и динамический диапазон звуковой программы, а также сложность ее музыкального звучания, поскольку в их распоряжении находится звуковоспроизводящая аппаратура высокого класса. Ясно, что звукотехникам куда большее удовлетворение приносит достижение второй цели, однако ее все равно нельзя считать единственной.

Хотя в этой книге немало места уделено тому, как при существующих сейчас технических возможностях добиться наилучших результатов в звукозаписи или звукопередаче, следует помнить, что, говоря о наилучшем результате (включающем, разумеется, и просто хороший), я неизменно исхожу из интересов большинства слушателей.

Звук — средство передачи информации, а не сама информация

Надо постоянно помнить, что качество звукопередачи вторично по отношению к содержанию звуковой программы. Иными словами, как правило (хотя и вовсе не всегда), для нас гораздо более важно понять, что было сказано, чем услышать, как это прозвучало. Именно звукотехники обязаны сделать все, что только в их силах, чтобы информация, содержащаяся в звуковом сигнале, преодолела недостатки среды распространения.

По роду своей работы мне приходится постоянно подтверждать сказанное практически: я много лет занимаюсь звукозаписью в

студиях Британской радиовещательной корпорации (Би-Би-Си), которая принадлежит, несомненно, к крупнейшим организациям такого рода. Диапазон возможностей для звукотехника здесь очень велик, поэтому в большинстве своем они не просто исполняют свои обязанности, но и от года к году повышают свою квалификацию. В предлагаемой книге отражены итоги многолетних трудов автора на ниве звукотехники, а также опыт его коллег, которые великодушно предоставили свое свободное время в его распоряжение и никогда не отказывали ему в добром совете.

Микрофоны и звукотехника

Микрофон — главное, определяющее звено электроакустического оборудования студии звукозаписи. Он преобразует механическую энергию звуковых колебаний воздуха в энергию электрических колебаний. Звуковые колебания представляют собой некоторую последовательность изменений воздушного давления, и микрофон преобразует ее в похожую, хотя и не обязательно точно такую же последовательность изменений электрического тока. Электрический сигнал можно зафиксировать механически в виде звуковой бороздки на граммофонной пластинке, в виде определенного «узора» расположения магнитных частиц на магнитной ленте или, предварительно закодировав, передать со скоростью света посредством электромагнитных волн. В любом случае электрический сигнал, похожий на первоначальный, будет подан на громкоговоритель, который заставит частицы воздуха двигаться так, чтобы изменения воздуха были похожи на звуковые колебания, возникающие около микрофона.

Оценка звучания

Воспроизведенный звук может очень сильно походить на изначальный, однако вовсе не быть идентичным ему. При монофоническом воспроизведении звук приходит к слушателю из одного громкоговорителя (т. е. через один канал передачи), при стереофоническом — из двух (через два канала), при квадрафоническом — из четырех и т. д. Ни один способ воспроизведения не позволит точно воссоздать звуковое поле, существовавшее изначально в студии: звучание обязательно претерпит некоторые изменения. Результаты этих изменений можно оценить только с эстетической точки зрения, «на слух».

Сделать такую оценку — не просто навык, а скорее, искусство. Ее в любом случае нельзя осуществить только с помощью научной методики или технических средств, и она входит в функции звукорежиссера наряду с регулированием уровней источников.

Балансировка микрофонов

Основное внимание в книге уделено получению правильного баланса звучания, который заключается в оптимальном размещении одного или нескольких приемников звуковых колебаний, управлении

Сквозной электроакустический тракт.

Источник звука излучает звуковые волны, т. е. *уплотнения* и *разрежения* воздушной среды.

Часть звуковых колебаний поступает прямо на микрофон. Другая отражается и приходит к нему в виде *реверберационного отзвука*.

Микрофон воспринимает также шум или помехи, не имеющие отношения к полезному звучанию.

Изменения в воздушном давлении преобразуются в микрофоне в изменения электрических величин, т. е. в *электрический сигнал*. Недостатки при этом преобразовании выражаются в появлении искажений. Микрофон вносит нежелательные *электронные шумы*.

В любом из звеньев электроакустического тракта можно применять *электронные усилители*, восполняющие уменьшение уровня электрического сигнала.

В любом звене можно также использовать *корректирующие фильтры*, которые предназначены для компенсирования недостатков в предыдущих или последующих звеньях (частотные искажения).

Система *искусственной реверберации* позволяет добавлять задержанный во времени сигнал к отдельным звеньям тракта или к суммарному сигналу на выходе.

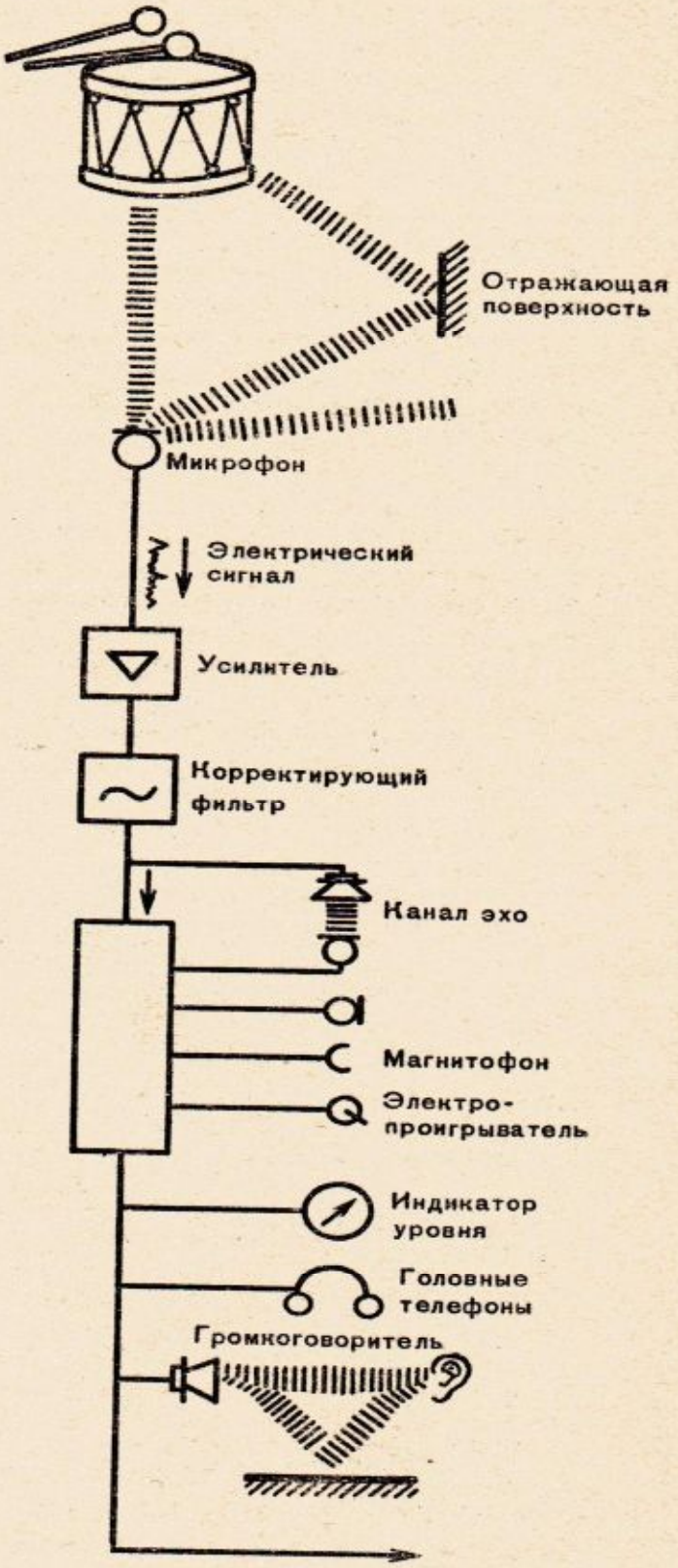
В *микшере* (звукорежиссерском пульте) объединяются сигналы от микрофонов, магнитофонов и электропроигрывателей.

Индикатор уровня громкости или индикатор пиковых значений применяют для контроля: не выходят ли электрические сигналы за установленные пределы.

Головные телефоны нужны когда нет помещения для прослушивания (при съемках на натуре).

Совмещенное звучание, полученное в результате всех предыдущих операций, оценивают на слух с помощью *контрольного громкоговорителя*, находящегося в специальном помещении.

Выходной сигнал может быть подан на *студийный магнитофон*, на *передатчик* системы радио- или телевещания или на *внутреннюю линию*.



их выходными сигналами и оценке на слух результатов их работы. Рассмотрена только монофоническая звукопередача, хотя многое из описанного здесь будет справедливо и при стереофонии. (Однако приемам использования микрофонов при стереофонической звукозаписи следует посвятить отдельную книгу.)

Микрофон надо воспринимать как часть звуковой системы, которая охватывает и звуковое поле в студии, и сам микрофон со всеми присущими ему свойствами, и аппаратуру, используемую для смешивания различных сигналов и контроля их качества.

Основная задача звукотехника в целом заключается в следующем: свести до минимума изменения в передаваемом звучании по сравнению с оригиналом, избежать снижения качества сигнала относительно некоторого наперед задаваемого уровня. Вместе с тем способы балансировки микрофонов, описываемые в этой книге, несомненно, изменяют вид сигнала, хотя и с соблюдением целого ряда условий. Эти две различные задачи звукотехника не надо смешивать.

Длина волны: «размер» звука

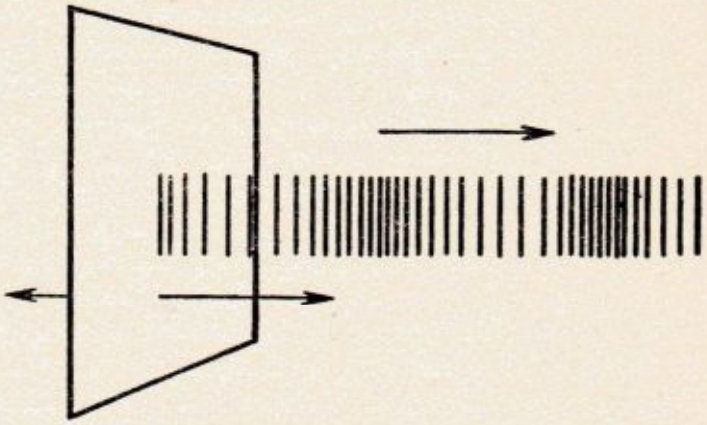
Колеблющееся тело — например, кожа барабана — создает переменное воздушное давление. Если тело движется в одну сторону, воздух около него сжимается. Это изменение передается к следующему слою воздуха, потом — к следующему за ним и т. д., распространяясь при нормальных условиях со скоростью около 340 м/с. Колеблющееся тело тем временем начинает движение в обратную сторону, создавая теперь впереди себя область пониженного давления. Благодаря естественной способности воздуха восстанавливать прежнее состояние, это изменение давления тоже начинает распространяться в воздушной среде с той же скоростью, что и сжатие. По мере того как колеблющаяся поверхность движется вперед — назад, следом распространяются новые волны областей сжатия и разрежения.

Источник излучает последовательность звуковых волн. Они несколько отличны от волн на поверхности пруда, однако сходства между ними все же больше, чем различий. Если бросить в воду пробку, она будет качаться вверх — вниз при прохождении волны, оставаясь более или менее на одном и том же месте. Точно так же ведет себя частица воздуха: когда через данную точку проходит волна изменения давления, частица лишь незначительно перемещается вперед — назад, колеблясь около некоего среднего положения.

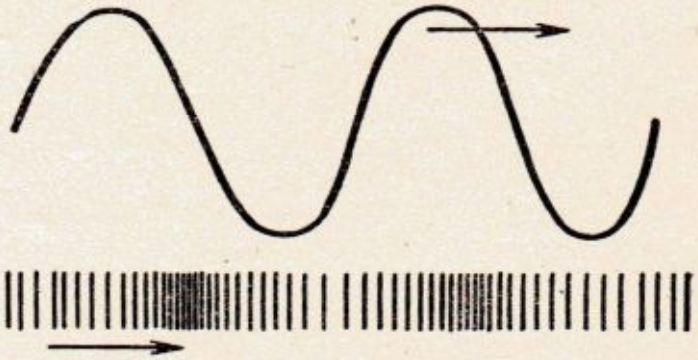
Длина волны и идеальный поршень

Расстояние от гребня одной волны до гребня следующей называют *длиной волны.* Человек слышит звуковые волны, имеющие длину примерно от 12 м до 2,5 см. Слуховое отверстие и ушная мембрана по размеру равны приблизительно половине длины волны самого высокого звука, который способен услышать человек. Это не случай-

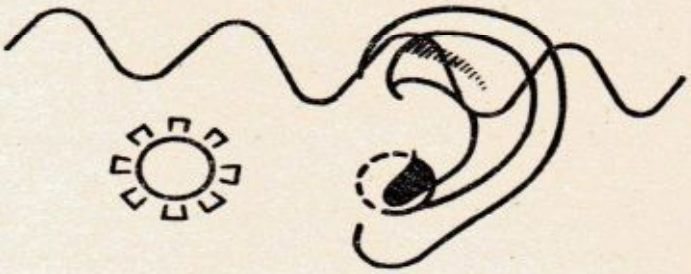
Звуковые волны. Колеблющаяся плоскость создает в воздухе волны сжатия и разрежения: звуковые колебания. Частицы воздуха смещаются то вперед, то назад вдоль направления распространения движения волны.



Поперечная волна. На рисунке удобно изображать колебания в давлении воздуха как поперечные волны: частицы воздуха словно движутся при этом из стороны в сторону по мере распространения волны. На самом деле это лишь условное обозначение смещения частицы воздуха от среднего положения (по вертикальной оси) в зависимости от времени (горизонтальная ось).



Минимальная длина волны, воспринимаемая ухом человека, определяет размеры мембраны, которая требуется для высококачественного микрофона-приемника давления.



ное совпадение. Если бы этот размер был больше, одна часть мембраны испытывала бы воздействие области повышенного давления, а другая двигалась бы уже под действием следующего за ним разрежения: оба воздействия взаимоуничтожали бы друг друга. Если бы ушная мембрана была меньше, чем она есть на самом деле, она по-прежнему реагировала бы на последовательное сжатие и разрежение воздуха, однако из-за уменьшившейся площади воздействия сила давления на нее стала бы меньше и ухо не было бы столь чувствительным.

Установив общую аналогию с человеческим ухом, можно сказать, каковы будут идеальные размеры мембраны высококачественного микрофона — приемника давления: диаметр ее должен быть около полудюйма (т. е. приблизительно 12,5 мм). Первые модели микрофонов по размерам были гораздо больше сегодняшних, поскольку тогда было технически трудно получить требуемую чувствительность; современные же микрофоны, как правило, имеют мембраны размером около полудюйма.

В реальных условиях давление в произвольной точке звукового поля изменяется довольно сложным образом в зависимости от колебаний с различной длиной волны и с различной интенсивностью, колебаний, приходящих в эту точку с разных сторон. Микрофон-приемник давления принимает все колебания, независимо от направления их прихода. Такой микрофон работает почти так же, как человеческое эхо, однако, как мы увидим дальше, это не единственный возможный тип микрофона.

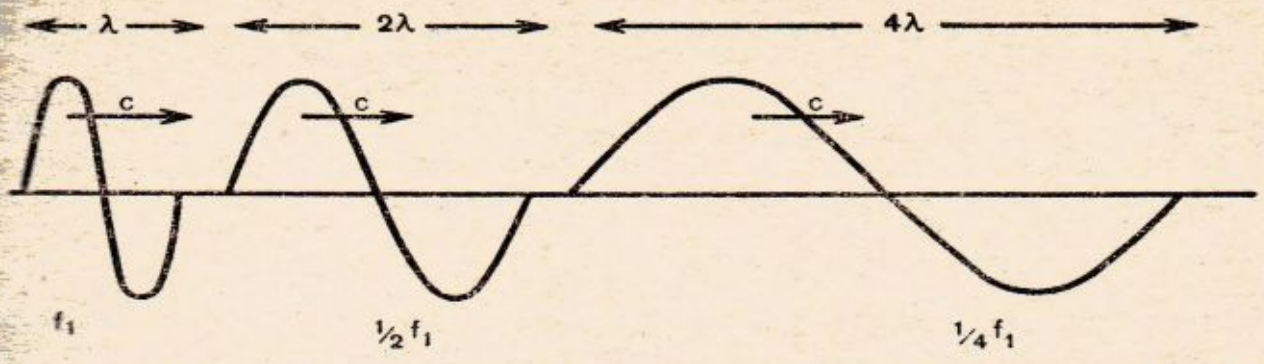
Частота: повторяемость звуковых колебаний

Частота звуковых колебаний, измеряемая в герцах (сокращенно: Гц), — это число колебаний, которые частица воздуха совершает за 1 с.

Иногда указывают, что диапазон слышимых частот простирается от 16 Гц до 16 кГц, причем верхний предел зависит от возраста человека, его пола и состояния здоровья. В юности слышат и более высокие частоты, чем 16 кГц, однако обычно именно эту величину принимают в качестве разумного верхнего предела, требуемого в системах звукопередачи.

Мембрана высококачественного микрофона должна в таком случае быть способна повторить очень быстрые изменения воздушного давления. Это означает, что она должна быть очень легкой, а говоря точнее, иметь очень малую инерционность. Подобные микрофоны очень дороги и требуют особо бережного обращения при эксплуатации, поэтому их применяют лишь там, где это абсолютно необходимо: например, для приема звука от оркестра в полном составе или для отдельных инструментов типа тарелок или треугольника, которые излучают много высоких частот. В большинстве случаев, в том числе и для передачи человеческого голоса, вполне достаточно принимать частоты в диапазоне до 10 кГц.

На другом конце частотного диапазона колебания самых нижних, еще воспринимаемых на слух частот сменяются колебаниями,



Частота и длина волны. Все звуковые волны распространяются в одной и той же среде с одинаковой скоростью *c*, поэтому частота *f* обратно пропорциональна длине волны λ.

Музыкальные ноты: частота и длина волны. На рисунке приведены лишь некоторые примеры. Частота, умноженная на длину волны, равна скорости звука, которая в холодном воздухе составляет примерно 335 *м/с* (в теплом воздухе скорость звука увеличивается).

которые мы уже не слышим, а ощущаем, как движения воздуха. Ниже будет показано, что идеальная частотная характеристика на нижних частотах просто-напросто не нужна: даже для передачи самого полного оркестрового звучания вполне достаточно, если частотная характеристика микрофона будет горизонтальной до 50 Гц.

Частота и длина волны

Частота и длина волны тесно связаны друг с другом. Скорость звука в воздухе можно в первом приближении, достаточном для технических вычислений, считать постоянной величиной. Быстро колеблющийся объект (колебания верхних частот) создает звуковые волны короткой длины, а предмет, колеблющийся сравнительно медленно, создает волны большей длины (дело в том, что сто колебаний в секунду — достаточно медленное изменение, чтобы назвать такую частоту низкой).

Для эффективного излучения колебаний низких частот нужны объекты довольно больших размеров. Так, резонатор рояля вполне подходит для этих целей, однако он неспособен выполнять свою задачу с такой же эффективностью, как большие трубы низкого регистра органа.

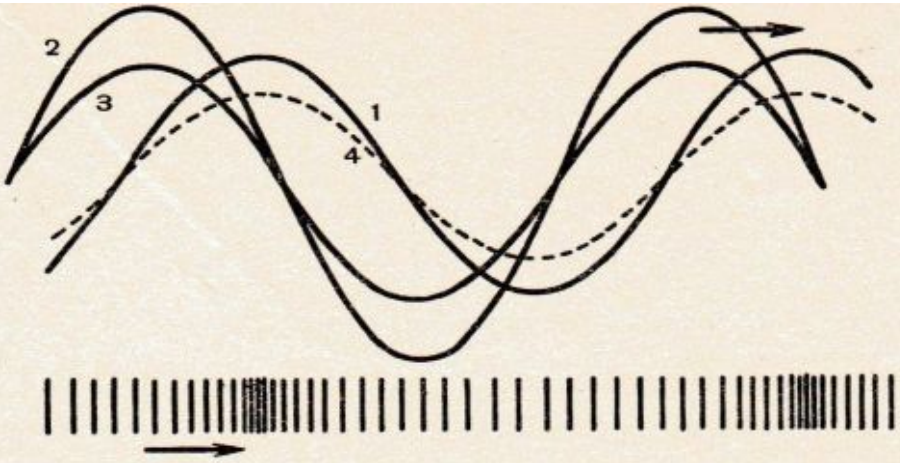
Влияние температуры

Температура среды влияет на скорость звука в ней: звуковые волны распространяются в воздухе быстрее по мере роста температуры. Струны скрипки можно настроить перед игрой, а вот настроить столб воздуха в большинстве духовых инструментов нельзя. Поэтому если температура воздуха поднялась, а длина волны осталась прежней, излучаемая частота тоже возрастает. Флейта, например, изменяет свое звучание на полутон, когда температура воздуха увеличивается всего на 8 °С. Оркестрантам несколько раз приходится подстраивать свои инструменты по тону, задаваемому гобоем: перед началом выступления, а затем, когда температура воздуха повысится и инструменты нагреются.

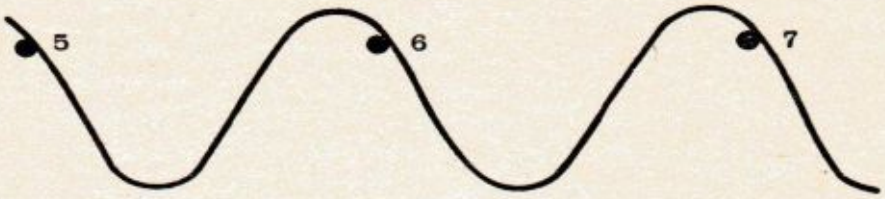
Волны и фаза

Скорость частицы определяет быстроту колебательных перемещений отдельных частиц воздуха. Она пропорциональна величине воздушного давления: максимальное значение одной величины совпадает с максимумом другой.

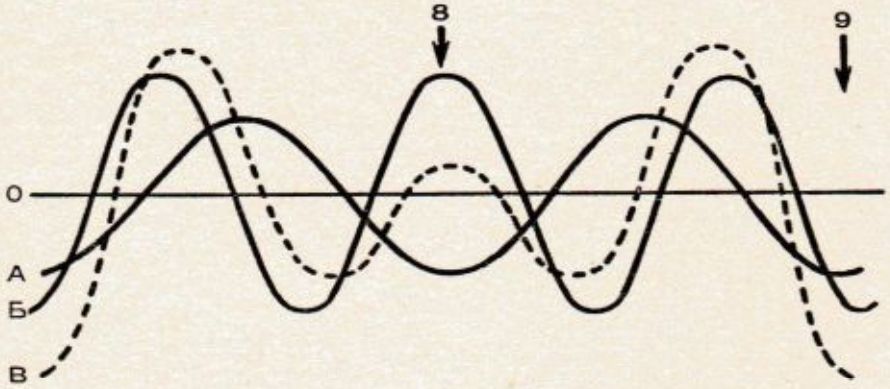
Градиент давления — скорость, с которой изменяется давление вдоль направления движения волны в зависимости от удаления от источника. Там, где давление максимально, скорость его изменения равна нулю, а в тех точках волны, где избыточное (т. е. собственно звуковое) давление равно нулю или давление воздуха равно нормальному атмосферному, скорость его изменения максимальна. Форма волны градиента давления похожа на волну давления, однако первая отстает от второй на четверть длины волны.



Соотношение волновых процессов: *1* — колебательное изменение давления в воздушной среде; *2* — смещение частиц воздуха; *3* — градиент давления; *4* — скорость движения частиц воздуха.
Обратите внимание на то, что: а) давление прямо пропорционально скорости движения воздушных частиц; б) градиент давления пропорционален смещению частиц; в) колебательное изменение градиента давления отстает на четверть длины волны от изменения давления. Градиент давления на 90° отстает по фазе от давления.



Фаза — состояние, в котором находится колебательный процесс в каждый данный момент времени. Точки *5*, *6* и *7* синфазны относительно друг друга.



Сложение (суперпозиция) звуковых волн. Звуковое давление в любой точке представляет собой алгебраическую сумму давлений от всех звуковых колебаний, проходящих через нее в любой произвольный момент времени.
Другими словами, давления, величины которых выше нормального атмосферного, складываются, а те, что ниже атмосферного, — вычитаются. При этом направление движения волны никак не влияет на результат сложения. При сложении, например, простых синусоидальных волн *А* и *Б* получим сложную (несинусоидальную) волну *В*. В точке *8* колебания вычитаются: максимум давления для *Б* совпадает с максимумом разрежения (то есть минимальным давлением) для *А*. В точке *9* разрежения для *А* и для *Б* максимальны, поэтому они складываются и дают минимум давления.

Смещение частицы — максимальное расстояние, на которое частица воздуха отклоняется от положения равновесия. Смещение прямо пропорционально градиенту давления.

Принцип работы некоторых микрофонов раньше характеризовали иногда как «постоянство скорости», других микрофонов — как «постоянство амплитуды». Эта вводящая в заблуждение терминология означала лишь то, что выходное напряжение микрофона равняется определенной константе, умноженной соответственно на скорость движения мембраны или на амплитуду (т. е. смещение). Гораздо больше смысла в используемых сейчас терминах «приемник давления» и «приемник градиента давления», поскольку именно эти характеристики действия микрофона отражают важное различие, существующее между ними.

Сложение звуковых колебаний

Фаза — термин, употребляемый для описания отдельных частей (фаз) длины волны колебаний. Полный цикл изменений волнового процесса от какой-либо точки колебания до соответствующей ей точки, находящейся на расстоянии одной длины волны, составляет изменение по фазе на 360°. Эти две точки колеблются «в фазе», или синфазно; «не в фазе», или противофазно, они будут колебаться по отношению к точке, расположенной ровно посередине. Важно понять, что волны, находящиеся в фазе относительно друг друга, будут взаимно усиливаться, а противофазные волны будут либо уменьшать друг друга, либо взаимно уничтожаться.

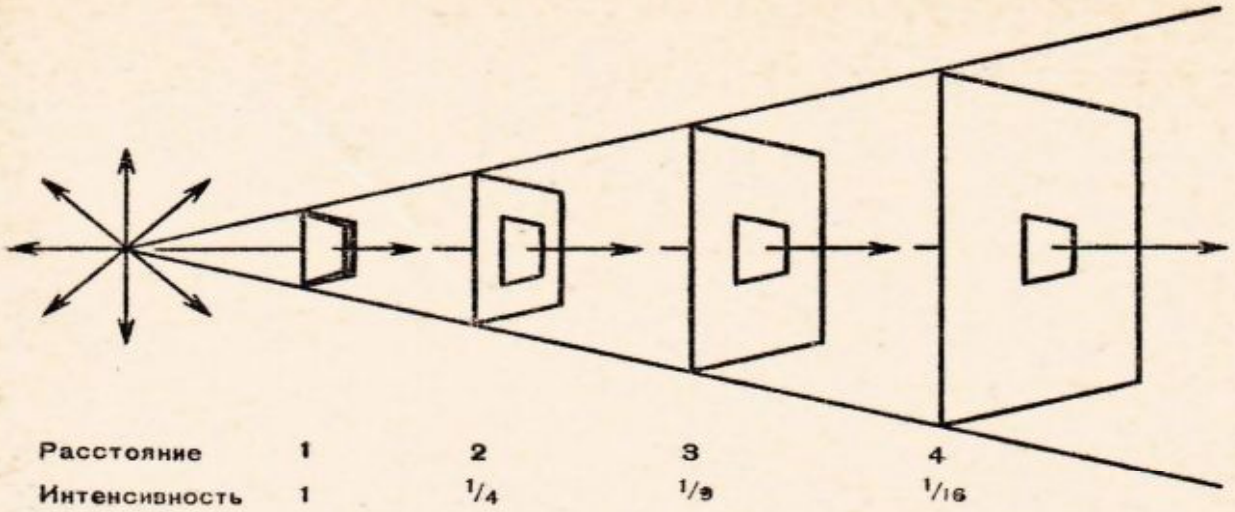
Сложные звуки со сложной формой волны можно получить путем сложения множества простых волн: иными словами, нужно сложить те части, которые находятся в фазе относительно друг друга, и вычесть противофазные колебания.

Ухо человека обычно не различает фазовые соотношения. Именно поэтому две звуковые волны, сложенные по-разному (т. е. с разным сдвигом по фазе) и давшие в результате самые различные на вид колебания, будут на слух восприниматься одинаково. Это очень важно знать для разработки и использования микрофонов. Ведь тогда не имеет значения, используем ли мы микрофон, принимающий давление или градиент давления, который на 90° сдвинут относительно первого по фазе: выходные сигналы обоих микрофонов все равно можно смешивать без каких-либо осложнений.

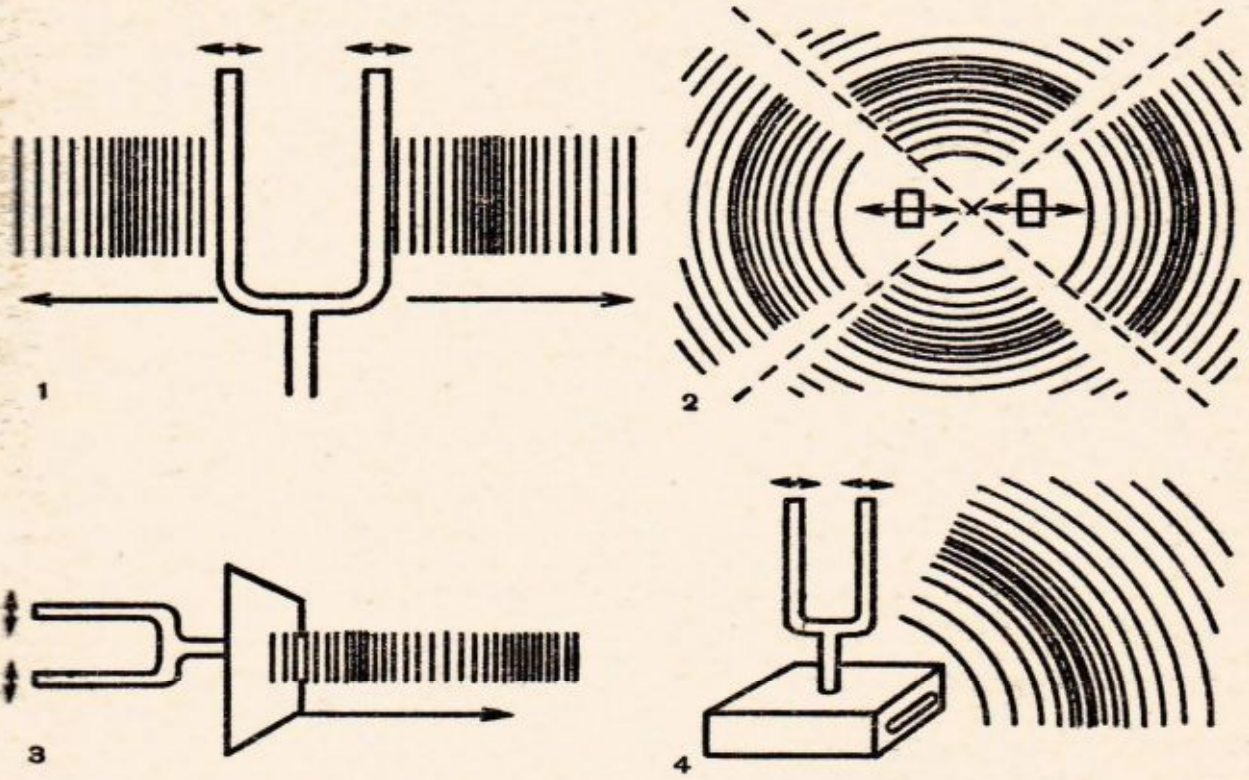
Энергия, интенсивность звука, резонанс

Энергия источника звука зависит от амплитуды колебаний: чем шире размах колебаний, тем большую мощность (энергию, излучаемую в единицу времени) он способен развить.

Интенсивность звука в произвольной точке звукового поля — акустическая энергия, проходящая за секунду через единичную площадь. В соответствии с законом обратной пропорциональности, который применим к сферическим волнам, интенсивность звука,



Интенсивность звука — это энергия, проходящая за секунду через единичную площадку. В сферической волне (т. е. колебательном процессе, исходящем из точечного источника) интенсивность звука очень быстро убывает с расстоянием. Под мощностью источника понимают общую энергию, излучаемую по всем направлениям в единицу времени.



Камертон: *1* и *2* — каждая ножка камертона колеблется с определенной собственной частотой, однако сами по себе они плохо излучают звук в воздух; *3* — если основание вилки камертона приложить к деревянной поверхности, его колебания будут лучше согласованы с окружающим пространством и звук станет слышен отчетливо; *4* — если камертон приложить к ящику, полость которого настроена на частоту собственных колебаний камертона, его звук будет слышен вполне громко.

излученного точечным источником, убывает с квадратом расстояния. На практике, однако, дело обстоит несколько иначе: если источник звука — большая плоская поверхность, звуковые волны поначалу не являются сферическими. На расстоянии, сравнимом с размерами источника, волны будут плоскими или продольными, так что в области, прилегающей к источнику (в так называемой *ближней зоне излучателя*), интенсивность звука уменьшается незначительно. Различные условия, существующие в плоской и в сферической волне, как мы скоро узнаем, влияют на работу микрофонов-приемников градиента давления.

Как работает источник звука

Для того чтобы энергия механических колебаний источника звука преобразовалась в энергию акустических колебаний, требуется обеспечить оптимальное сопряжение сред. Предметы небольших размеров или же тонкие, узкие предметы (все это — по сравнению с длиной волны, соответствующей частоте их колебаний) почти не возбуждают слышимых акустических колебаний. Например, вилка камертона или струна скрипки, колеблясь, «разрезают» воздух и не отдают ему в достаточной степени энергии своих колебаний: воздух просто обтекает струну или камертон с обеих сторон и остается на своем месте. Поэтому в подобных случаях источник колебаний присоединяют к деревянной поверхности или ящику.

Свободно подвешенная мембрана (поверхность) будет колебаться на собственных частотах, если, например, постучать по ней. Когда одна из собственных частот совпадает с частотой колебаний камертона или струны, мембрана будет быстро поглощать энергию источника колебаний и таким образом передаст ее воздушным частицам. Говорят, что мембрана резонирует.

У скрипки несколько поверхностей-мембран, которые должны отзываться на колебания струн (или резонировать) на многих частотах. Чтобы добиться этого, скрипку делают очень сложной формы. Такая мембрана не будет резонировать всего на нескольких частотах: если стукнуть по ней, звук будет глухой, немузыкальный. Однако если через подставку, или кобылку, с ней связаны струны, мембрана-резонатор начнет совершать вынужденные колебания. Энергия при этом передается от струны к мембране, а уже от нее — к частицам воздуха.

Объемный резонатор

Резонанс другого типа мы будет наблюдать в случае *резонансной полости*, или *резонатора Гельмгольца*. Если мембрана — часть ящика со сравнительно небольшим отверстием, воздух внутри него резонирует на одной, определенной частоте (совсем так, как возникает звук, если подуть поперек отверстия горлышка бутылки). Это явление полезно для резонаторского ящика камертона, однако в скрипке оно вызывает так называемый «визг», которого скрипач любой ценой стремится избежать.

Обертоны и гармоники

Основной тон музыкальной ноты — почти всегда самый низкий тон из составляющих ноту колебаний; все остальные тона называют *обертонами*. Частоты обертонов у многих музыкальных инструментов кратны частоте основного тона. В таком случае основной тон и обертоны называют *гармониками*. Струнные инструменты, деревянные духовые, голос человека издают звуки, состоящие из *гармонических последовательностей* связанных между собой тонов.

Высота тона — субъективно оцениваемое качество частоты или комбинации частот, которое определяет положение соответствующей ноты в музыкальном звукоряде. В гармонической последовательности высота тона определяется самым низким тоном, т. е. *основной гармоникой*. Это справедливо, даже если основная гармоника мала по амплитуде или ее вовсе нет: изменится лишь тембр, но никак не высота тона.

Высота тона и ударные инструменты

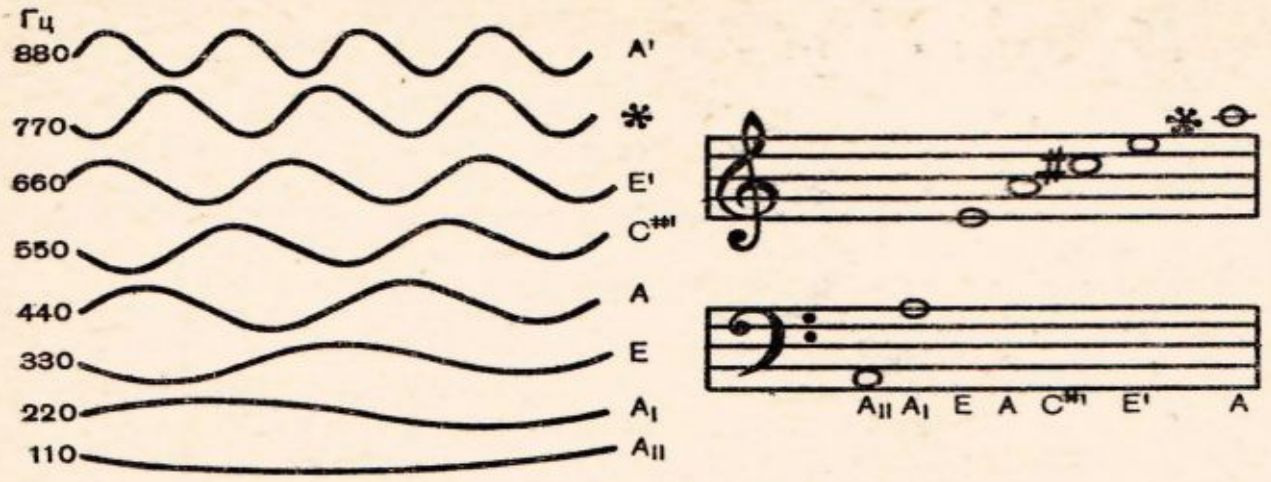
Многие ударные инструменты дают звук, высота тона которого неопределенна: здесь дело в том, что большинство обертонов не кратны основному тону. Вместе с тем у некоторых ударных — таких, как литавры, — основной тон столь велик по амплитуде, что можно говорить об определенной высоте тона, хотя обертоны здесь и не являются гармоническими составляющими. Многие ударные инструменты представляют собой несколько одинаковых по форме, но уменьшающихся по размеру предметов, причем таких, что при ударе они издают звуки, образующие музыкальную прогрессию. Однако у таких ударных, как, например, тарелки или треугольник, спектр излучаемых при ударе частот столь велик, что звучание этих инструментов воспринимается как гармоничное практически при любом музыкальном фоне.

Как мы воспринимаем «музыкальность» звуков

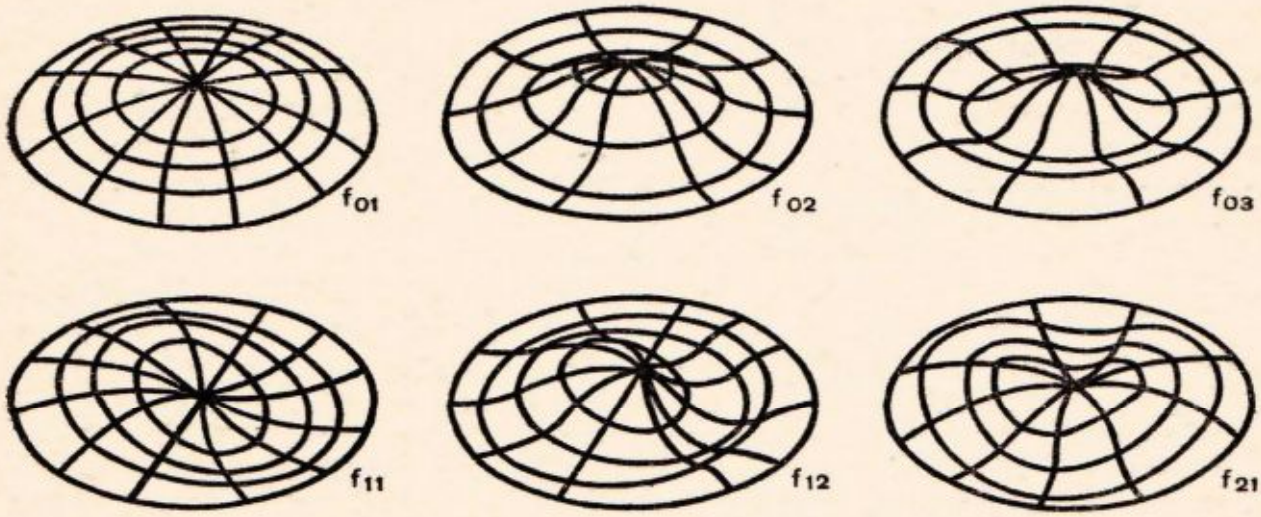
Ухо (а следовательно, мозг) оценивает музыкальный интервал между двумя нотами как отношение их основных частот. Простейшее отношение частот 1 : 2 называется *октавой*. Частоты нот музыкального звукоряда изменяются скачками, причем скачки эти становятся тем больше, чем выше нота.

Октавы на клавиатуре рояля изменяются в отношении 1 : 2 : 4 : 8 : : 16 : 32 : 64 : 128 (см. с. 11). Те, кто знаком с математикой, сразу обратят внимание, что логарифмы этих чисел образуют более простую прогрессию: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Иными словами, музыкальный звукоряд является логарифмическим по своему характеру.

Судить об относительной высоте тона мозг может благодаря наличию гармоник сравниваемых частот: если гармоники совпадают, мозг воспринимает этот интервал как мелодичный. У нот, находящихся в отношении 1 : 2, совпадают все гармоники, за исключением основной. У нот с отношением 2 : 3 (интервал в одну пятую) совпадают очень многие гармоники. То же имеет место для нот с



Первые восемь гармоник ноты A_{11}. Основной тон — первая гармоника, первый обертон — вторая гармоника и т. д. Все гармоники, за исключением седьмой, представлены нотами в тональности основной гармоники; седьмая гармоника вовсе не является нотой: она расположена между *G* и *Gb* (соль и соль-бемоль основной октавы).



Колебания кожи барабана. Построчные индексы указывают на число радиальных и кольцевых линий (узлов), где смещение отсутствует. Первый кольцевой узел находится на краю — там, где натянутая кожа зажата. Обертоны не являются гармониками. Так, если $f_{01} = 100$ Гц, то частоты других видов колебаний (модов) будут равны соответственно: $f_{02} = 230$ Гц; $f_{03} = 360$ Гц; $f_{11} = 259$ Гц; $f_{12} = 292$ Гц; $f_{21} = 214$ Гц.

отношением 3 : 4 (интервал в одну четвертую). Рассуждая так, определим все ноты музыкального звукоряда. Правда, интервалы при этом получатся иными, чем при делении октавы на двенадцать равных частей. Равномерный или «хорошо темперированный» звукоряд, используемый сейчас в музыкальной практике, возник благодаря компромиссу: с музыкальной точки зрения он несовершенен, но зато позволяет легче изменять тональность.

Музыкальная акустика: струнные инструменты

Если натянутую струну ударить, дотронуться смычком или пальцем ровно посередине, будут возбуждены основная и нечетные гармоники, у которых максимум амплитуды находится в середине струны. Четные же гармоники, у которых в середине струны находится узел, будут отсутствовать. Возбуждая струну примерно в средней ее части, получим сильные нижние частоты; при возбуждении ближе к концу струны возникнут более сильные верхние гармоники. Именно так изменяют тембр звучания арфы.

Ближе к одному из концов (хотя и не слишком близко) струну изгибают — так, чтобы получить хороший набор четных и нечетных гармоник. Некоторые из них, правда, будут слабее других. Коснувшись струны примерно на одной седьмой ее длины, нельзя получить седьмую гармонику, но это и хорошо: такой обертон резко бы диссонировал относительно остальных нот, взятых скрипачом.

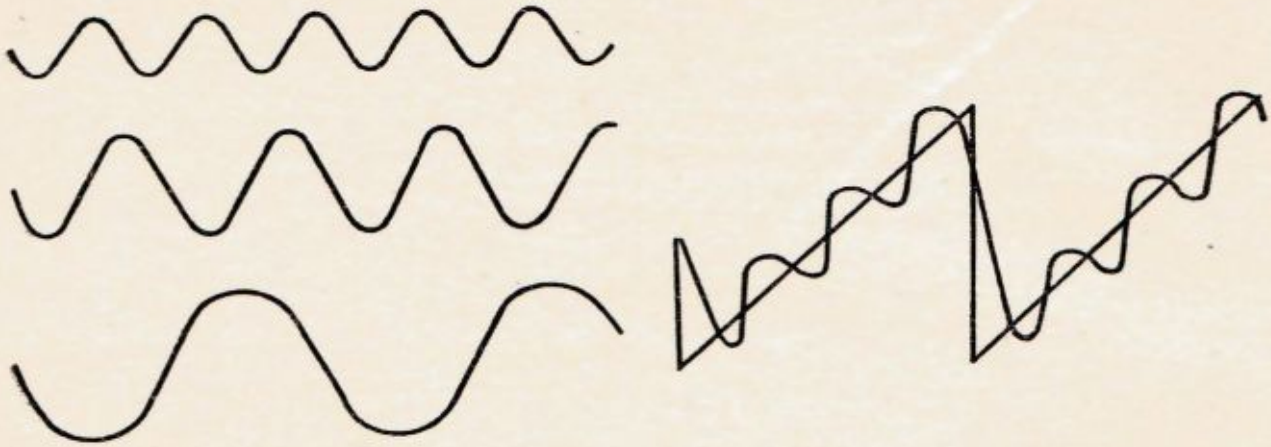
Атака и огибающая

Способ звукоизвлечения определяет акустические особенности инструмента. Быстроту нарастания звука называют атакой, и микрофон должен быть в состоянии чутко реагировать на быстрые, хаотичные переходные процессы, определяющие атаку и существующие в момент взятия ноты. Например, старинные клавишные инструменты, в которых звук извлекается из струны щипком, по характеру атаки сильно отличаются от звука современных роялей, где по струне ударяет обитый фетром молоточек.

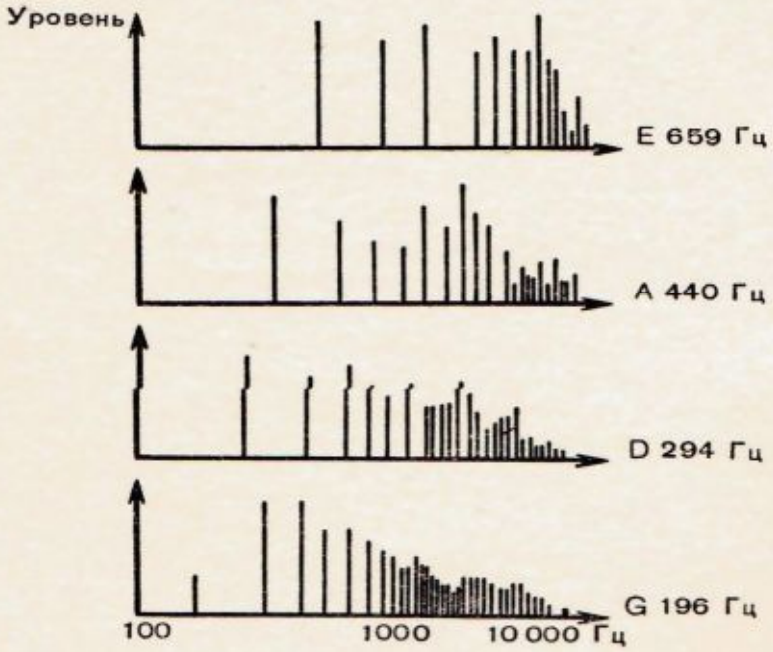
Звучание данного инструмента определяется и другим качеством: изменением громкости ноты по мере ее звучания, т. е. звучание зависит от ее огибающей. В этом отношении скрипка и все семейство струнных, где струна возбуждается непрерывно, существенно отличается по звучанию от рояля, арфы или клавесина.

Тембр

Тембр звучания какого-либо музыкального инструмента из семейства струнных — будь то скрипка, альт, виолончель или контрабас — определяется качествами резонатора и прежде всего его размерами. Большой резонатор лучше отзывается на низкие ноты и лучше излучает их, чем маленький. А резонатор скрипки слишком мал, чтобы эффективно излучать первую гармонику самой низкой



Пилообразное колебание. Сложение трех первых гармоник дает *пилообразное колебание* («пилу»), т. е. такое колебание, которое возникает, если провести смычком по струне скрипки. Струну плавным движением отклоняют от исходного положения в которое она стремится вновь вернуться, и т. д.



Недемпфированные струны скрипки. Относительная густота спектра излучаемых гармоник.

ноты (соль основной октавы). Сильно различаются по тембру звучания низкие ноты (они очень обогащены гармониками) и высокие (у них сравнительно сильные нижние и средние гармоники, однако тембр звучания относительно «жидок»).

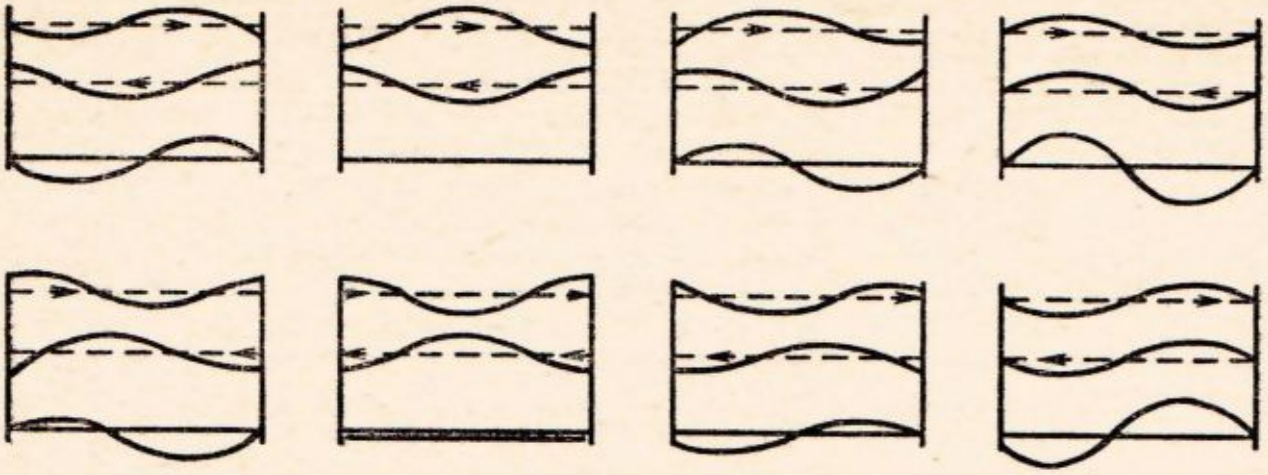
Мы уже знаем, что одни частоты возбуждаются лучше других, в зависимости от места возбуждения струны; форма и размеры резонатора еще больше влияют на звучание. Эту характеристику звучания резонатора называют его формантой. Для многих музыкальных инструментов форманты являются положительным моментом, тогда как их наличие в звукотехническом оборудовании называют «неровной (или «неравномерной») частотной характеристикой» и обычно считают большим недостатком.

Музыкальная акустика: духовые инструменты

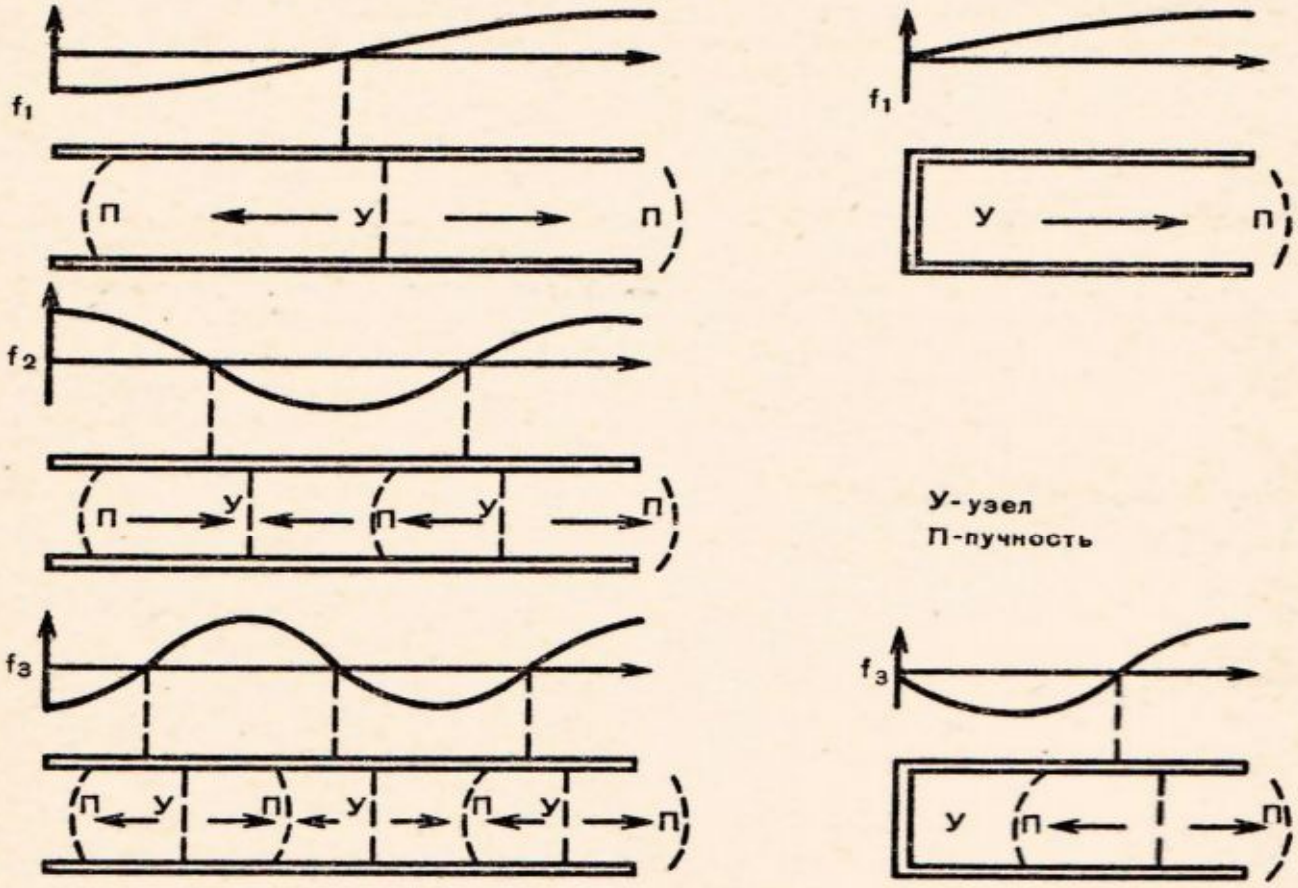
Столб воздуха, находящийся внутри духового инструмента, можно возбуждать, создавая турбулентный поток у края отверстия (как, например, у флейты), одним или двумя язычками в мундштуке (как у кларнета или гобоя) или же непосредственно губами исполнителя (как у медных духовых). Слышимая нота зависит от размеров резонатора и от способа образования в нем стоячих волн. Бегущая волна превращается в стоячую, отражаясь от границы раздела двух сред. Частицы воздуха, находящиеся непосредственно у твердой, неподвижно закрепленной поверхности, не могут двигаться перпендикулярно ей: падающая и отраженная волны складываются таким образом, что смещение частиц около этой поверхности всегда равно нулю. Это называют узлом в стоячей волне, причем узлы будут повторяться на расстоянии одной, двух и т. д. полных волн от стенки. На расстоянии же половины длины волны располагаются пучности — здесь смещение частиц воздуха достигает максимума.

Поведение стоячих волн

Звуковая волна на самом деле отражается не полностью: часть ее поглощается стенкой, часть — проходит на другую ее сторону. Однако в воздушном столбе духового инструмента колебания существуют в виде стоячих волн. В самом деле, пусть воздушный столб с двух сторон сообщается с окружающим воздухом, однако отражения все равно имеют место, поскольку труба в поперечном размере слишком узка по сравнению с большей частью длин волн, существующих внутри столба. Воздух в трубе становится поршнем, который недостаточно велик, чтобы эффективно возбудить колебания в окружающем воздухе. Энергия волны в этом случае должна как-то трансформироваться: она многократно отражается вдоль столба воздуха внутри трубы, создавая мощную стоячую волну, высота тона которой определяется длиной столба.



Стоячая волна. Образуется при движении двух бегущих волн в противоположном направлении, когда они последовательно усиливают и ослабляют друг друга. Амплитуда результирующей волны вдвое больше амплитуды складывающихся волн.



Колебания воздушного столба. Слева: для трубы, открытой с обоих концов, длина волны основной гармоники f_1 примерно вдвое больше длины трубы. Обертоны кратны основному тону: $f_2 = 2f_1$; $f_3 = 3f_1$ и т. д.
Справа: для трубы, закрытой с одного конца, длина волны основной гармоники f_1 в четыре раза больше длины трубы. Четные гармоники отсутствуют: первый обертон имеет частоту $3f_1$, следующий — $5f_1$ и т. д.

Гармоники в воздушном столбе

В одних инструментах воздушный столб открыт с одного конца, в других — с обоих концов. Столб воздуха, который открыт (или закрыт) с обоих концов, имеет основную гармонику с длиной волны, равной удвоенной длине трубы, и создает полную гармоническую последовательность волн. В столбе воздуха, открытом с одного конца и закрытом с другого, длина волны основной гармоники равна его учетверенной длине, причем существуют только нечетные гармоники.

Длина столба воздуха может изменяться либо непрерывно (как, например, в тромбоне), либо скачками — путем добавления дополнительных отрезков определенной длины (как в трубе или валторне), либо благодаря открыванию и закрыванию отверстий в корпусе инструмента (деревянные духовые). Форманта инструмента зависит от формы корпуса и раструба (открытого конца).

Голос

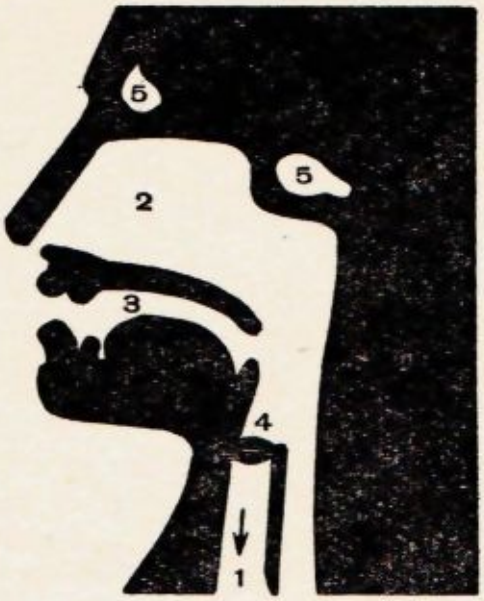
Особые свойства человеческого голоса являются следствием точного управления высотой тона, издаваемого голосовыми связками, и подвижности полостей рта, носа и гортани, которые обеспечивают переменные формантные характеристики произносимых звуков.

Эти формантные характеристики, соответствующие собственному резонансу полости, лежат в основе гласных звуков и в немалой степени ответственны за разборчивость речи. Бóльшая часть изменений формант наиболее ярко выражена в частотной области между 200 и 2700 Гц. Этот диапазон и был выбран для передачи речи по телефонному каналу.

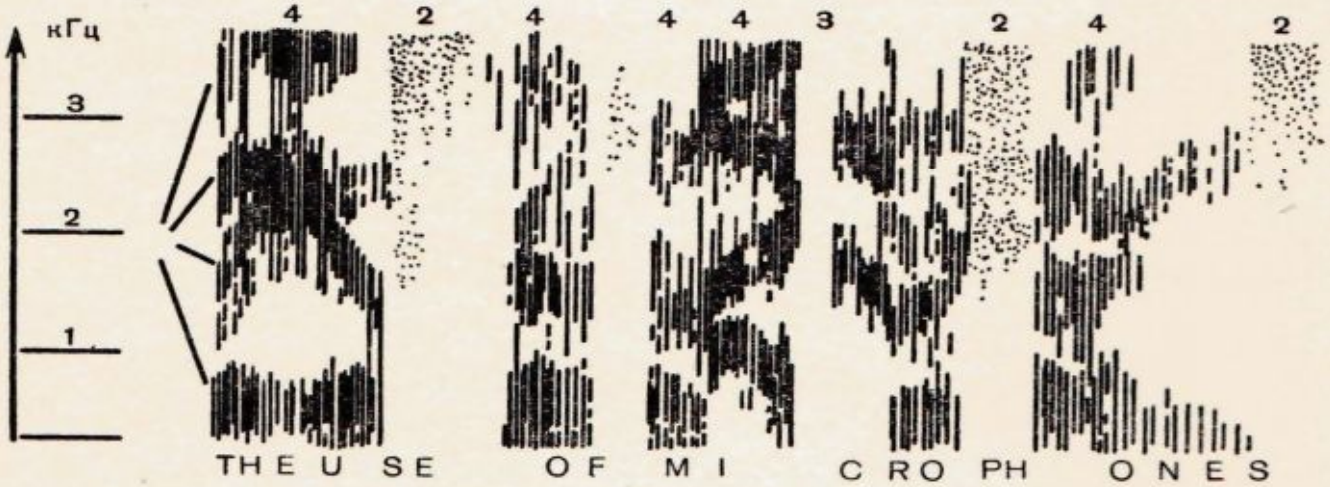
Для речи характерны шипящие и свистящие звуки, а также паузы разной продолжительности, которые в совокупности с формантными резонансами обеспечивают все необходимое для создания разборчивости. Шипящие и свистящие звуки увеличивают частотный диапазон речи до 8 кГц. Шепот, когда голосовые связки не работают вовсе, может быть совершенно ясным и разборчивым.

Колебания, создаваемые голосовыми связками, придают речи дополнительные особенности, позволяют петь. Для нормального голоса основной тон может изменяться в диапазоне двенадцати нот, центральная частота которых находится около 145 Гц для мужского голоса и 230 Гц — для женского.

Поскольку формантные области мужского и женского голосов мало отличаются друг от друга, в женском голосе, следовательно, меньше гармонических составляющих в области большего резонанса; женский голос поэтому обычно воспринимается как более слабый (и более чистый, ясный), чем мужской. При пении основной диапазон большинства голосов не превышает двух октав, хотя в исключительных случаях он бывает гораздо шире.



Голосовые полости: *1* — легкие; *2* — нос; *3* — рот (эта полость, обладающ наибольшей гибкостью, используется для формирования гласных звуков); *4* гортань (выше голосовых связок); *5* — пазухи. Эти полости создают формант характерные для голоса человека, подчеркивают одни частотные области за сч подавления других.



Речь, подвергнутая анализу, чтобы выявить формантные области: *1* — резона ные полосы; *2* — безголосый звук; *3* — пауза перед твердым «и»: точно такая пауза была бы перед взрывным «п»; *4* — голосовой звук. Форманты здесь не имеі отношения к собственным частотам и гармоникам, которые можно было бы вы вить только путем анализа в более узких частотных полосах, чем те, что бы использованы в нашем примере. На рисунке проанализирован голос автора кни произнесшего по-английски ее название. У каждого человека голос обладает инд видуальными признаками.

Микрофон для передачи речи

Для микрофонов, предназначенных для передачи оркестровой музыки (как, впрочем, и для любых звукотехнических устройств такого назначения), прием человеческого голоса не представляет собой никаких технических сложностей: ни с точки зрения диапазона частот, ни в отношении диапазона громкостей. Исключение составляет лишь взрывной звук «п», который может заставить мембрану микрофона выйти далеко за пределы рабочего диапазона линейных смещений, если говорящий слишком близко поднесет микрофон к губам.

Впоследствии мы увидим, что для улучшения разборчивости речи требуется, чтобы на микрофон попадало меньше отраженного (реверберирующего) звука, чем при передаче звучания музыкальных инструментов. Это в свою очередь может создать дополнительные трудности при работе вблизи направленного микрофона. Однако помимо этого для речевых микрофонов наиболее важно решить, нужно ли иметь очень широкий диапазон передаваемых частот: ведь это не только достигается путем удорожания конструкции, но и приводит к приему шумов на обоих крайних концах звукового диапазона.

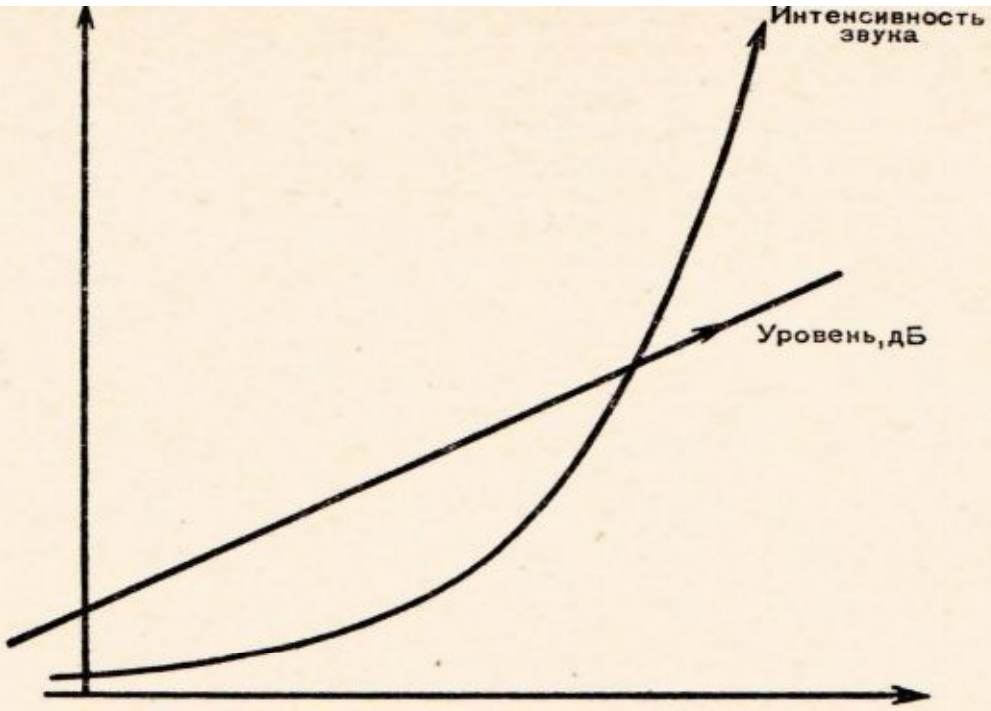
Иногда разборчивость речи улучшается, если используют микрофон, имеющий частотную характеристику с подъемом в области 6÷9 кГц. В микрофонах старой конструкции или в дешевых моделях такой подъем существует сам по себе. Однако это может подчеркивать шипящие и свистящие звуки в речи.

Громкость звука и слух

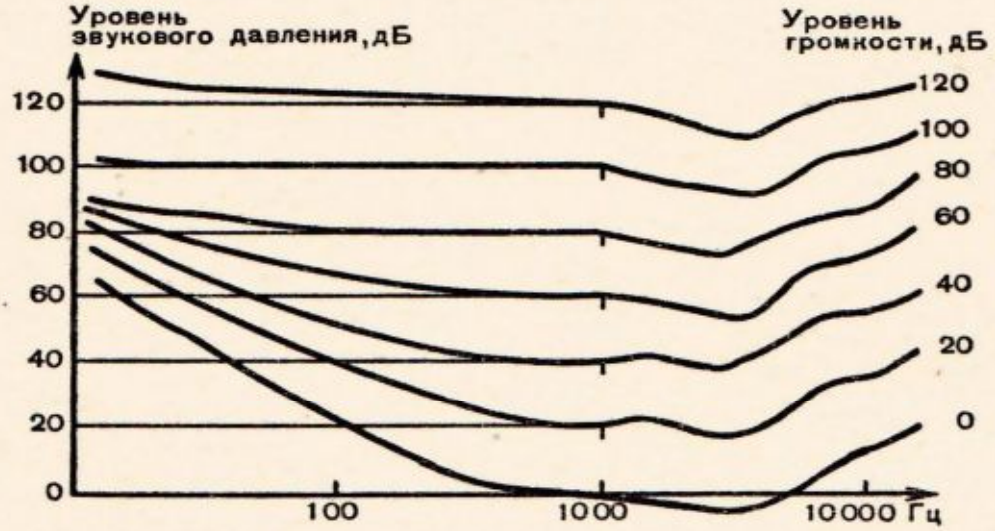
Удвоение интенсивности звука (или, соответственно, его энергии) воспринимается на слух всякий раз как одинаковое увеличение уровня громкости. Интенсивность — физическая характеристика звука в воздушной среде. Если интенсивность звука возрастает скачками 1:2:4:8:16:32 и т. д., ухо воспринимает это как равномерное увеличение уровня громкости 1:2:3:4:5:6 и т. д. Из-за такой особенности слуха звук неудобно оценивать, используя термины «интенсивность» или «энергия звука». Поэтому воспользовались понятием уровня звукового давления, измеряемого в децибелах (дБ).

Математически уровень звукового давления записывается как десять логарифмов отношения интенсивностей. Увеличение уровня звукового давления 1:2:3:4:5:6, выраженного в децибелах, воспринимается на слух как равномерное, плавное возрастание громкости.

Децибел — очень удобная единица: это соответствует примерно такому увеличению уровня звукового давления, которое человек при наиболее благоприятных условиях еще способен различить на слух.



Интенсивность и уровень громкости. При экспоненциальном возрастании интенсивности звука соответствующее увеличение уровня громкости (субъективно воспринимаемое на слух) происходит по линейному закону.



Кривые равной громкости (согласно данным Флетчера и Мансона). По оси слева отложены значения уровня звукового давления; справа приведены значения уровня громкости: эти величины равны на частоте 1000 Гц. Усредненные типичные кривые на этом рисунке иногда называются характеристикой «нормального» слуха, хотя характеристики, снятые у нормально слышащего человека, могут сильно отличаться от приведенных здесь (правда, кривая порога слышимости будет во всех случаях очень близка к изображенной). Ухо хуже воспринимает разницу в уровнях звукового давления на нижних частотах — за исключением, правда, очень громких звуков, когда слышать становится «легче» из-за усиления физических ощущений. Верхний предел чувствительности слуха называют болевым порогом. Обычно считают, что он находится где-то между 100—120 дБ. (В действительности низкочастотный шум с уровнем в 135 дБ не обязательно воспринимается как болезненный, хотя он вызывает неприятные ощущения: становится трудно дышать.)

Интенсивность и уровень громкости

3 дБ примерно соответствуют отношению интенсивностей 2 :1. Это надо запомнить, поскольку при увеличении мощности источника звука вдвое его интенсивность — при сохранении одного и того же расстояния до него — также удваивается. Так, если одна певица поет в полный голос и к ней присоединится вторая с голосом такой же силы, то уровень звукового давления увеличится на 3 дБ (не так уж и много, если учесть, что минимально различимый на слух порог изменения уровня звукового давления составляет около 1 дБ). Если же мы захотим увеличить уровень звукового давления еще на 3 дБ, потребуется пригласить уже двух певиц. Новые 3 дБ можно получить, добавив сюда сразу четырех певиц и т. д. Уровень звукового давления не успел еще сильно измениться, а нам уже понадобится для каждого последующего увеличения на 3 дБ прибавить соответственно 64 и 128 певиц...

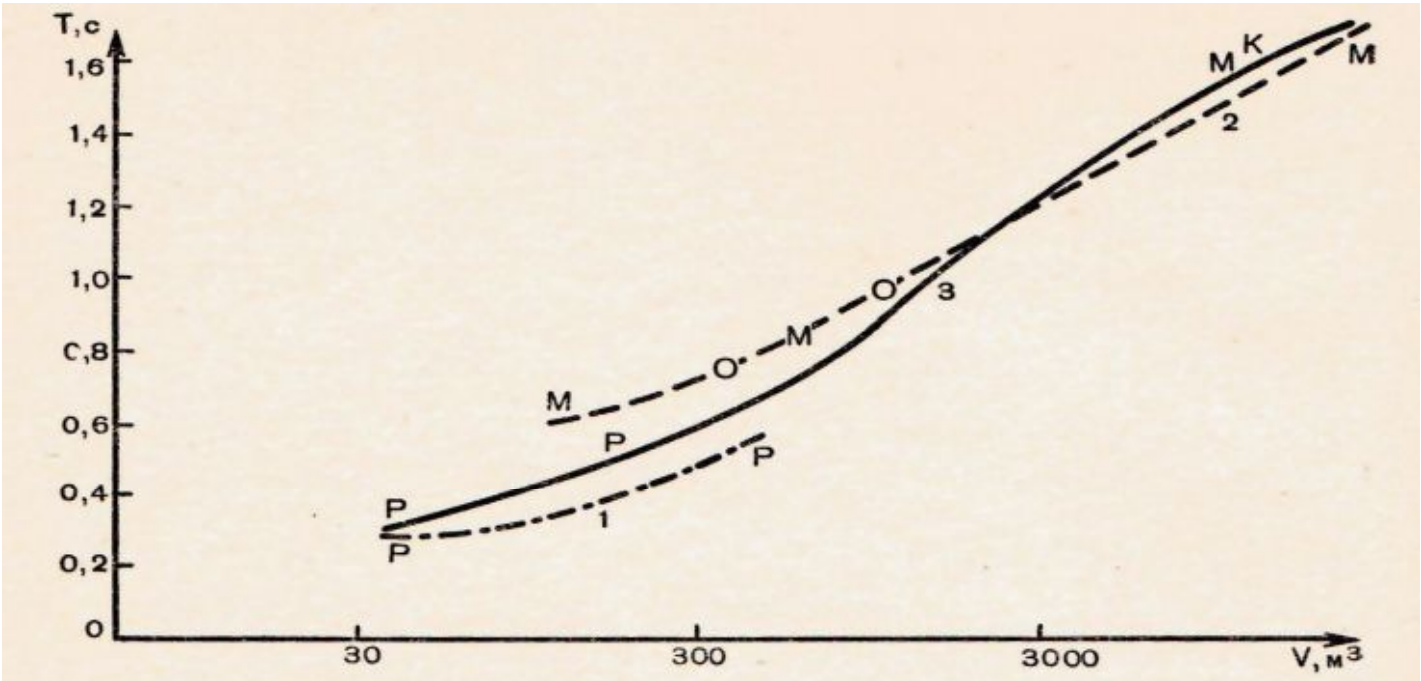
Как человек слышит различные частоты

Ухо не одинаково реагирует на звуки разных частот: оно более чутко воспринимает изменения уровня звукового давления на средних и верхних частотах, чем на нижних. Поэтому уровень громкости (субъективно ощущаемое качество звука) и уровень звукового давления, который можно объективно измерить, не одинаковы на разных частотах. Уровень громкости в фонах приравнивают уровню звукового давления в децибелах на частоте 1000 Гц. Ожидаемый субъективный уровень громкости на других частотах можно получить, используя стандартный набор кривых, которые характеризуют некий «усредненный» слух человека.

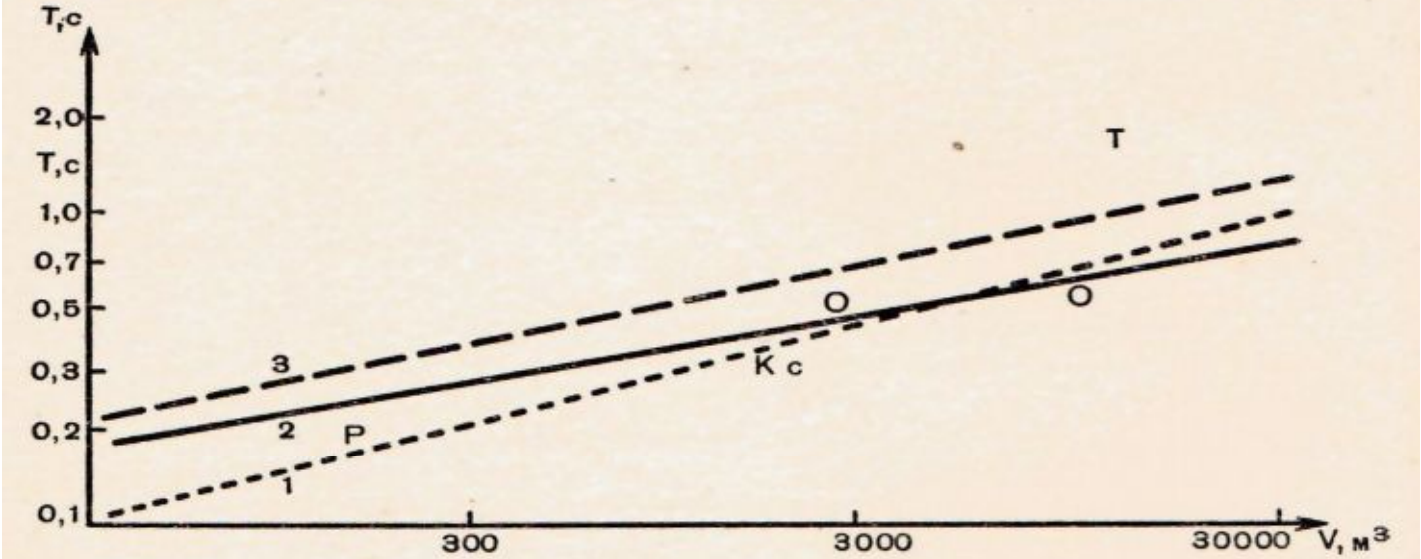
Нижний предел (нижняя кривая) называется порогом слышимости. Удобно считать усредненный нижний предел чувствительности уха в 1000 Гц за нулевой уровень по оси децибел. (На самом деле это не нулевой сигнал: произвольно выбранный нулевой уровень звукового давления соответствует акустическому давлению, равному 2×10^{-5} м Н/м²).

Студии: время реверберации и окраска звучания

В замкнутом помещении звуки многократно отражаются от стен, пола, потолка, декораций и т. п., так что при каждом отражении некоторая часть звуковой энергии поглощается ими. Скорость затухания отраженного звука определяет основную характеристику любого помещения: его стандартное время реверберации, т. е. такой отрезок времени, в течение которого интенсивность звука ослабляется в миллион раз (на 60 дБ) по сравнению с первоначальной. Время реверберации зависит от частоты, поэтому характеристики помещения могут быть показаны на графике для всех звуковых частот. Иногда говорят, что в таком-то помещении время реверберации максимально в диапазоне частот от 500 до 2500 Гц.



Время реверберации в студиях звукозаписи: *1* и *2* — общепринятые значения оптимального времени реверберации для передачи речи (Р) и музыки (М), предложенные американским акустиком Л. Беранеком; *3* — средняя линия показывает характеристику студий хорошего качества, выведенную на основании исследований Би-Би-Си. Сюда входят: *О* — студии общего назначения, которые будут несколько переглушены в одних случаях (для *Т* порядка 0,7 с) и достаточно гулки — в других (*Т* порядка 1,0 с); *К* — концертные залы.



Время реверберации в телевизионных студиях: *1* — нижний допустимый предел времени реверберации; *3* — верхний допустимый предел; *2* — оптимальные значения времени реверберации, которых стремятся достичь звукотехники Би-Би-Си. *Р* — значение времени реверберации в типичной речевой студии; *О* — в студии общего назначения. Наиболее трудные случаи, встречающиеся при использовании существующих помещений, показаны точками *Кс* (это превращенный в телестудию, неиспользуемый по назначению павильон на киностудии, который, как правило, бывает слишком переглушенным) и *Кт* (помещение переоборудованного под телестудию кинотеатра: он обычно слишком гулок).

иногда указывают конкретное измеренное значение для данной частоты сигнала.

Величина времени реверберации зависит от числа отражений за определенный промежуток времени, поэтому в больших помещениях время реверберации, как правило, больше, чем в маленьких. Слушатели знают об этом по собственному опыту, и такое соотношение размеров помещения и ожидаемой продолжительности звучания, к счастью для звукотехников, воспринимается хорошо.

Окраска звучания и собственные частоты

В некоторых помещениях звук может получать дополнительную окраску, которая выражается в подчеркивании отдельных частот или частотных полос при реверберации. Это явление вызвано многократным поглощением звуковой энергии в определенных полосах частот при отражениях звука от стен и прочих поверхностей. Оно проявляется особенно ярко в небольших по объему помещениях.

При наличии параллельных поверхностей могут существовать собственные частоты, т. е. резонанс на целом ряде частот, соответствующих размерам помещения. Если основные размеры помещения относятся друг к другу как ряд простых чисел, то собственные частоты могут проявляться очень сильно.

Равномерная диффузность звука — важное свойство, отличающее хорошую студию или концертный зал. Чем более размытым окажется фронт волны, тем плавнее затихнет звук: все частотные составляющие реверберационного процесса будут затухать одинаково долго.

Время реверберации и общие качественные показатели студии можно примерно оценить, просто хлопнув в ладоши: в речевой студии, например, звук должен затухать достаточно быстро и без «всплесков», однако не так быстро, чтобы этот хлопок показался «сухим» (т. е. когда студия переглушена). Тем не менее ни в коем случае нельзя допускать возникновения другой крайности: так называемого «подзванивания», т. е. пульсирующих колебаний на определенной частоте, которые существуют гораздо дольше остальных частотных составляющих.

Время реверберации музыкальных студий

Предпочтительное время реверберации в музыкальной студии, как показали опыты, зависит от ее размеров: чем больше помещение, тем больше время реверберации, хотя число отражений звука в единицу времени остается примерно одинаковым. Наиболее предпочтительное время реверберации при монофоническом звуковоспроизведении в радиовещании и грамзаписи должно быть на одну десятую долю секунды меньше , чем для музыки, воспринимаемой непосредственно. Некоторые специалисты рекомендуют несколько увеличить время реверберации на нижних частотах, однако в музыкальных студиях предпочитают иметь равномерную горизонтальную частотную характеристику времени реверберации во всем диапазоне звуковых частот.

Тон-студии Би-Би-Си, в которых прослушивают звукозаписи, для контроля их качества, имеют в среднем такую характеристику: время реверберации равно около 0,4 с до 250 Гц, а затем оно постепенно уменьшается до 0,3 с на 8 кГц.

Акустическая обработка помещения

Студия звукозаписи — это помещение с определенными, спроектированными заранее акустическими условиями. Время реверберации и его частотную зависимость можно изменять, управляя количеством отражаемой и поглощаемой энергии звуковых волн. Нередко на стенах и на потолке устанавливают рассеиватели, которые разбивают фронт звуковой волны, увеличивая число отражений в единицу времени, лучше «перемешивают» звуковую энергию. Мебель с жесткой поверхностью и неровные поверхности стен также делают звук более диффузным. Но основной способ управления акустикой помещения — использование различных поглотителей.

Коэффициент поглощения указывает на то, какая часть звуковой энергии поглощается на данной частоте измерения. Он может принимать значения от 0 до 1 и обычно (если это не оговорено специально) указывается для частоты измерения 512 Гц при перпендикулярном падении звуковой волны.

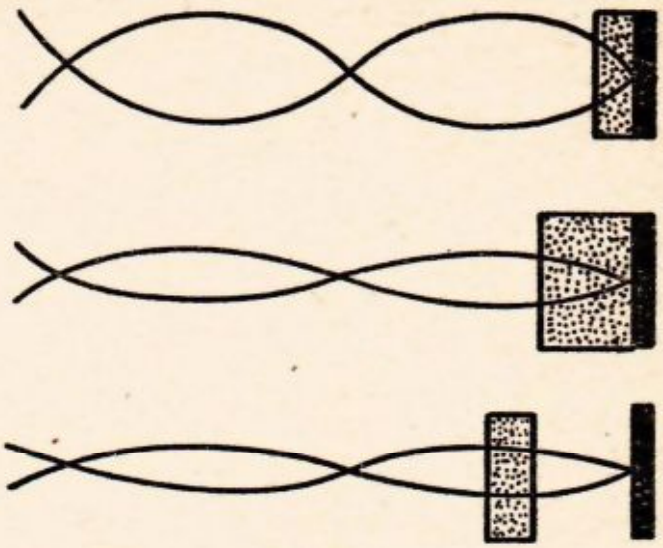
Типы поглотителей

Мягкие поглотители делают из материалов с пористой структурой, в которых энергия звуковой волны теряется на трение воздуха в порах. Для получения эффективного поглощения во всем диапазоне звуковых частот поглотители должны быть толщиной больше метра, поэтому они сравнительно громоздки и неудобны. Обычно поглотители делают такой толщины, чтобы они хорошо поглощали звук на частотах выше 500 Гц. Нежелательное сильное поглощение верхних частот можно уменьшить, если закрыть такой поглотитель перфорированной деревянной крышкой. Если отверстия занимают 5% всей поверхности крышки, бóльшая часть высокочастотных составляющих звукового сигнала будет отражаться; если же отверстия занимают 25% площади крышки, то бóльшая часть верхних частот будет поглощаться.

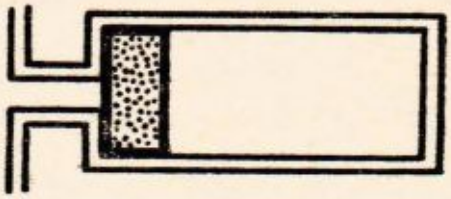
Задемпфированные резонансные поглотители используют принцип резонатора Гельмгольца, в котором масса воздуха в узком отверстии колеблется, испытывая воздействие воздушной «пружины», находящейся внутри резонатора. Резонансные поглотители нередко используют для устранения резких пиков в частотной характеристике времени реверберации студии, которые, как правило, вызваны существованием собственных резонансов помещения.

Мембранные поглотители часто используют для уменьшения низкочастотных составляющих: звуковая волна воздействует на деревянную мембрану, колеблющуюся подобно поршню, движения которого задемпфированы, так что энергия теряется на преодоление трения в системе (вся система имеет размытую резонансную

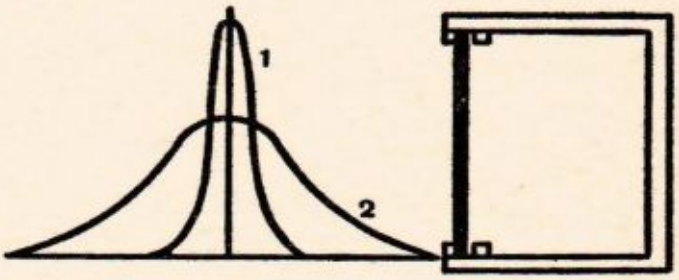
Мягкие поглотители. Обивка стены материалом с открытыми порами будет эффективно действовать лишь на довольно высоких частотах, где длина волны мала. Чем толще слой поглотителя, тем больше диапазон поглощаемых частот. Тонкий слой поглотителя (или, например, толстый драпировочный материал) хорошо работает в широком диапазоне частот, если его расположить на некотором расстоянии от отражающей поверхности.



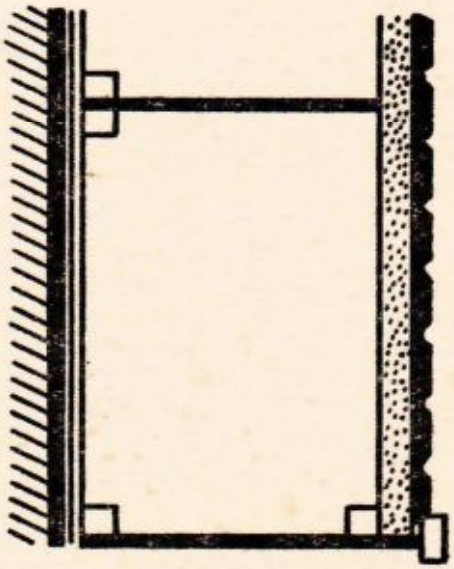
Задемпфированный резонансный поглотитель. Здесь используется принцип резонатора Гельмгольца, настроенного на определенную частоту (точнее, на узкую полосу частот), которая и поглощается.



Мембранный поглотитель — это деревянная мембрана, закрывающая собой ящик. В отличие от резонансного поглотителя (*1*), который отличается очень острой настройкой на определенную частоту, у мембраны, закрепленной по периметру, очень широкая резонансная кривая (*2*). Если мембрану дополнительно задемпфировать, утяжелив ее материалом типа рубероида, она будет поглощать звук.



Комбинированный поглотитель. Размеры его : 0,6 × 0,6 × × 0,175 м. Дно и стороны ящика сделаны из фанеры. Внутри ящика устроены деревянные перегородки, так что образуются ячейки размером 0,3 × 0,3 × 0,15 м.
Сверху ящик накрыт слоем плотного базальтового волокна толщиной 0,3 м, закрытого в свою очередь перфорированным деревянным щитом. Если отверстия занимают 5% всей площади щита, максимум поглощения будет на 90 Гц. Если отверстия занимают 20% всей площади щита, поглощаемый диапазон частот довольно широк и смещен в сторону более высоких частот.



кривую на средних и нижних частотах). На практике такие поглотители не всегда работают удовлетворительно.

Сейчас повсеместно с успехом используют комбинированный многоцелевой поглотитель, созданный сотрудниками звукотехнического отдела Би-Би-Си. Он представляет собой конструкцию из блоков размером примерно 0,6 × 0,6 м, которая проста в изготовлении и легко монтируется (см. с. 31).

Наилучший (и самый дешевый) поглотитель — это толстый ковер, положенный на пол или повешенный на стену.

Экраны

Экраны (или акустические щиты) представляют собой отдельно стоящие рассеиватели или комбинацию «рассеиватель-поглотитель». Размеры их обычно составляют 1 м в ширину и 2 м в высоту. Они плохо поглощают звук, поскольку слой поглотителя нельзя сделать достаточно толстым. В заглушенных студиях, специально построенных для записи вокально-инструментальной музыки, применяют экраны из синтетического материала «перспекс», который хорошо отражает высокочастотную часть спектра. Это способствует созданию повышенного местного уровня высоких частот, благодаря чему музыканты могут услышать звук собственных инструментов, а звукорежиссер лучше может управлять уровнем записи отдельных инструментов. Кроме того, улучшается диффузность звучания и в целом могут уменьшиться низкочастотные резонансы в студии.

Характеристики микрофонов

Микрофон — устройство, преобразующее акустическую энергию звука в энергию электрического сигнала. Применяют следующие основные типы микрофонов: для высококачественной звукопередачи — конденсаторные, электродинамические и ленточные, в остальных случаях — угольные и пьезоэлектрические.

При нормальных условиях микрофон должен развивать на выходе такой электрический сигнал, который был бы гораздо больше уровня собственных электрических шумов, т. е. у него должно быть хорошее отношение сигнал/шум.

Чувствительностью микрофона называют величину напряжения сигнала на выходе микрофона при единичном звуковом давлении. В принятой сейчас системе единиц СИ чувствительность выражают в децибелах относительно уровня 1 В/Н/м² при данном сопротивлении нагрузки.

Искажения и частотная характеристика

При нормальных уровнях звукового давления сигнал должен оставаться в значительной мере неискаженным, т. е. форма электрических колебаний должна достаточно точно соответствовать форме звуковой волны. Искажения, вызываемые в результате перегрузки микрофона, зависят от того, правильно ли он используется. Вблизи от раструба тромбона уровень звукового давления бывает на 60 дБ

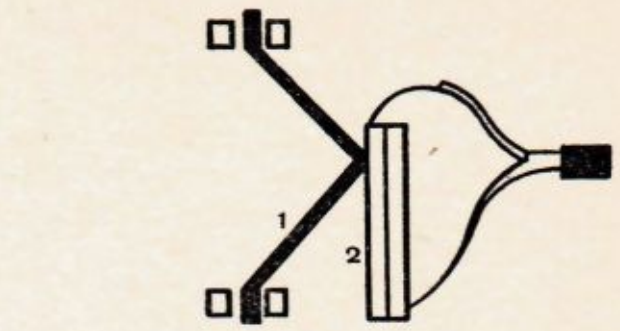
Пьезоэлектрический микрофон: *1* — легкая жесткая мембрана; *2* — биморфный кристалл: две пластинки из кристаллов сегнетовой соли, срезанные так, чтобы их оси были перпендикулярны друг другу. При изгибе таких кристаллов на их поверхности, между тонкими токосъемными пластинками, возникает разность потенциалов (так называемое *пьезоэлектрическое напряжение*). Микрофон такого типа не используют для высококачественной звукопередачи.

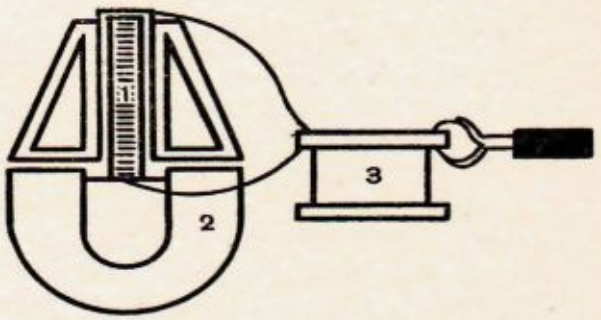
Ленточный микрофон: *1* — легкая гофрированная ленточка из фольги; *2* — постоянный магнит, полюсные наконечники которого находятся вверху; *3* — трансформатор. Напряжение на выходе микрофона появляется тогда, когда ленточка начинает колебаться в магнитном поле.

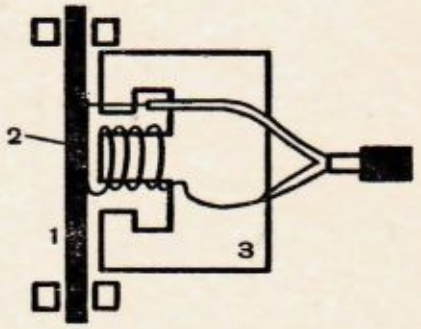
Электродинамический микрофон: *1* — диафрагма; *2* — звуковая катушка, соединенная с диафрагмой; *3* — постоянный магнит. Движение звуковой катушки вдоль центрального стержня (керна) магнитной системы приводит к появлению выходного напряжения. Такая конструкция отличается особой прочностью.

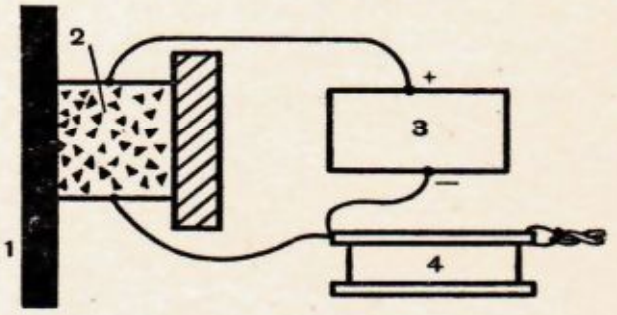
Угольный микрофон: *1* — диафрагма; *2* — капсюль с гранулированным угольным порошком; *3* — источник; *4* — трансформатор. Сила, действующая на диафрагму, изменяет внутреннее сопротивление между гранулами порошка в капсюле, к которому приложено поляризующее напряжение. Такая конструкция не используется при высококачественной звукопередаче.

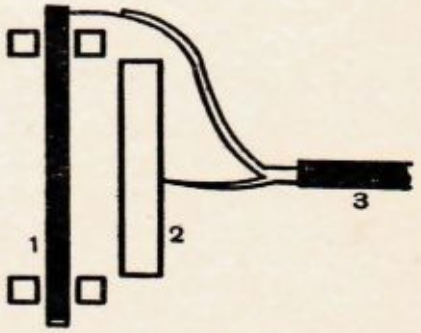
Конденсаторные микрофоны: *1* — легкая подвижная мембрана; *2* — неподвижная задняя пластина; *3* — провод к усилителю и источнику поляризующего напряжения. Переменное звуковое давление изменяет емкость между мембраной и неподвижной пластиной. Это изменение и определяет выходной сигнал усилителя. Такая конструкция дорога, но может обеспечить звукопередачу самого высокого класса.











больше, чем любой другой звуковой сигнал, встречающийся в практике записи. Динамические микрофоны хорошо переносят такие перегрузки. Сам микрофон и все относящееся к нему оборудование должны почти одинаково реагировать на любые из значительных частотных составляющих звука, которые зависят от источника звука: для речи и для различных музыкальных инструментов нужны разные микрофоны. Иногда требуется, чтобы частотная характеристика микрофона не была ровной (горизонтальной).

Эксплуатационные качества, внешний вид, стоимость

Неотъемлемыми качествами микрофона являются также прочность корпуса и хорошая стойкость ко внешним воздействиям в процессе эксплуатации.

Электродинамические микрофоны хорошо переносят небрежное обращение, которому они подвергаются при работе вне студии звукозаписи, например при эксплуатации неопытными людьми: это либо те, у кого корреспондент берет интервью для радио или телевидения, либо громогласные певцы из современных поп-ансамблей. Электродинамические микрофоны также более предпочтительны, если их надо прикрепить к одежде, так как они сравнительно плохо воспринимают шорохи одежды.

Конденсаторные микрофоны также можно использовать во всех названных случаях.

Ленточные микрофоны больше остальных подвержены ветровым помехам. (В то же время микрофоны любого типа только выиграют, если при ветре будет использована подходящая ветрозащитная насадка.)

Внешний вид микрофона играет большую роль в телевидении. Масса и размеры микрофона имеют важное значение, если он предназначен для крепления к одежде.

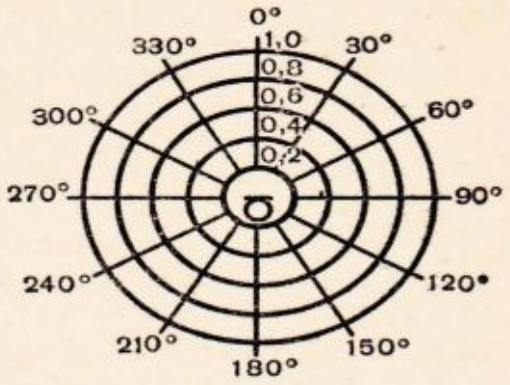
Пьезоэлектрические микрофоны — очень дешевые, хотя хорошие электродинамические микрофоны ненамного дороже их. Конденсаторные микрофоны дороже электродинамических; стоимость ленточных зависит от их конкретных показателей: некоторые модели таких микрофонов очень дороги.

Ряд микрофонов выпускают с возможностью переключения номинальной нагрузки. Обычно полагается, чтобы полное внутреннее сопротивление микрофона было равно номинальному сопротивлению нагрузки (это обеспечивает максимальную отдачу по мощности). Однако иногда рассогласование — низкое внутреннее сопротивление, нагружающее высокоомный вход — вполне допустимо или даже необходимо. Любители звукозаписи, не разбирающиеся в этих вопросах, должны посоветоваться со специалистом.

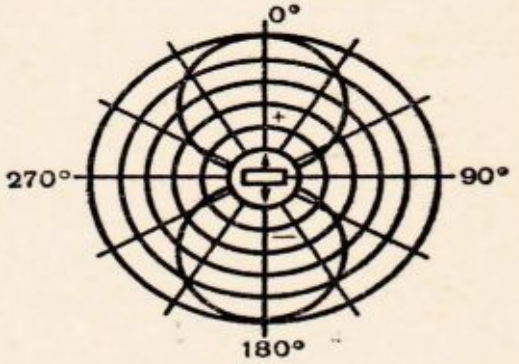
Характеристика направленности

Характеристика направленности микрофона наилучшим образом представлена его полярной диаграммой, на которой изображена его чувствительность в зависимости от угла падения волны относительно оси микрофона. Существуют два типа микрофонов.

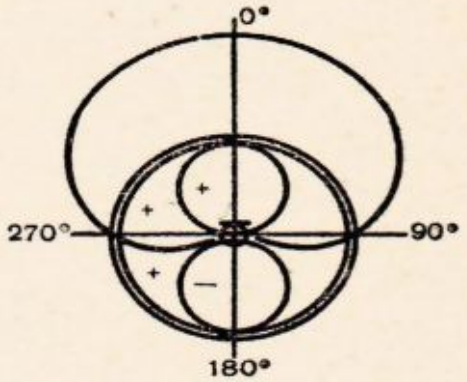
Полярная диаграмма: идеальная ненаправленная характеристика. По оси от центра круга отложены значения уровней чувствительности микрофона, которые измеряются относительно максимального значения, принимаемого за единицу. Применяется также шкала в децибелах. При этом 0 дБ находится на внешней окружности, а —25 или —35 дБ — на ближайшей к центру. Диаграмма направленности примерно одинакова во всем диапазоне частот.



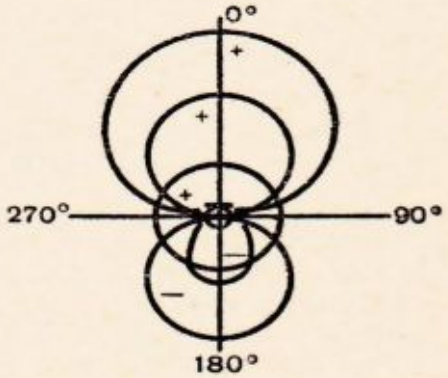
Идеальная «восьмерка» (двунаправленная характеристика). Эта характеристика направленности одинакова вдоль оси 0°—180°. Под прямым углом к ней, вдоль оси 90°—270°, выходной сигнал всегда равен нулю. Под 60° к оси мощность сигнала вдвое меньше мощности на оси микрофона. Сигнал с другой стороны микрофона имеет обратную полярность.



Идеальная кардиоида. Получается при сложении ненаправленной (круговой) и двунаправленной характеристик, когда максимальная осевая чувствительность обоих приемников равна единице. Передний лепесток «восьмерки» находится в фазе с ненаправленной характеристикой и потому складывается с ней, задний лепесток — в противофазе, т. е. он вычитается.



Типичная суперкардиоида. Такая характеристика существует у одного из вариантов кардиоидного микрофона. Ее можно получить, если по-разному сочетать ненаправленную и двунаправленную характеристики.



Однонаправленные микрофоны измеряют воздушное давление в звуковой волне и в идеале совершенно одинаково реагируют на звук, приходящий из любого направления. Так работают электродинамические микрофоны простейшей конструкции, пьезоэлектрический и угольный микрофоны. Воздух может воздействовать на мембрану только с одной стороны.

Двунаправленные микрофоны имеют диаграмму направленности в виде «восьмерки». Мембрана в них открыта для действия воздуха с обеих сторон: она измеряет градиент давления, т. е. разницу в величине давления в двух точках, расположенных последовательно одна за другой вдоль направления распространения волны. Если микрофон поместить «боком» к волне, он будет сравнивать давления в двух точках одного и того же волнового фронта, а поскольку они одинаковы, на выходе не будет никакого сигнала. Такой микрофон не принимает сигнала, приходящего к нему сбоку, а реагирует лишь на сигналы спереди и сзади. Простейший ленточный микрофон именно так и работает, реагируя на разницу давлений по обе стороны гофрированной ленточки из алюминиевой фольги.

Кардиоидные и комбинированные микрофоны

Кардиоидные микрофоны можно считать однонаправленными в том смысле, что они не принимают сигнал с одной стороны и принимают его с противоположной, причем прием происходит в широком диапазоне углов и без различия по частотам. Полярная диаграмма кардиоидного микрофона, напоминающая по форме сердце, получается при сложении выходного сигнала двух микрофонов, один из которых реагирует на давление (например, обычный ленточный микрофон). В первых моделях кардиоидных микрофонов именно так и поступали, помещая в одном корпусе и ленточный и динамический микрофоны. Сейчас во многих кардиоидных микрофонах по-прежнему находятся две мембраны (обычно так делают в конденсаторных микрофонах). Иногда делают одну мембрану и позади нее устанавливают сложную акустическую конструкцию.

Кардиоидная диаграмма направленности — лишь частный случай комбинации приемников давления и градиента давления. Изменяя пропорции в этом сочетании двух приемников, можно получить целый набор разных полярных диаграмм. Если в одном корпусе установлено несколько приемников, можно по мере необходимости отключить тот или другой. Конденсаторные микрофоны со сдвоенной мембраной еще более универсальны, поскольку, изменяя величину поляризующего напряжения, можно получить большое количество различных диаграмм направленностей. Особенно полезна диаграмма направленности, называемая суперкардиоидной, которая используется в селективных однонаправленных микрофонах.

Остронаправленные микрофоны используют один из названных выше типов приемников в сочетании с устройством, которое фокусирует или каким-либо иным способом изменяет звуковое поле.

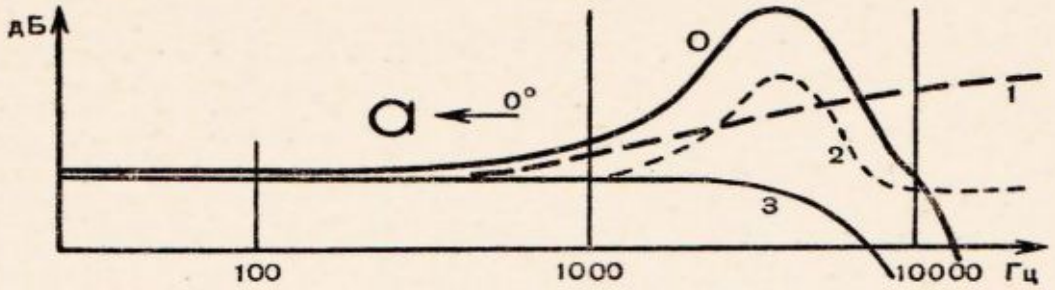
Частотная характеристика на практике

Даже если частотная характеристика чувствительности микрофона, измеренная на его оси, очень близка к прямой линии, она обязательно ухудшается при измерениях под углом к оси или с обратной стороны микрофона. Дело в том, что характеристика направленности меняется в зависимости от частоты. Наиболее ярко это будет выражено, если измерить частотную характеристику направленного микрофона со стороны минимальной чувствительности, однако такая частотная характеристика мало о чем нам скажет, так как выходной сигнал весьма мал. В промежуточных направлениях (т. е. между направлениями минимума и максимума приема сигнала) даже небольшое изменение угла, под которым производится измерение частотной характеристики, может очень сильно видоизменить ее по сравнению с осевой частотной характеристикой (смотри также графики на следующей странице). Это нередко можно использовать для улучшения баланса при звукозаписи. Достаточно повернуть микрофон на небольшой угол в сторону от источника звука, чтобы уменьшить чрезмерно большое количество высоких частот или, наоборот, направить микрофон прямо на источник, если при сильном шумовом фоне требуется увеличить разборчивость.

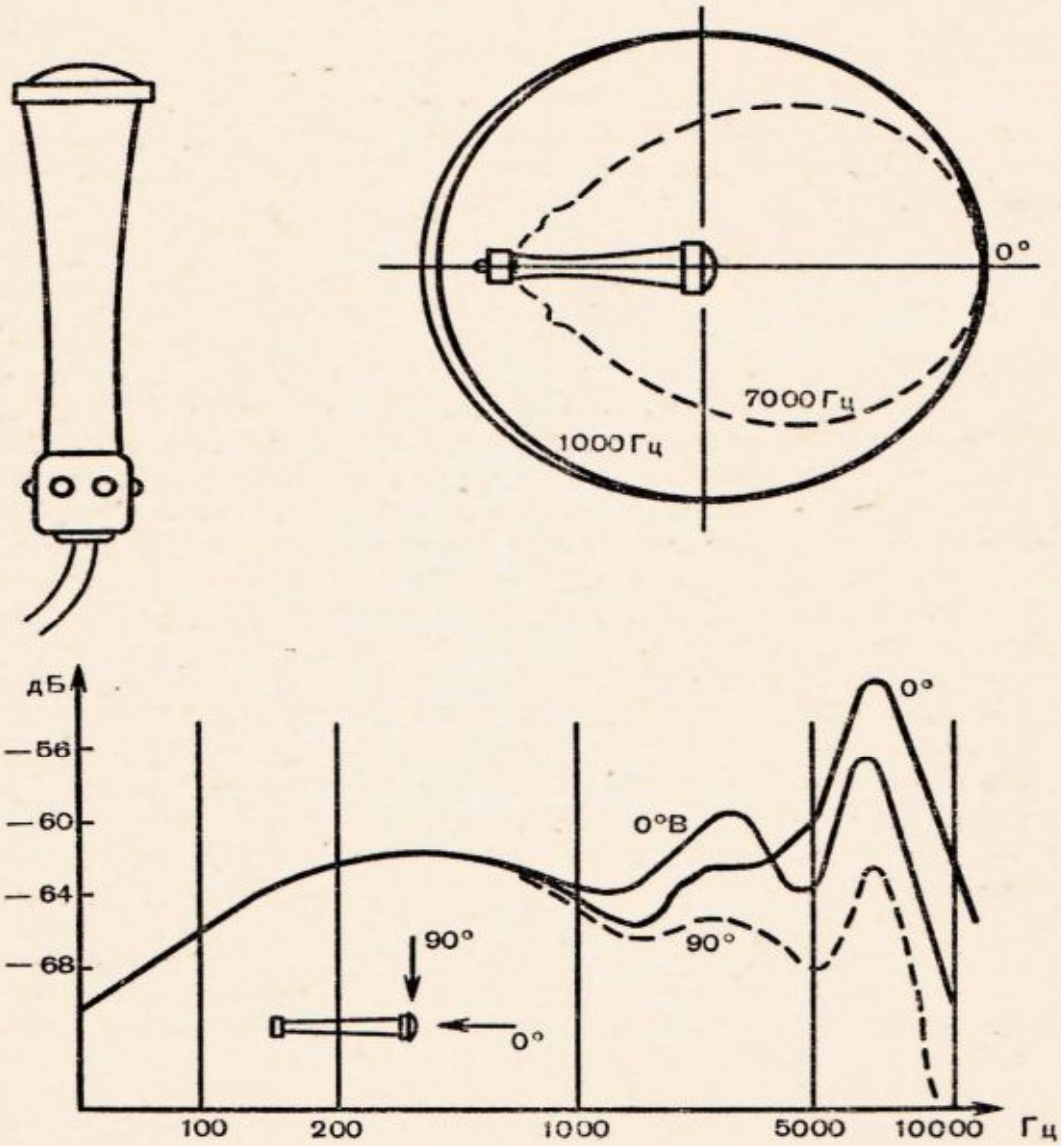
Факторы, влияющие на частотную характеристику

Помимо типа приемника звука (приемник давления или градиента давления) существует еще целый ряд факторов, оказывающих прямое влияние на частотную характеристику микрофонов. Сюда относятся: экранирующее действие корпуса микрофона, из-за которого ухудшается прием высокочастотных составляющих по этому направлению; отражения звука внутри корпуса, вокруг мембран, вызывающие большую неравномерность их на высоких частотах; частные резонансы в воздушных полостях между корпусом микрофона и мембраной, которые могут дать пик на высоких частотах; частные резонансы в полости позади мембраны и в канальцах, сделанных для выравнивания давления по обе стороны мембраны; уничтожение самых верхних частот на поверхности мембраны, когда длина волны становится сравнима с ее диаметром; возникновение стоячих волн в пространстве внутри корпуса, перед мембраной, также в области верхних частот; собственный резонанс мембраны (у ленточных микрофонов он находится на низкой частоте).

Многие из этих факторов находят соответствующее применение при разработке микрофонов, причем это зачастую проявляется в повышенной чувствительности микрофонов к высокочастотным составляющим сигнала (скажем, на 4 кГц и выше) на оси микрофона или поблизости от нее. Наибольшие пики на высоких частотах бывают в старых моделях микрофонов или в дешевых моделях, у которых мембрана сравнительно велика (например, диаметр ее может быть равен примерно 3,8 см). Обычно сильно неравномерная частотная характеристика бывает в диапазоне от 5 до 10 кГц, при-



Высокочастотные явления на мембране микрофона. Частотная характеристика при 0° (О — т. е. на оси микрофона) складывается из нескольких компонентов, в том числе: *1* — эффект помехи (из-за которого возникают стоячие волны перед мембраной); *2* — частный резонанс объема перед мембраной; *3* — инерция мембраны, возрастающая по мере того как ее масса становится значительной по сравнению с возбуждающей силой высокочастотного колебания.



Динамический ненаправленный микрофон среднего качества. Разница между частотными характеристиками, снятыми на оси и под углом 90°, огромна. Наиболее ровная частотная характеристика — при 45°. Ветрозащита (0°В) сильно изменяет частотную характеристику, но не ухудшает существенно качество передачи речи.

чем пики могут достигать 7 дБ. У микрофонов с мембранами меньшего диаметра (обычно примерно 1,3 см) частотная характеристика гораздо более гладкая. Среди таких микрофонов наилучшими, как правило, являются конденсаторные, поскольку их мембраны весьма легки.

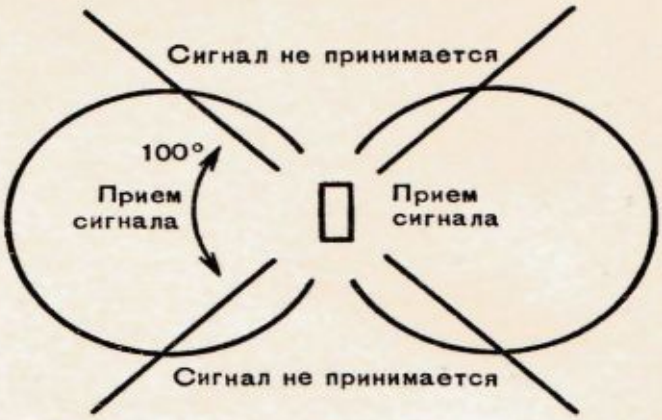
Частотная характеристика одного образца высококачественной модели микрофона может на несколько децибел отличаться от другого образца, однако это не играет большой роли (за исключением того случая, когда эти микрофоны должны работать в стереопаре при стереофонической звукопередаче). Столь небольшие отличия микрофонов — в том, что касается частотной характеристики — следует считать несущественными по сравнению с невероятно сложным характером принимаемых ими звуковых процессов (включая и реверберацию).

Двунаправленные микрофоны

В последние годы популярность двунаправленных микрофонов (таких, как, например, ленточные) пошла на убыль, особенно в связи с тем, что стоимость как конденсаторных, так и электродинамических моделей стала гораздо ниже. Конденсаторные микрофоны стали более универсальными и более надежными. Кроме того, в практике используют комбинированные микрофоны, сочетающие в одном корпусе качества разных типов. В результате этого появились такие технологические схемы записи звука, при которых двунаправленные микрофоны почти не применялись, а для каждого источника звука предназначался свой микрофон. Помимо всего прочего, качественные показатели ленточных микрофонов оказались превзойденными: появились улучшенные конструкции кардиоидных микрофонов, использующих иной принцип действия — ведь частотные характеристики ленточных микрофонов не отличались ни гладкостью, ни широкополосностью. Тем не менее ленточные микрофоны применяются по-прежнему в ряде случаев, где им нет замены, например, для передачи человеческого голоса и некоторых музыкальных инструментов (в особенности струнных), частотные характеристики которых подходят к частотным характеристикам ленточного микрофона.

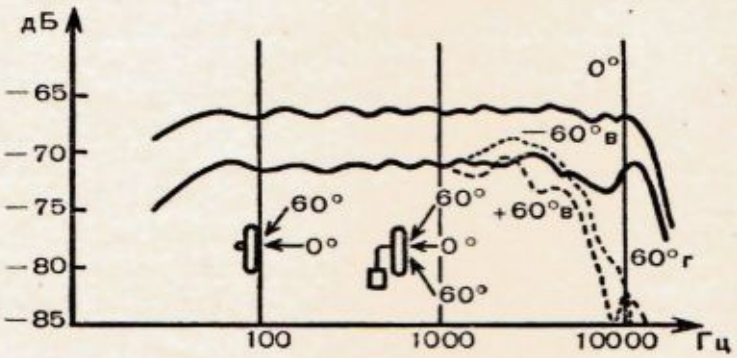
Управление акустикой помещений

Рабочая площадь при использовании двунаправленных микрофонов довольно велика (примерно 100° с каждой стороны микрофона). Это позволяет расположить на расстоянии около полуметра от микрофона несколько человек (четверо сидя или шестеро стоя). Благодаря отчетливо выраженной направленности можно использовать такие микрофоны в студиях или в помещениях с довольно большой гулкостью, которая, однако, не будет как-либо проявляться. Дело в том, что ненаправленный микрофон принимает отраженный звук со всех сторон, а двунаправленный — только в некотором пространственном угле спереди и сзади. При одинако-



Микрофон с характеристикой направленности в виде «восьмерки». Показаны рабочие области: с каждой стороны примерно под углом 100° микрофон воспринимает сигналы, приходящие к нему.

Типичный ленточный микрофон. Большую часть корпуса микрофона занимает магнитная система, которая в ранних моделях была довольно громоздкой, чтобы обеспечивалась нужная чувствительность.



Частотная характеристика ленточного микрофона. Частотная характеристика, снятая под углом 60° к оси, на 6 дБ ниже осевой (как и предсказано теоретически), однако примерно с 2 кГц она становится иной, чем осевая, поскольку начинают играть роль высокочастотные явления. При измерениях под углами ± 60° в вертикальной плоскости (в) они более ярко в ір ены, чем в горизонтальной (г).

вых акустических условиях говорящий должен находиться гораздо ближе к ненаправленному микрофону, чтобы был достигнут точно такой же баланс прямого и отраженного звука. Даже небольшие движения (скажем, поворот головы) уже оказывают сильное влияние на этот баланс. Поэтому двунаправленные микрофоны позволяют гораздо более гибко и тонко использовать акустику данного помещения.

Как избежать неправильного фазирования

Если два двунаправленных микрофона работают невдалеке один от другого, они должны быть включены в фазе. Если это условие не соблюдено, сигнал от двух источников прямого звука, находящихся на одинаковом расстоянии от этих микрофонов, будет взаимно уничтожаться. Чтобы не допустить этого, обычно на микрофонах четко указывают, какая сторона «передняя». Если два двунаправленных микрофона используют для передачи звука от различных источников, их нередко можно установить друг относительно друга так, чтобы каждый был расположен своей стороной минимального приема к источнику звука, работающему на другой микрофон.

Полярная диаграмма (характеристика направленности) ленточного микрофона в горизонтальной плоскости приблизительно соответствует идеальной, тогда как в вертикальной плоскости она изменяется довольно хаотично. Если изменения в характеристике направленности известны, их можно использовать в своих целях.

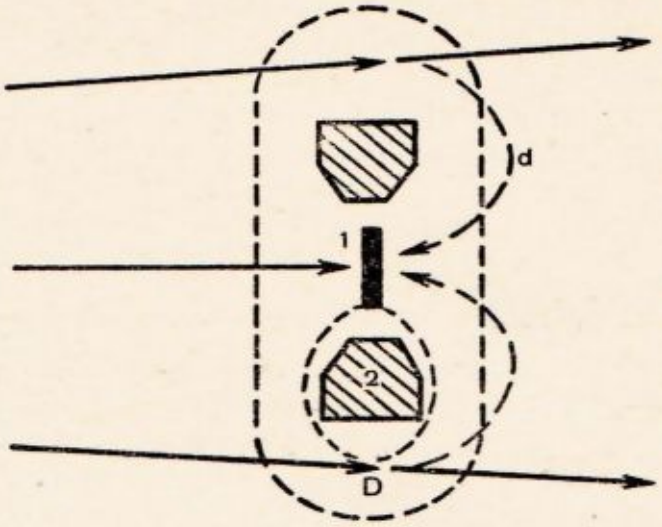
«Эффект ближней зоны» в направленных микрофонах

Подъем на нижних частотах — прямое следствие того, что микрофон работает в режиме приемника градиента давления, который необходим для получения обостренной характеристики направленности у двунаправленных, кардиоидных и аналогичных микрофонов. Сильнее всего этот эффект проявляется у микрофонов с характеристикой направленности в форме «восьмерки», меньше — при суперкардиоиде, еще меньше — у кардиоидных микрофонов и так далее, соответственно тому, в какой мере уменьшается значение двунаправленной компоненты по сравнению с ненаправленной компонентой комбинированной характеристики направленности.

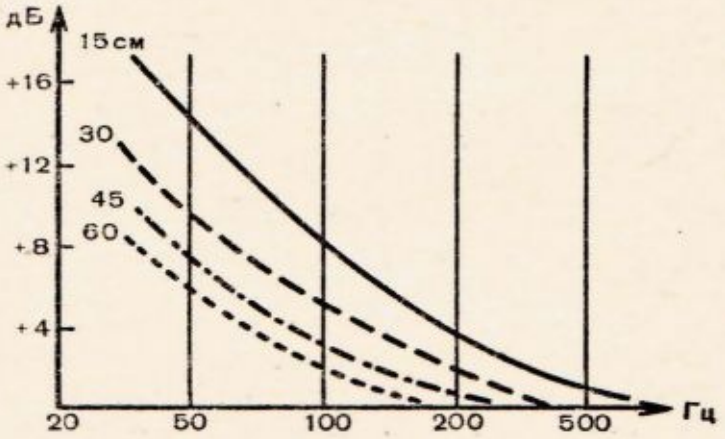
Все, что описано ниже, действительно для ленточного микрофона, чистого случая приемника градиенты давления, когда подъем нижних частот наибольший.

Подъем нижних частот происходит тогда, когда микрофон-приемник градиента давления находится в поле сферических волн и достаточно близко к их источнику, но при этом на расстоянии, которое волна должна пройти от передней стороны ленточки (мембраны) до задней, интенсивность звукового поля заметно падает. Это уменьшение интенсивности вызывает появление разности давлений, которое суммируется с обычным градиентом давле-

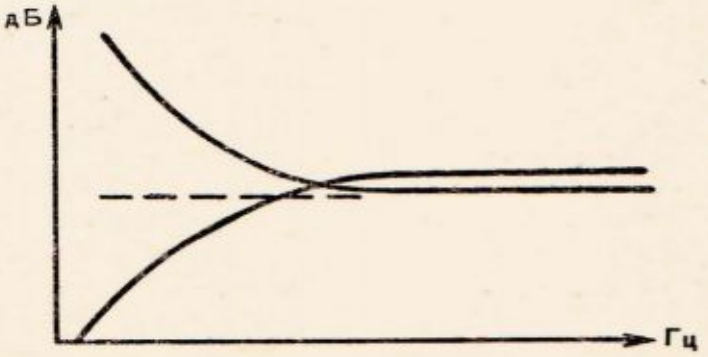
Принцип действия приемника градиента давления. Звуковая волна должна пройти больший путь, чтобы дойти до задней поверхности ленточной мембраны 1, чем до передней. Эффективная разность хода *d* примерно соответствует кратчайшему пути *D* вокруг полюсного наконечника 2.



Подъем нижних частот. Крайний случай подъема нижних частот при разных расстояниях от источника звука до микрофона с остронаправленной характеристикой. Этот график соответствует случаю двунаправленного микрофона с характеристикой типа «восьмерки» (ленточный микрофон, показанный на с. 40). Другие микрофоны с обостренной характеристикой направленности, в том числе кардиоидные и суперкардиоидные, подвержены этому же явлению, но в меньшей степени.



Компенсация при работе в ближней зоне микрофона. У некоторых микрофонов чувствительность к низкочастотным составляющим спектра понижена, и это само собой компенсируется при работе в ближней зоне микрофона: при определенном расстоянии от источника звука до микрофона частотная характеристика будет линейной.



ния, существующим благодаря разности фаз. Явление это ощутимо сказывается лишь на нижних частотах звукового диапазона, поскольку только там разность фаз будет мала по сравнению с уменьшением интенсивности звука.

Использование коррекции на нижних частотах

Частотные характеристики некоторых типов направленных микрофонов начинают спадать уже ниже 200 Гц. В таких случаях подъем нижних частот можно использовать для компенсации этого «завала» нижних частот. Если частотная характеристика микрофона на нижних частотах более гладкая, требуется «срезать» нижние частоты, т. е. осуществить коррекцию искусственным образом. Для этого помещают электрический фильтр прямо в корпус микрофона или используют обрезной фильтр, имеющийся в канале звукорежиссерского пульта, к которому подключен микрофон. Одно из преимуществ обрезания нижних частот — уменьшение реверберации помещения на них. Это может способствовать компенсации собственных резонансов небольшого помещения или устранению излишней «гулкости».

Рабочее расстояние

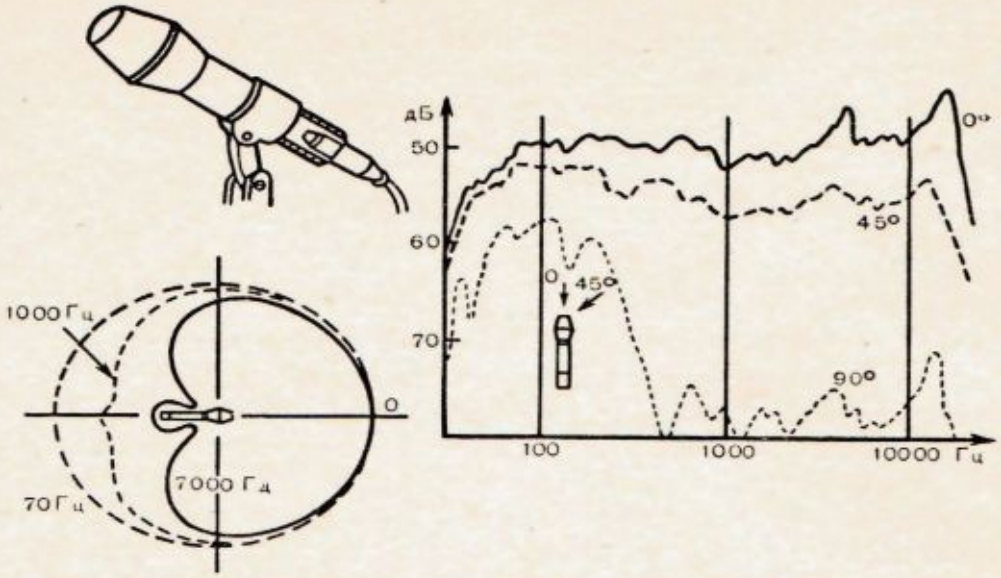
Без коррекции по нижним частотам минимальное рабочее расстояние может быть примерно от 50 см до 30 см и меньше — в зависимости от конкретной модели микрофона. При наличии коррекции оптимальное рабочее расстояние уменьшается, однако любое движение вперед-назад на несколько сантиметров от микрофона вызывает заметное изменение низкочастотного спектра. Чтобы не допустить его уменьшения, средний уровень автоматически регулируется.

Изменится также в данном случае и отношение прямого и отраженного звука.

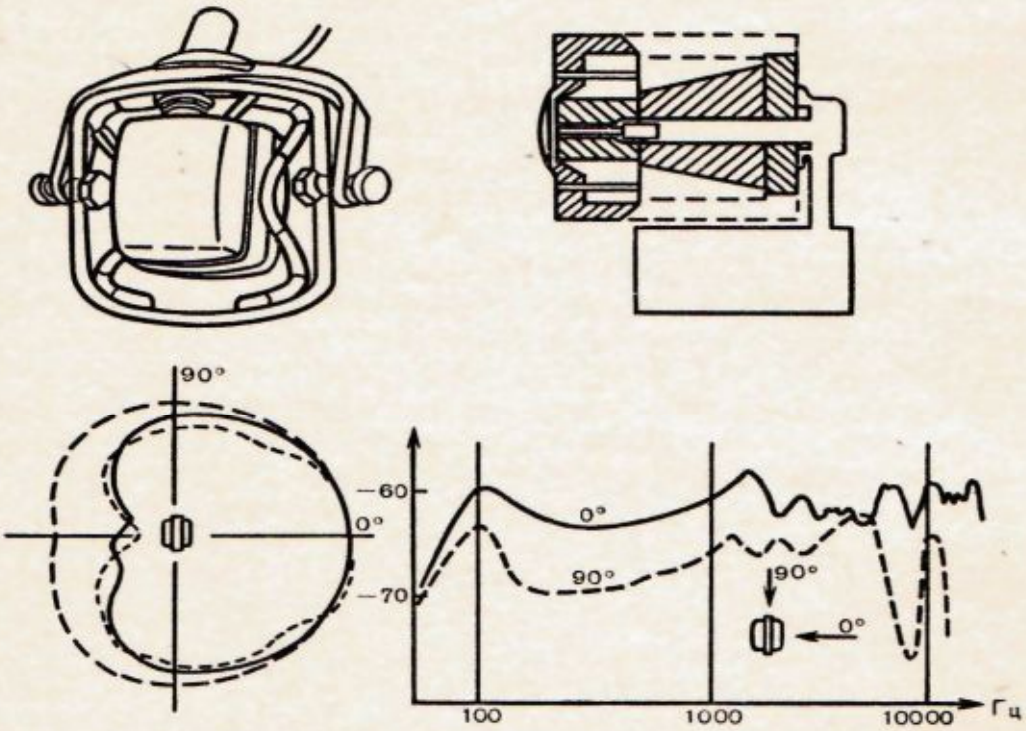
Подъем нижних частот для одних голосов более неприятен, чем для других. Женщины, у которых основная частота голоса выше, чем у мужчин, нередко могут говорить с меньшего расстояния, чем рекомендованное рабочее расстояние для данного микрофона, и искажение голоса по низким частотам не будет заметно. Нередко можно говорить шепотом совсем близко от микрофона, поскольку спектр шепота гораздо выше, чем спектр голоса.

Кардиоидные микрофоны

Рабочая зона у хорошего кардиоидного микрофона находится с передней стороны в широком пространственном угле примерно 160°. Сбоку чувствительность быстро падает, а сзади, когда выходной сигнал весьма мал, частотная характеристика имеет самый замысловатый характер. Подъем нижних частот при работе в ближней зоне существует, хотя он меньше, чем у микрофонов с характеристикой направленности типа «восьмерки». Характеристики направленности некоторых микрофонов рассматриваемого



Электродинамический кардиоидный микрофон с двумя мембранами. Пример микрофона, у которого ось симметрии мембраны совпадает с осью симметрии корпуса.



Электродинамический кардиоидный микрофон. Пригоден для установки на телевизионной стойке-«журавле». В корпус микрофона встроена сложная система акустических лабиринтов: воздушный резервуар (показан на упрощенном разрезе микрофона) демпфирует одну из трех колебательных систем, сделанных для достижения наиболее оптимальной частотной характеристики этого микрофона.

типа на нижних частотах приближаются к круговой, как у направленных микрофонов, и это сильно снижает тенденцию к подъему в области нижних частот. Однако это может само по себе зависеть как от расстояния, так и от частоты, поэтому прежде надо внимательно изучить технические данные микрофона, сообщаемые заводом-изготовителем, а затем, при непосредственном использовании, познакомиться со всеми особенностями и возможностями конкретного микрофона.

Комбинированные микрофоны и микрофоны с фазосдвигающим лабиринтом

Первоначальный способ получения кардиоиды (а именно совместное использование электродинамического и ленточного капсюля в одном корпусе) уже не применяют, однако большинство современных кардиоидных конструкций по степени сложности не уступают первоначальной. Чаще всего сейчас применяют электростатический капсюль с двумя мембранами. Но об этом речь пойдет позже.

В микрофонах с острой характеристикой направленности могут также применяться два электродинамических капсюля, расположенные задними, нерабочими сторонами друг к другу, или два ленточных капсюля, установленные один за другим. Соединив их между собой с помощью электрических фильтров, поворачивающих фазу сигнала, можно получить характеристики направленности, средние между ненаправленной характеристикой и «восьмеркой». В таких случаях одна мембрана находится на общей оси позади второй, поэтому их частотные характеристики различны; характеристика направленности должна также зависеть от относительной величины обоих сигналов. При разработке таких микрофонов возникает столько вариантов, что очень трудно делать обобщения. Лучше изучить свойства конкретных типов микрофонов, поскольку их выпускают для работы во вполне определенных условиях.

Характеристику направленности в виде кардиоиды можно получить и в случае микрофона с одной мембраной (например, в электродинамическом микрофоне), если позволить звуковой волне достигнуть обратной стороны мембраны через акустический лабиринт, расположенный за капсюлем и сдвигающий фазу волны.

Существуют два способа установки мембраны (или мембран) в корпусе микрофона. Первый способ — установить мембрану так, чтобы ее ось совпадала с осью, перпендикулярной акустической оси микрофона; второй, чаще используемый в комбинированных микрофонах, — делать ось мембраны осью симметрии корпуса.

Работа на микрофонной стойке

Электродинамические микрофоны (как с двумя мембранами, так и с фазосдвигающим лабиринтом) хорошо приспособлены для установки на микрофонных стойках или «журавлях» в кино и телевидении. Для записи речи это удобно, однако при записи музыки на стойке лучше монтировать конденсаторный микрофон. Какова

должна быть виброустойчивость стойки и требуется ли применять ветрозащиту для устранения помех при перемещении микрофона по воздуху, покажет опыт.

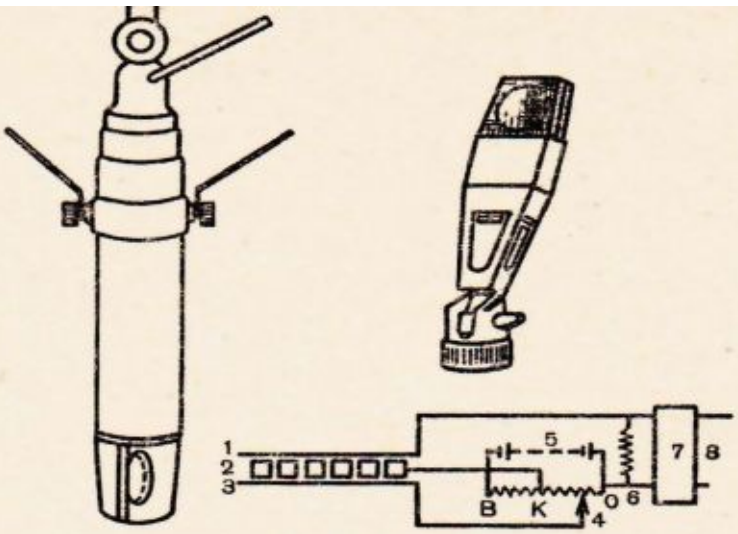
Конденсаторные микрофоны

Электростатические (или конденсаторные) микрофоны простейшей конструкции имеют круговую диаграмму направленности. У них одна очень тонкая гибкая мембрана, расположенная близко от поверхности жесткой пластины. Емкость между двумя обкладками такого конденсатора изменяется в соответствии с колебаниями звукового давления. Небольшой усилитель, расположенный либо в одном корпусе с капсюлем, либо достаточно близко от него, превращает эти колебания емкости в изменения напряжения. Мембрану либо делают из очень тонкой металлической фольги, либо напыляют на пластиковую подложку слой золота микронной толщины. В задней пластине сделаны отверстия, иначе тонкая прослойка воздуха оказалась бы слишком «жесткой» и не дала бы мембране свободно двигаться. Для нормальной работы микрофона на обкладки конденсатора — на мембрану и на пластину — надо подать поляризующее напряжение.

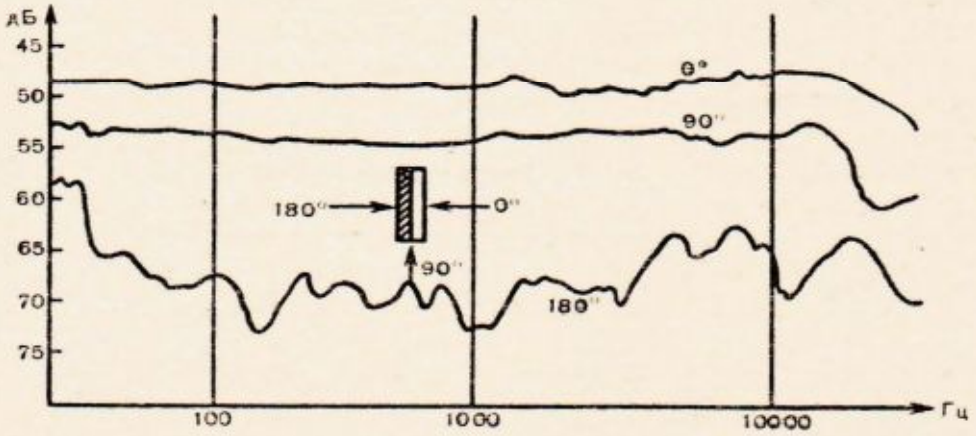
Конденсаторные микрофоны с двумя мембранами

Некоторые используемые сейчас конденсаторные микрофоны более сложны. В них устанавливают две мембраны — по обе стороны от жесткой пластины. Если на обе мембраны подается одинаковое поляризующее напряжение, микрофон остается по-прежнему ненаправленным. Если на вторую мембрану поляризующее напряжение не подается, то можно сделать так, чтобы характеристика направленности микрофона стала кардиоидой. Для этого отверстия в пластине делают такими, чтобы они работали как фазосдвигающий акустический фильтр: пока звуковая волна движется сквозь отверстия в пластине (электроде) к обратной стороне мембраны, ее фаза изменяется настолько, что оказывается возможным получить кардиоидную характеристику направленности.

Сделаем еще один шаг: если на вторую мембрану подать поляризующее напряжение обратного знака, то можно получить характеристику направленности в виде «восьмерки». Двойной капсюль действует в этом случае как приемник градиента давления. Наконец, если величину поляризующего напряжения сделать переменной, можно получить набор любых промежуточных характеристик направленности. В одной из существующих моделей микрофона можно поворотом переключателя выбрать любую из девяти характеристик направленности. Акустическая ось в таких микрофонах перпендикулярна оси симметрии корпуса, поэтому можно пользоваться характеристикой направленности в виде «восьмерки». Наихудшая частотная характеристика у таких микрофонов вдоль оси симметрии корпуса: выше 4 кГц она неравномерна.



Конденсаторный микрофон с переключением характеристик направленности. Слева: старая модель высокочастотного конденсаторного микрофона с переключением характеристик направленности и (вверху) сменившая ее, меньшая по размерам, модель. На электрической схеме показано, как можно варьировать характеристику направленности, изменяя поляризующее напряжение между одной из мембран и неподвижным электродом: *1* — передняя мембрана; *2* — неподвижный электрод (пластина с отверстиями); *3* — задняя мембрана; *4* — переключатель и потенциометр; *5* — источник поляризующего напряжения; *6* — большое сопротивление; *7* — предварительный усилитель; *8* — выходные контакты микрофона. Если поляризующее напряжение снимается с точки *0*, то на передней и задней мембране оно одинаково и выше напряжения на центральном (неподвижном) электроде: капсюль работает как ненаправленный микрофон (приемник давления). При положении переключателя *B* капсюль становится приемником градиента давления и характеристика направленности его становится «восьмеркой». При переключателе в точке *K* характеристика направленности — кардиоида.



Частотная характеристика высококачественного конденсаторного микрофона с кардиоидной характеристикой направленности. Осевая частотная характеристика почти горизонтальна примерно до 15 кГц, почти так же, как и частотная характеристика, измеренная под углом 90°. Неравномерность частотной характеристики, снятой под углом 180°, не играет никакой роли.

Сменные капсюли

Существует и другая возможность: сделать сменные капсюли, которые подходили бы к одному и тому же корпусу. Капсюли обеспечивают характеристики направленности в виде круга и в виде «восьмерки». Каждый из капсюлей можно делать с одной мембраной и только в кардиоидном нужно иметь акустический лабиринт.

В конденсаторные микрофоны помещают также переменный фильтр для среза низких частот и радиофильтр для устранения помех от радиосигналов, которые очень легко наводятся на входе первого каскада усиления.

Суперкардиоидный микрофон

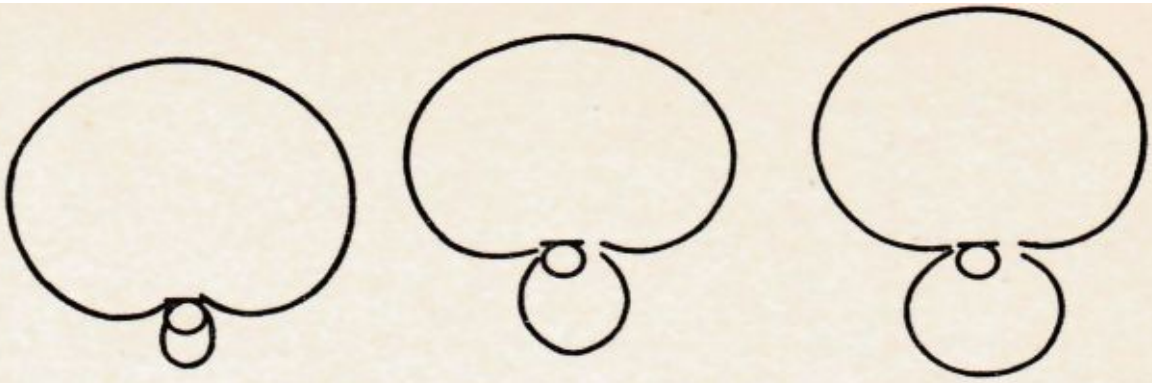
Микрофоны с круговой диаграммой направленности и двунаправленные микрофоны дают разные возможности. Эти микрофоны были скомбинированы для получения кардиоиды, а затем был разработан конденсаторный микрофон с переключаемыми девятью характеристиками направленности. Звукотехники вскоре открыли особые качества характеристик, расположенных между кардиоидой и «восьмеркой»; это семейство характеристик направленности стали называть суперкардиоидами, или гиперкардиоидами.

Полезный компромисс

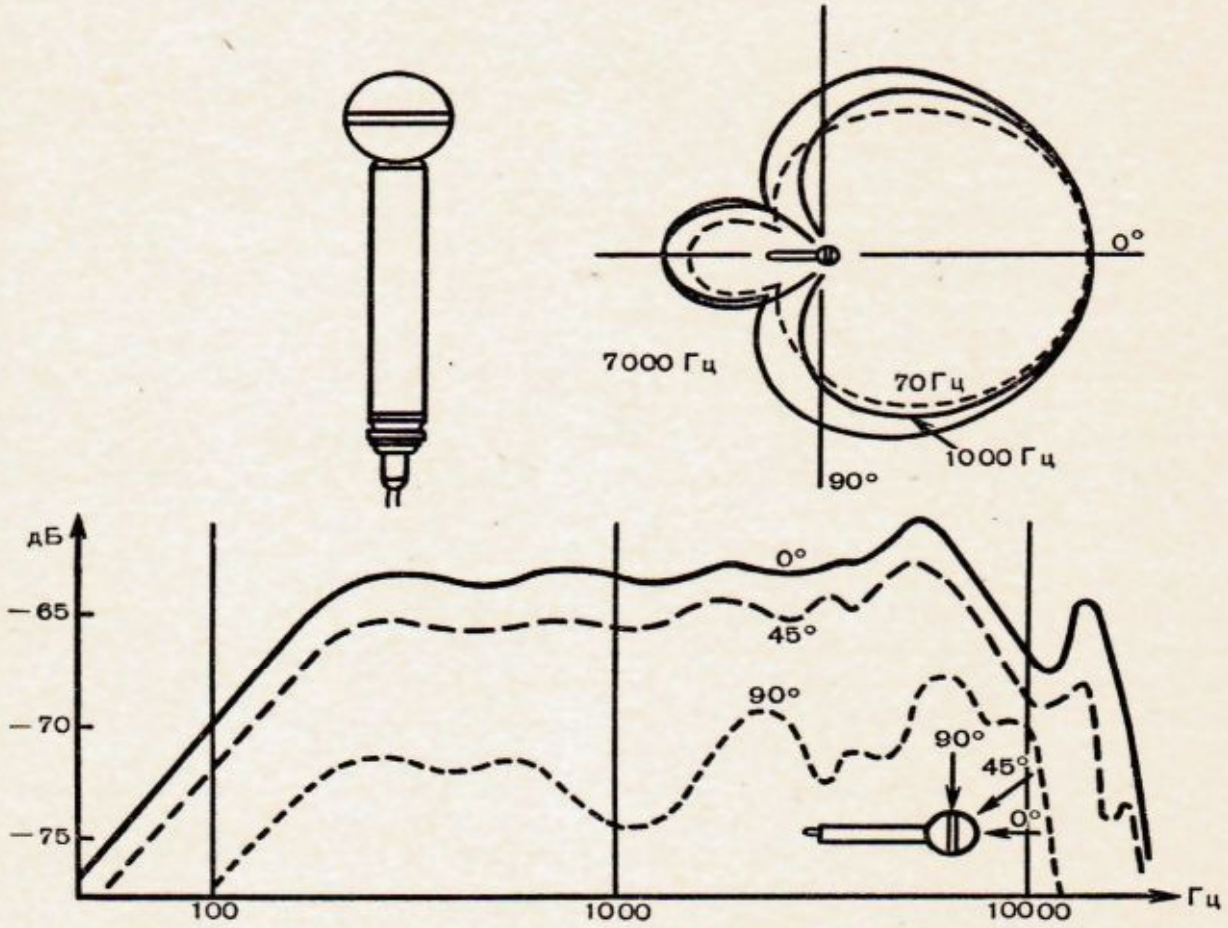
Мы уже знаем, что с помощью направленного микрофона можно выделять один или несколько источников звука, исключая остальные, что такие микрофоны меньше воспринимают отзвуки студии и поэтому их можно использовать дальше от источника, давая таким образом «общий план» протяженного источника звука, более равномерно охватывая его. Микрофоны с характеристикой направленности в форме «восьмерки» обладают отличными свойствами в том, что касается остроты характеристики направленности, однако размеры заднего лепестка можно считать недостатком, если только он не принимает одновременно какой-либо другой источник звука: задний лепесток может принимать ненужный отзвук помещения или же звук от посторонних источников. В этих условиях, когда требуется достаточно острая диаграмма направленности, характерная для двунаправленных микрофонов, но не нужен полный сигнал с задней стороны микрофона, характеристика направленности в виде суперкардиоиды и представляет собой желаемый компромисс. Это особенно важно для выделения инструментов при многомикрофонной записи музыки или при записи отдельных источников звука в сравнительно гулкой акустической обстановке. Именно для таких целей и были разработаны микрофоны с неизменяемой характеристикой направленности в виде суперкардиоиды.

Подъем нижних частот из недостатка становится достоинством

Следует отметить, что подъем нижних частот, возникающий при работе в ближней зоне, можно превратить в достоинство: например, в случае суперкардиоидной модели с двумя ленточными мем-



Суперкардиоида. Три промежуточные стадии между кардиоидой и «восьмеркой» — все более обостряющаяся характеристика направленности, задний лепесток которой последовательно увеличивается.



Суперкардиоидный микрофон с двумя ленточными мембранами. Длина корпуса — 15 см. Обратите внимание, что осевая частотная характеристика быстро спадает ниже 200 Гц. Это компенсирует подъем нижних частот при работе в ближней зоне микрофона. Однако такие микрофоны не применяют в тех случаях, когда важно правильно передать низкочастотную часть спектра; зато они нужны в многоканальной звукозаписи, где требуются микрофоны, плохо воспринимающие низкочастотное излучение посторонних источников звука.

бранами, у которой частотная характеристика начинает спадать ниже 200 Гц. При работе источника в ближней зоне можно расширить диапазон частот, принимаемых микрофоном, примерно на пол-октавы вниз, тогда как для дальних источников (и для отзвуков помещения) микрофон по-прежнему создает спад нижних частот, т. е. как раз в той части спектра, которая труднее всего поддается акустическому управлению. Спад на нижних частотах в данном микрофоне также успешно решает проблему ухудшения частотной характеристики, что часто сказывается на передаче низких частот в направленных микрофонах.

В неблагоприятных акустических условиях (в помещениях небольшого объема или слишком гулких) некоторые недорогие модели суперкардиоидных микрофонов обеспечивают довольно высокое качество звукопередачи, и потому их можно рекомендовать опытным любителям звукозаписи.

С другой стороны, суперкардиоидные микрофоны широко используют при записи высококачественных стереофонических фонограмм — баланс звуковой картины производят с помощью спаренных микрофонов, известных как «скрещенные суперкардиоиды». В такой стереопаре применяют два микрофона с переключаемой характеристикой направленности, акустические оси которых расположены под углом 120° одна относительно другой.

Остронаправленные микрофоны

Существует два способа получения особенно острых характеристик направленности. Один состоит в том, чтобы сфокусировать звуковую волну, исходящую из интересующей нас области пространства, в точке, где установлен микрофон. Фокусировка дает усиление нужного звука по сравнению с прочими, мешающими нам источниками, излучающими звук по другим направлениям. Второй способ состоит в том, чтобы звук, приходящий сбоку, автоматически самоуничтожался прежде, чем он успеет дойти до микрофона. Усиления полезного звукового сигнала здесь не происходит, однако уменьшается уровень звукового давления посторонних источников. Оба способа применимы лишь до тех длин волн, которые не больше максимальных размеров конструкции, обеспечивающей модификацию звукового поля.

Фокусировка звука

Обычно звук фокусируют с помощью параболического рефлектора, который делают из стеклопластика или металла. Рефлектор диаметром 1 м может примерно на 20 дБ усилить сигналы удаленных источников, расположенных на его оси. Для очень слабых источников это позволяет значительно уменьшить отношение сигнал/шум (причем прежде всего уменьшить влияние собственных шумов микрофона и усилителя). Угол приема высоких частот очень мал: всего несколько градусов. Все же достоинства микрофона такой конструкции весьма ограничены: удобный в работе рефлектор диа-