

Статья "Микрофоны"

Часть 1. Термины и определения. История.

Предполагается рассмотреть историю микрофонов, основные параметры и методы измерений, особенности конструкции, а также микрофонные стереосистемы и микрофоны для пространственных систем звукозаписи (Surround Sound).

Микрофон является первичным звеном в системах звукозаписи и звукоусиления (в студийных условиях, концертных залах, стадионах, производственных помещениях и др.). Выбор его параметров в значительной степени определяет качество звучания музыки и речи, которые с помощью систем радиовещания, телевидения, мультимедиа, звукозаписи и др. передаются многомиллионной аудитории слушателей. Именно поэтому к микрофонам выдвигаются особые требования по техническим, конструктивно-эстетическим характеристикам и надежности.

В соответствии с действующими международными рекомендациями IEC 268-4 и отечественным стандартом ГОСТ 16123-88 определение микрофона вводится следующим образом:

"Микрофон — устройство, с помощью которого акустические колебания воздушной среды преобразуются в электрические колебания".

Микрофон состоит из чувствительного элемента

(капсюля) и согласующего устройства. Блок питания, предварительный усилитель и соединительные кабели входят в комплект микрофона, если они являются его неотъемлемой частью и указаны в технической документации на микрофон конкретного типа.

Современный микрофон имеет довольно сложное устройство. Пример одной из конструкций микрофона фирмы AKG показан на рис. 1: он включает в себя капсюль конденсаторного типа, предусилитель, защитный экран, систему амортизаторов для крепления капсюля, разъемы, корпус с защитной решеткой и т. д. В конструкции цифрового микрофона, например, в модели Solution-D — одной из последних разработок фирмы Neumann, вместо предварительного усилителя в корпусе установлен аналого-цифровой преобразователь и цифровой процессор для предварительной обработки звука. Многообразие конструкций микрофонов, выпускаемых в настоящее время, чрезвычайно велико и продолжает постоянно увеличиваться.

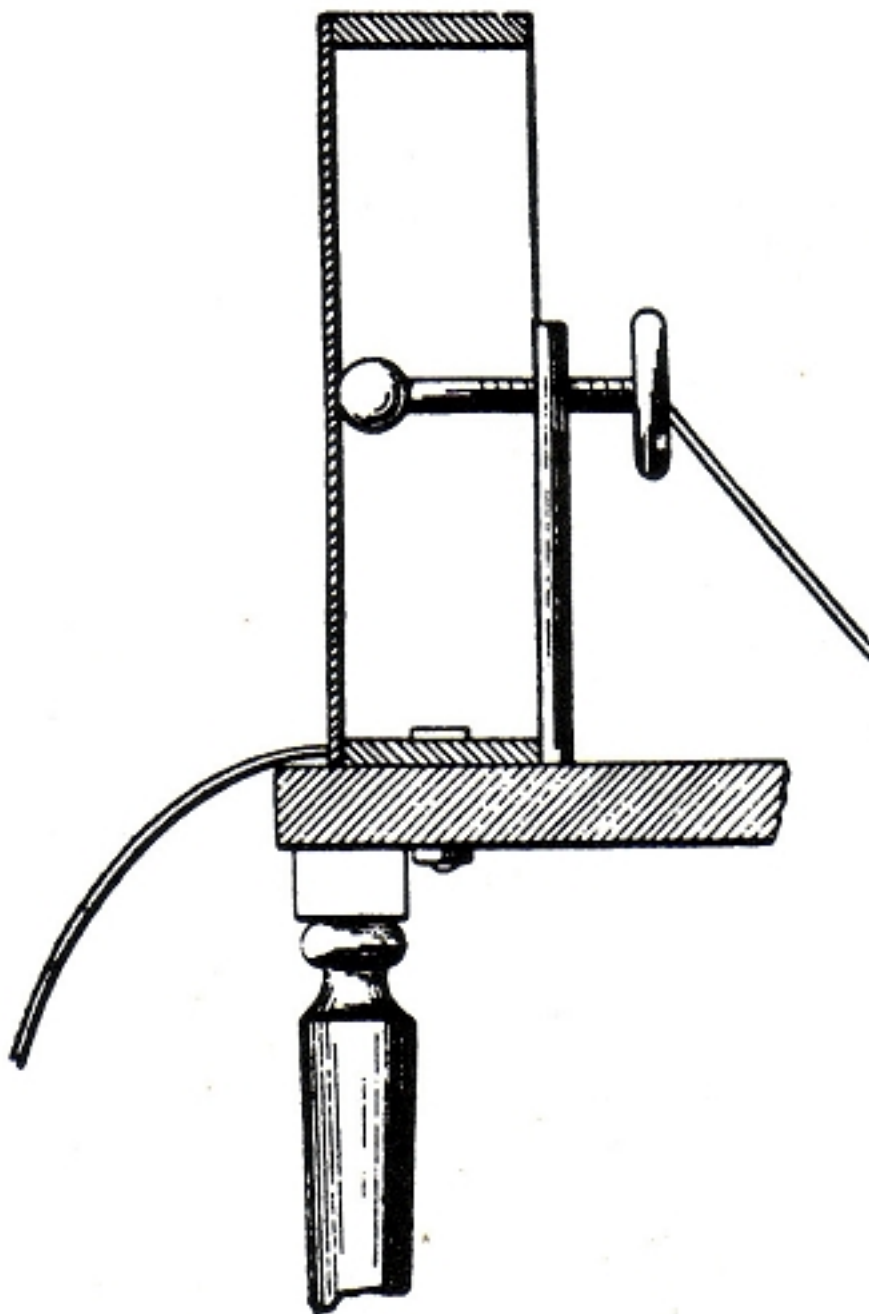


История

Из всех видов электроакустических преобразователей, используемых в современной аудиотехнике, микрофон имеет самую длинную историю. Само название "microphone" было предложено в 1827 году английским ученым Чарльзом Уитстоуном (Charles Wheatstone) и происходит от греческих слов "micro" (малый) и "phone" (звук).

Создателем первой конструкции микрофона можно считать немецкого физика Иоганна Рейса (Johann Reis), в 1861 году описавшего звуковой приемник, в котором металлический стержень, находящийся в контакте с мембраной, был включен в электрическую цепь. При движении мембраны контакт периодически размыкался, создавая в цепи переменный ток. Идея эта была продолжена американскими изобретателями Александром Беллом (Alexander Bell) и Эмилем Берлинером (Emile Berliner), последний в 1877 году запатентовал конструкцию микрофона, построенную по такому

же принципу (рис. 2). Однако качество передачи речи было довольно низким.



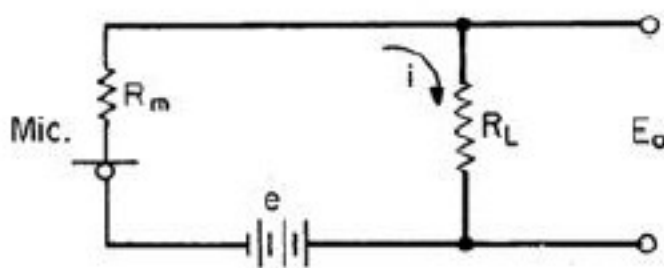
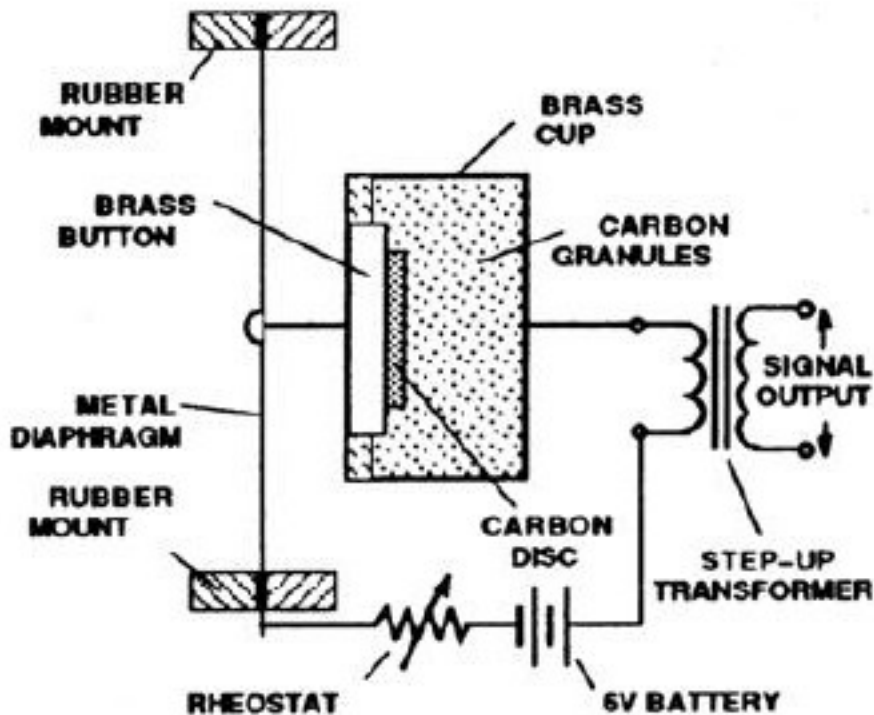
Значительным шагом вперед была конструкция микрофона, запатентованная в 1876 году знаменитым изобретателем А. Беллом, которая представляла собой "жидкостный передатчик" (рис. 3). Принцип его устройства был довольно прост: в металлический сосуд был налит водный раствор с небольшим количеством серной кислоты, в котором

"плавала" пергаментная диафрагма с присоединенной иглой (позднее — медным стержнем). Когда человек говорил в рупор, диафрагма начинала двигаться вверх-вниз, игла больше или меньше погружалась в раствор, и соответственно менялось сопротивление электрической цепи, к которой был подключен сосуд (изменение сопротивления было обратно пропорционально размеру мениска вокруг погруженной в раствор иглы). Такой "микрофон" был продемонстрирован на выставке в Филадельфии в 1876 году и подтолкнул целую группу изобретателей (Э. Берлинера, Д. Хьюга и Т. Эдисона) к созданию угольного микрофона.



Угольный микрофон, запатентованный в 1886 году Томасом Эдисоном, представлял собой чашку (рис. 4), заполненную угольными гранулами, сверху находилась металлическая диафрагма. Электрическое напряжение, приложенное между электродами, обуславливало слабый постоянный ток через гранулы. Когда диафрагма начинала колебаться под действием падающей звуковой волны, гранулы сжимались, увеличивалась площадь контактов между ними, и электрическое

сопротивление между электродами падало. В результате изменения сопротивления под действием звукового сигнала на выходе трансформатора появлялся переменный ток, который усиливался и подавался к другим элементам оборудования.



Такие микрофоны имели узкий диапазон воспроизводимых частот, значительные нелинейные искажения, со временем в них появлялось большое количество тресков и шумов и т. д. Однако они были очень просты в изготовлении, создавали достаточно высокий уровень выходного сигнала (что позволяло использовать их без

усилителя) и поэтому получили очень широкое распространение, особенно в телефонии. Один из образцов угольного микрофона показан на рис. 5. Массовое производство таких микрофонов продолжалось примерно до 1920 года, однако для некоторых специальных целей (в основном, для телефонов) они используются до настоящего времени.



Поиски новых принципов преобразования для микрофонов постоянно продолжались. В 1917 году

Эдвард Венте (Edward Wente) в лаборатории Bell Labs (США) создал **конденсаторный микрофон**, который использовался вначале только для измерительных целей. С 1926 года BBC начала применять такого типа микрофоны в радиовещании, чему помогло появление ламповых усилителей (способных работать на емкостной нагрузке), изобретенных в 1907 году Ли де Форестом (Lee De Forest). В 1932 году Neumann создал модель конденсаторного микрофона CMV3, которая затем модифицировалась в модель M-7 и др. В 1947 году компания AKG представила свою первую модель лампового конденсаторного микрофона C1 (который затем модифицировался в модель СК-12), а с 1962 года начала их массовое производство. Сейчас конденсаторные микрофоны составляют основную долю в промышленном выпуске и широко используются в звукозаписи, радиовещании, на телевидении и др. Принцип их устройства довольно прост — он представляет собой плоский конденсатор, состоящий из двух обкладок. Из них внешняя сторона, обращенная к источнику звука, выполнена в виде тонкой круглой металлизированной изнутри диафрагмы, скрепленной по окружности с кольцом из диэлектрика. Второй обкладкой конденсатора служит массивное металлическое основание. К обкладкам подводится постоянное поляризующее напряжение. Когда под действием звуковой волны диафрагма начинает колебаться, меняется емкость конденсатора, соответственно меняется заряд и генерируется переменный ток.

Конденсаторные микрофоны имеют ряд преимуществ, которые позволяют широко использовать их в студийной практике. К числу основных из них можно отнести следующие: низкий уровень переходных искажений (из-за малой массы диафрагмы), широкий частотный диапазон, малая чувствительность к магнитным помехам. Однако они обладают меньшей механической и климатической стойкостью, чем динамические микрофоны, требуют дополнительного напряжения поляризации и имеют более высокую стоимость.

Электродинамические микрофоны появились сравнительно поздно из-за отсутствия достаточно мощных постоянных магнитов, нужную величину напряженности магнитного поля приходилось создавать с помощью больших электромагнитов. Первый **ленточный электродинамический микрофон** был сделан Гарри Олсоном (Harry Olson) примерно в 1930 году, хотя принцип его был описан раньше, в 1924 году (Эрвин Герлах и Вальтер Шотке на фирме Siemens). Промышленный образец появился в 1942 году в компании RCA (рис. 6). В нем использовалась слегка гофрированная металлическая ленточка, которая двигалась под действием звуковой волны в магнитном поле, между полюсами постоянных магнитов, при этом в ней индуцировался переменный электрический ток. Первая модель такого микрофона, RCA PB-31, а затем и PB44A произвели своего рода революцию в звукозаписи, поскольку позволяли получить значительно лучшие характеристики и качество звучания.



Микрофоны такого типа выпускаются до настоящего времени в относительно больших количествах. Они обеспечивают довольно широкий диапазон частот, чистое и "теплое" звучание, поэтому широко используются в звукозаписи. **Динамический катушечный микрофон** был реализован Аланом Блумлайном в 30-х годах на фирме EMI с применением электромагнитов (хотя идея такого микрофона была запатентована В. Сименсом еще в 1878 году). Он использовал

диафрагму из целлюлозы, покрытой алюминиевой фольгой, и прикрепленную к ней катушку из анодированного алюминия. С 1936 года модель такого микрофона НВ1А (рис. 7) начала использоваться в звукозаписи на новой телевизионной студии ВВС и звукозаписывающей студии фирмы EMI.



Позднее, после войны, с появлением мощных постоянных магнитов начался промышленный выпуск динамических катушечных микрофонов на фирмах AKG, Neumann и др., и в настоящее время это один их самых массовых типов микрофонов. Принцип действия электродинамических катушечных микрофонов основан на том, что при воздействии звуковой волны на легкую диафрагму она начинает колебаться и приводит в движение связанный с ней проводник (звуковую катушку),

помещенный в постоянное магнитное поле. При движении проводника с током в магнитном поле в нем индуцируется электрический сигнал, который затем усиливается и передается для дальнейшей обработки.

Электродинамические микрофоны обладают рядом преимуществ: устойчивостью к перегрузкам, стабильностью работы в различных климатических условиях, прочностью конструкции и др.

Электретные пленочные микрофоны были разработаны Герхардом Сесслером (Gerhard Sessler) и Джеймсом Вестом (James West) в 1962 году на фирме Bell Labs. В них для подвижной диафрагмы использовалась тонкая металлизированная поляризованная пленка, способная держать заряд, что позволило отказаться от устройств, обеспечивающих высокое постоянное напряжение (фантомное питание) на пластинах конденсатора. Это значительно облегчило технологию их изготовления и снизило стоимость. Поэтому электретные преобразователи в настоящее время нашли широкое применение в петличных микрофонах, сотовых телефонах, компьютерах и др.

Наряду с совершенствованием принципов преобразования постоянно проводились работы по созданию микрофонов с регулируемой характеристикой направленности: первые конденсаторные и угольные микрофоны были ненаправленными, ленточный микрофон имел направленность в виде "восьмерки". Впервые на фирме Western Electric была создана конструкция

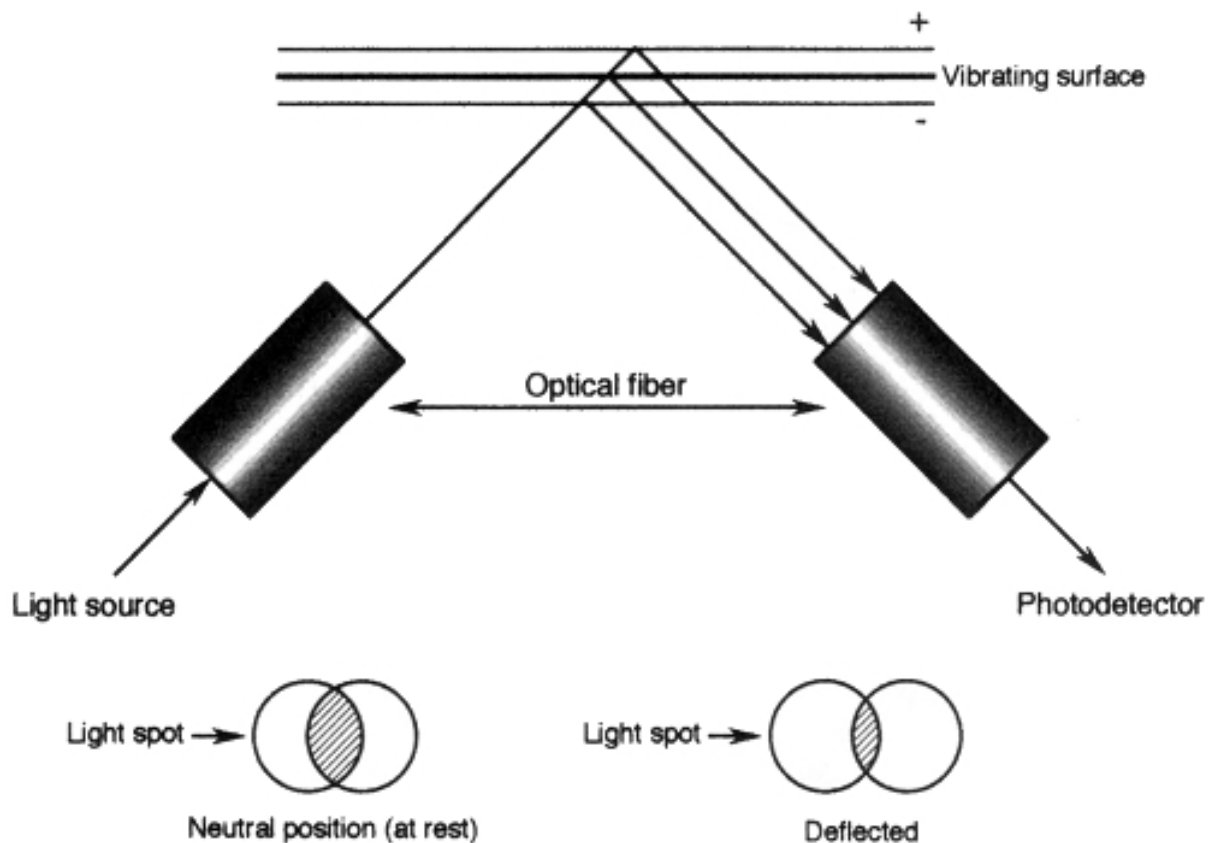
микрофона с характеристикой направленности в виде кардиоиды, объединяющая в одном капсюле ленточный микрофон ("восьмерка") и динамический (ненаправленный). На фирмах Neumann, AKG и др. были разработаны модели конденсаторных микрофонов с двумя диафрагмами, позволяющими создавать различные варианты характеристик направленности (круг, кардиоида, восьмерка, суперкардиоида и др.). Компания AKG в 1953 году выпустила первую модель микрофона C-12 со сдвоенными мембранами, ламповым усилителем и специальным блоком, позволяющим переключать характеристики направленности. Он выпускался до 1963 года, затем на смену ему пришла модель ELAM 251, которая пользовалась популярностью почти до настоящего времени.

Таким образом, к концу XX века в практике звукозаписи использовались, в основном, микрофоны следующих четырех типов: конденсаторные, электретные, динамические катушечные и ленточные. Однако поиски новых принципов преобразования акустического сигнала в электрический продолжаются.

Одним из наиболее перспективных направлений, которым на протяжении последних нескольких лет занимаются фирма Sennheiser совместно с израильской фирмой Phone-Or, является создание оптических микрофонов.

Оптические микрофоны используют принцип модуляции интенсивности лазерного светового луча: луч света от лазерного источника направляется по оптоволокну и освещает мембрану

микрофона. При колебаниях мембраны световой поток модулируется (по интенсивности) и направляется по второму оптоволокну на фотодиод, который преобразует сигнал в переменный ток (рис. 8). При таком принципе не используется преобразование колебаний мембраны непосредственно в электрический сигнал, как в обычных микрофонах. Мембрана может быть вообще размещена на расстоянии несколько десятков (сотен) метров от источника света и фотодиода из-за низких потерь при передаче сигнала по оптоволокну (потери составляют меньше 3 дБ на 1 км оптоволокну). Микрофон не производит никаких электромагнитных излучений (ни за счет капсуля, где в других типах микрофонов обычно размещен предусилитель, ни за счет кабелей), и сам нечувствителен к электромагнитным, электростатическим и радиоактивным полям. Из-за малых размеров он может быть размещен в любом труднодоступном месте (при этом его трудно обнаружить известными методами) и может работать в сильных магнитных, электрических или радиополях.



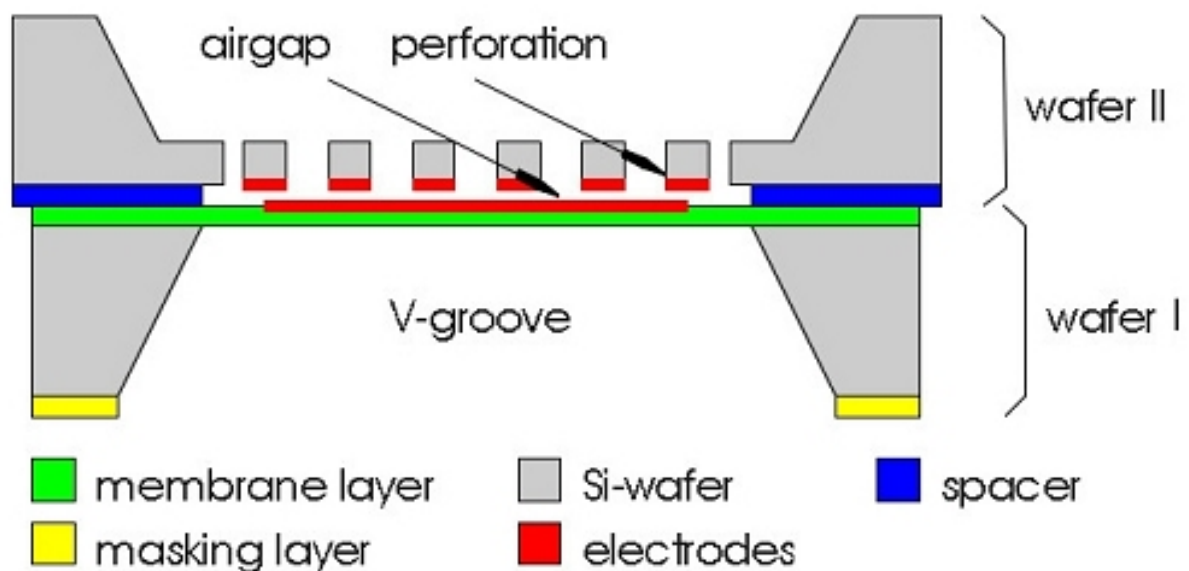
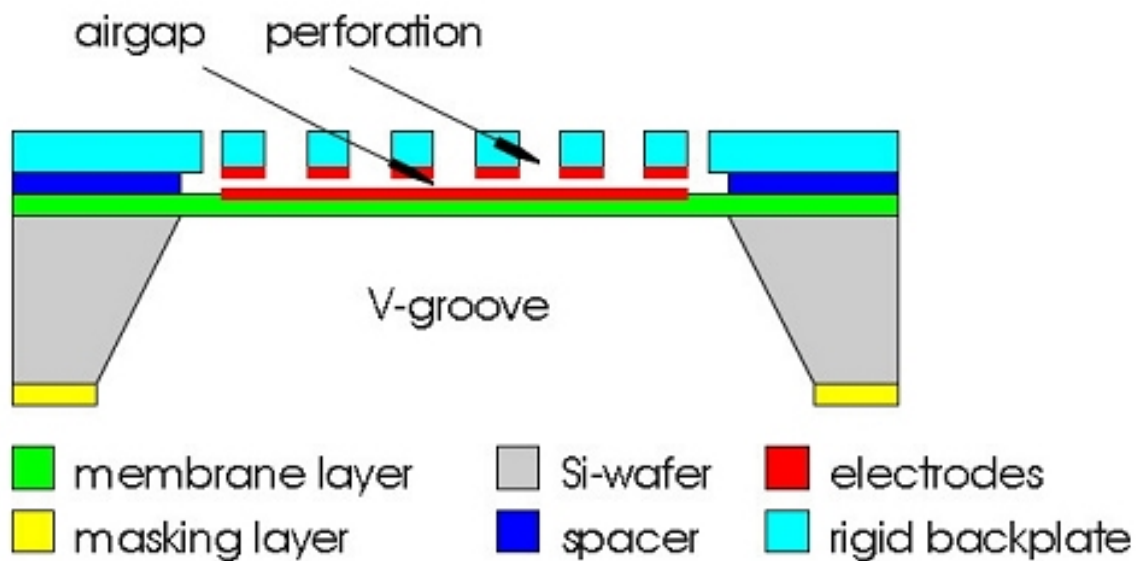
Кроме вышеперечисленных, относительно давно были созданы **пьезоэлектрические микрофоны**, в которых в качестве преобразователя используются или пьезоэлектрические кристаллы (например, типа PZT), или керамика (например, пластины из титаната бария). После поляризации они приобретают свойства преобразовывать механические деформации в электрический ток (по этому же принципу работают пьезосниматели в электромузыкальных инструментах). Такие микрофоны обладают хорошей стабильностью, воспроизводят диапазон 80-6500 Гц (есть варианты до 16 кГц), имеют высокий выходной импеданс порядка 100 кОм, что требует нагрузочного импеданса 1-5 МОм (это хорошо согласуется, например, с ламповыми усилителями), чувствительность -30 дБ. Примером такой

конструкции может служить модель Electro-Voice 951 (рис. 9), выпущенная в 1966 году.



Применение новых технологий позволило создать сверхминиатюрные **MEMS-микрофоны** (MEMS — микроэлектромеханические системы). Они называются также "микрофонные чипы" или "кремниевые микрофоны". В них используется конденсаторный или пьезоэлектрический тип преобразования (ведутся работы по применению

оптических и других способов преобразования).
Технология их изготовления была представлена в 1994 году на конгрессе AES Герхардом Сесслером (Технический университет г. Дармштадт, Германия).
На кремниевую подложку напыляется материал мембраны. На заднюю поверхность подложки наносится защитный слой. Затем со стороны задней поверхности гравировются (вытравливаются) V-канавки. Примеры кремниевого микрофона на двух склеенных подложках и на одной подложке показаны на рис. 10. На одной кремниевой подложке находится мембрана с металлизированным слоем и V-канавками, на другой выгравированы сплошные отверстия и она служит неподвижным металлизированным электродом. Обе подложки склеены. Между ними находятся прокладки для формирования воздушного зазора. Под действием звуковой волны мембрана колеблется, изменяется емкость конденсатора и создается переменный электрический сигнал. Для такого микрофона необходим источник постоянного напряжения. Сейчас изучаются способы создания микрофонных чипов с электретным и пьезоэлектретным принципом преобразования.



Преимуществами микрофонных чипов являются малые размеры (площадь мембраны ~ 1 кв. мм), возможность интегрировать в этот же микрофонный чип усилители, АЦП, цифровые процессоры и другие устройства, создавать на одном чипе решетку таких микрофонов и с помощью цифровых процессоров формировать их характеристики направленности. Основные производители MEMS-микрофонов — фирмы Analog Devices, Akustica (AKU200x), Infineon (SMM310), Knowles Electronics, Memstech (MSMx),

NXP Semiconductors, Sonion MEMS, AAC Acoustic Technologies и Omron.

Наряду с развитием и совершенствованием принципов преобразования в микрофонах акустической энергии в электрическую, начиная с 30-х годов XX века шли работы по совершенствованию их конструкций, как в отдельных типах микрофонов, так и в создании микрофонных систем. В 30-е годы, после появления патента Блюмлайна, посвященного стереотехнике (в звукозаписи, радиовещании и др.), начали развиваться стереосистемы микрофонов: XY, MS и др. В 60-80-е годы появилось огромное многообразие конструкций: микрофоны пограничного слоя (PZM), параболические микрофоны, остронаправленные микрофоны (shotgun), петличные (lavalier), "искусственная голова" и многие другие.

Перевод аудиотехники на цифровые методы обработки привел к появлению нового поколения пространственных систем звукозаписи и звукопередачи (Surround Sound), что обусловило появление цифровых микрофонов (типа Neumann Solution-D) и специальных микрофонных систем (например, Soundfield).

Подробнее об этом будет рассказано в следующих статьях.

Промышленное производство микрофонов в настоящее время достигает десятков миллионов штук в год. Разработкой и производством микрофонов занимаются такие фирмы как

Neumann, Sennheiser, Beyerdynamic, AKG, Shure, Sony, DPA, Октава и многие другие.

Часть 2. Параметры. Методы измерения.

Как уже было отмечено в предыдущей статье, микрофоны являются первичным и важнейшим звеном звукозаписывающих трактов, поэтому к ним предъявляются очень жесткие требования:

- по техническим параметрам (динамический диапазон до 130-140 дБ, частотный диапазон не менее 20-20000 Гц, нелинейные искажения меньше 1% и др.),
- по эстетическим критериям (так как микрофон постоянно виден зрителям на сцене, на экране и т. д. — примером современного дизайна может служить модель Perception 420 фирмы AKG, рис. 1),
- по надежности (поскольку микрофон подвергается различным климатическим и механическим воздействиям: ветер, влажность, температура, тряска, удары и др.),
- по качеству звучания (для сохранения естественного тембра при передаче музыки различных жанров, пения, речи и др.).



Требования к параметрам микрофонов и методам их измерений изложены в международных и отечественных стандартах IEC 60268 ч. 1, 4, IEC 60268 ч. 15, IEC 60581 ч. 5, IEC 61094 ч. 1-4, IEC 61842, ГОСТ 16123-88, ГОСТ 6495-88, DIN 45500 ч. 5, ANSI S1.12-97, AES-X85 и др.

Основные параметры микрофонов, обычно представляемые в современных каталогах и

технической документации, приведены на примере модели TLM193 фирмы Neumann.

Acoustical operating principle (Принцип преобразования): Pressure gradient transducer (Приемник градиента давления)

Directional pattern (Характеристика направленности): Cardioid (Кардиоида)

Frequency range (Номинальный диапазон частот): 20 Hz ... 20 kHz (20 Гц ... 20 кГц)

Sensitivity at 1 kHz into 1 kohms (Чувствительность на 1 кГц при 1 кОм): 18 mV/Pa (18 мВ/Па)

Rated impedance (Номинальный импеданс): 50 ohms (50 Ом)

Rated load impedance (Номинальный нагрузочный импеданс): 1 kohms (1 кОм)

Equivalent noise level, CCIR (Эквивалентный уровень шумов по CCIR): 21 dB (21 дБ)

Equivalent noise level, A-weighted (Эквивалентный уровень шумов по IEC): 10 dB-A (10 дБ-А)

Signal-to-noise ratio, CCIR rel. 94 dB SPL (Отношение сигнал/шум по CCIR): 73 dB (73 дБ)

Signal-to-noise ratio, A-weighted rel. 94 dB SPL (Отношение сигнал/шум по IEC): 84 dB (84 дБ)

Maximum SPL for THD 0.5% (Максимальный уровень звукового давления при КНИ 0,5%): 140 dB (140 дБ)

Maximum output voltage (Максимальное выходное напряжение): 13 dBu (13 дБ)

Dynamic range of the microphone amplifier A-weighted (Динамический диапазон микрофонного усилителя): 130 dB (130 дБ)

Supply voltage P48, IEC 61938 (Фантомное напряжение питания): 48 V +/- 4 V (48 В +/- 4 В)

Current consumption P48, IEC 61938 (Ток насыщения): 3 mA (3 мА)

Matching connectors (Разъемы): XLR3F

Weight (Масса): 480 g (480 г)

Diameter (Диаметр): 49 mm (49 мм)

Length (Длина): 175 mm (175 мм)

Далее будет дано подробное объяснение значений этих параметров.

Номинальный диапазон частот (*frequency range*)

— частотный диапазон, в котором определяются параметры микрофона (задается производителем).

Для современных конденсаторных микрофонов он обычно задается равным 20-20000 Гц. Для

измерительных микрофонов (например, фирмы В&К) диапазон составляет 20-50000 Гц. Развитие

цифровой звукотехники привело к появлению

микрофонов с диапазоном частот до 50 кГц,

предназначенных для студийной звукозаписи

(например, модель МКН800 фирмы Sennheiser и др.).

Чувствительность (*sensitivity*) определяет

способность микрофона преобразовывать

акустическое давление в электрическое

напряжение. Как всякая передаточная функция она

определяется отношением сигнала на выходе

микрофона, то есть напряжения U (В), к сигналу на

входе микрофона, то есть звуковому давлению

p (Па). Учитывая, что напряжение на выходе

капсюля микрофона мало, чувствительность

обычно задается в единицах мВ/Па (милливольт на паскаль): $S = U/p$ (мВ/Па).

В зависимости от способа измерения различаются следующие виды чувствительности:

чувствительность по свободному полю, чувствительность по давлению, чувствительность по диффузному полю, чувствительность на холостом ходу, чувствительность на номинальной нагрузке. Они все имеют несколько разные значения, поэтому при выборе микрофона следует обращать внимание, о какой чувствительности идет речь.

Чувствительность по свободному полю определяется по стандарту IEC 60268-4 (ГОСТ 16123-88) как "отношение напряжения на выходе микрофона к звуковому давлению в свободном звуковом поле в рабочей точке, занимаемой микрофоном, на данной частоте. Если угол приема не указан, то имеется в виду, что угол приема (между осью микрофона и направлением падения звуковой волны) 0 град".

Измерение чувствительности по свободному полю производится в заглушенной камере (специальном помещении, в котором обеспечено отсутствие отражений за счет размещения на стенках большого количества звукопоглощающего материала) следующим образом: на измерительный громкоговоритель подается синусоидальный сигнал, напряжение которого выбирается так, чтобы обеспечить постоянный уровень звукового давления (обычно 94 дБ) в заданной точке поля (обычно на расстоянии 1 м). Уровень давления

измеряется специальным измерительным микрофоном малого размера (IEC 61094-4), чтобы не вносить искажений в структуру звукового поля. Затем на это место устанавливается измеряемый микрофон и определяется его выходное напряжение. Чувствительность определяется как $S_m = U / p_f K$, где K — коэффициент усиления микрофонного усилителя, p_f — звуковое давление в точке размещения испытуемого микрофона (измеренное измерительным микрофоном), U — напряжение холостого хода на выходе микрофона. Это называется *метод замещения*. При измерениях может быть использован *метод сравнения*, когда измерительный и испытуемый микрофон сразу устанавливаются в одну точку поля. При этом если развиваемое микрофоном напряжение относится к давлению, действующему на диафрагму этого же микрофона, то эта величина называется *чувствительностью по давлению* (она отличается от чувствительности по свободному полю, так как микрофон сам вносит определенные искажения в структуру звукового поля и значения звукового давления за счет этого могут отличаться). Измеренная таким образом чувствительность называется *чувствительностью на холостом ходу*. Если измерения напряжения проводятся на номинальном выходном сопротивлении микрофона (*номинальном импедансе*), которое должно указываться в технической документации, то получается значение *чувствительности на номинальной нагрузке*. Измерения могут быть

выполнены на синусоидальном и на шумовом сигнале.

Если измерения звукового давления выполняются в условиях диффузного поля (то есть в специальных реверберационных камерах, обеспечивающих равномерное и изотропное звуковое поле за счет большого количества отражений) в рабочей точке, занимаемой микрофоном (также с предварительным использованием измерительного микрофона), на шумовом сигнале, то полученная величина отношения выходного напряжения к значению звукового давления называется *чувствительностью по диффузному полю*.

Существуют различные приближенные методы для измерения чувствительности микрофонов, например, с помощью пистонфона для очень низких частот, с помощью специального актюатора (создающего сильное электростатическое поле для возбуждения диафрагмы) для ненаправленных конденсаторных микрофонов, или с помощью метода взаимности.

В международных стандартах на микрофоны, например, IEC 60268-4, чувствительность (sensitivity) определяется как "среднеквадратичное (RMS) значение напряжения на выходе микрофона на нагрузочном сопротивлении 1 кОм на частоте 1 кГц, когда на него действует давление 1 Па (94 дБ) в условиях свободного поля (угол приема 0 град)".

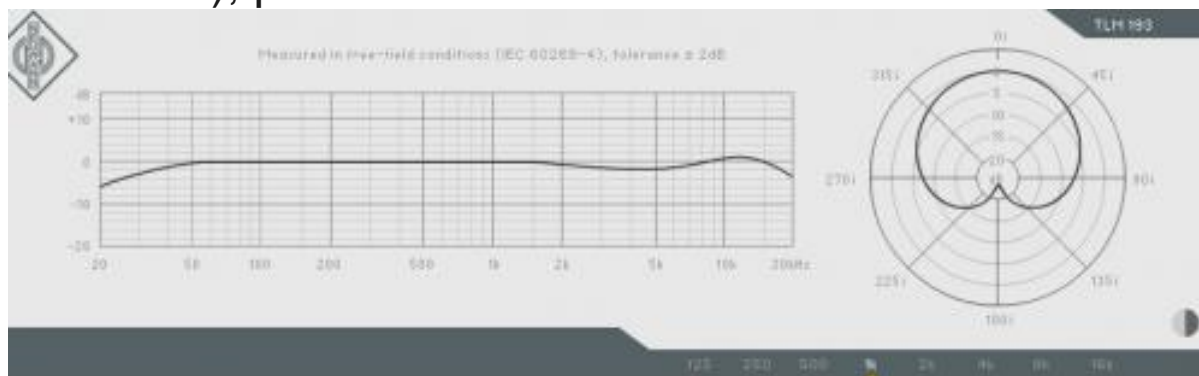
В современных каталогах часто указывается **уровень чувствительности**, который определяется как двадцать логарифмов отношения чувствительности микрофона к значению 1 В/Па:

$L_{dB} = 20 \lg S_m / S_0$, где $S_0 = 1$ В/Па (или 1000 мВ/Па). Величина уровня чувствительности L_{dB} при этом получается отрицательная.

Обычно чувствительность современных конденсаторных микрофонов находится в пределах от 8 мВ/Па до 40 мВ/Па. Например, микрофон DPA 3530 имеет чувствительность 10 мВ/Па и уровень чувствительности -40 дБВ, микрофон AKG C3000B — 25 мВ/Па (-32 дБВ). Ведущие фирмы указывают в каталогах допустимые пределы разброса чувствительности при производстве (1-2 дБ). Связь между значением чувствительности и уровнем чувствительности приведена в таблице.

S (мВ/Па)	95	55	30	18	10	5,5	3	1,8	1
Ls (дБ)	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-55	-60

Частотная характеристика чувствительности микрофона (*Frequency Response*) — зависимость чувствительности или уровня чувствительности от частоты в номинальном диапазоне частот. Измерения проводятся по указанной выше методике определения чувствительности на различных частотах внутри номинального диапазона (на синусоидальных или шумовых сигналах), рис. 2.

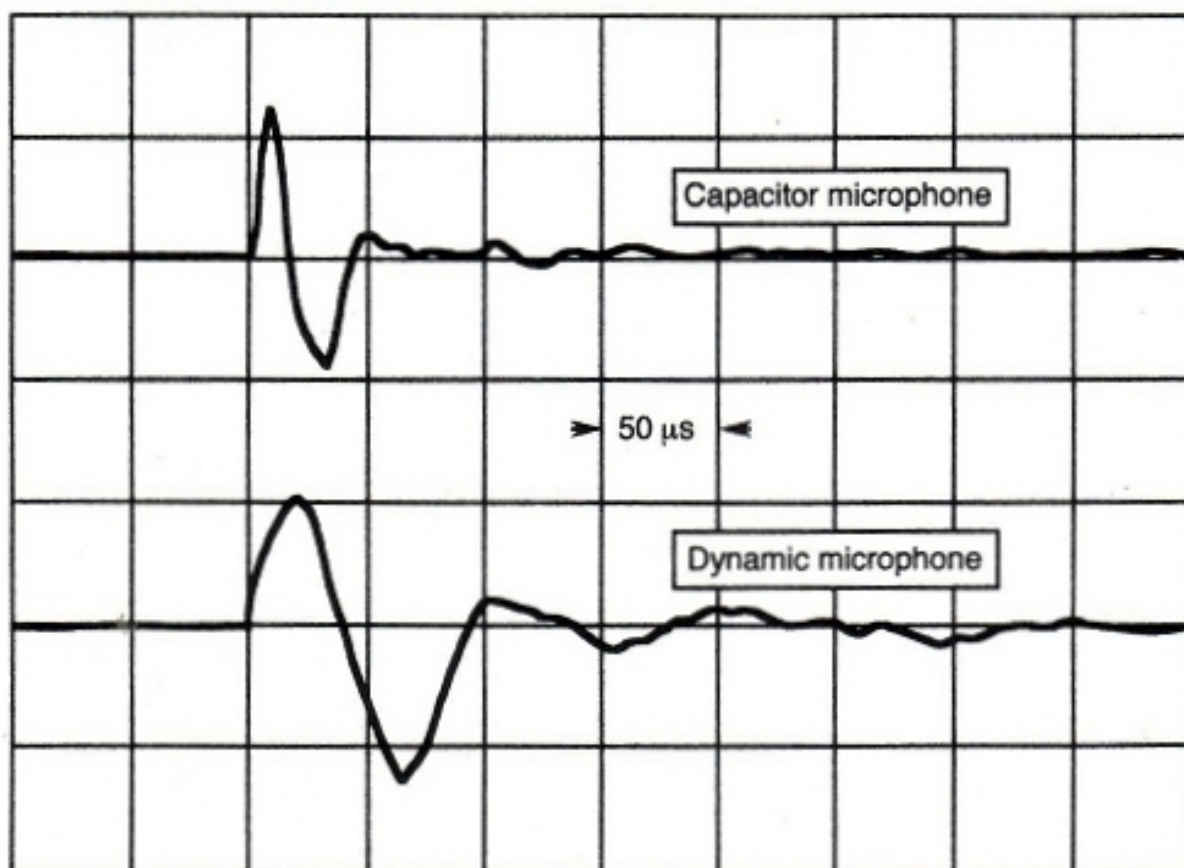


В настоящее время активно развиваются цифровые методы измерений микрофонов в незаглушенных помещениях (рис. 3).



На первом этапе характеристика измерительного громкоговорителя в данной точке помещения линеаризуется с помощью измерительного микрофона, затем короткий импульс подается на измерительный громкоговоритель, а сигнал, полученный с испытуемого микрофона, вводится в компьютерную измерительную станцию и с помощью преобразования Фурье вычисляются частотная характеристика чувствительности, фазовая характеристика и трехмерный спектр, что позволяет определить изменение формы частотной характеристики во времени. На рис. 4 представлены импульсные характеристики конденсаторного и динамического микрофонов, из которых видно насколько точнее конденсаторный микрофон воспроизводит временную форму сигнала.

Response to electric spark discharge

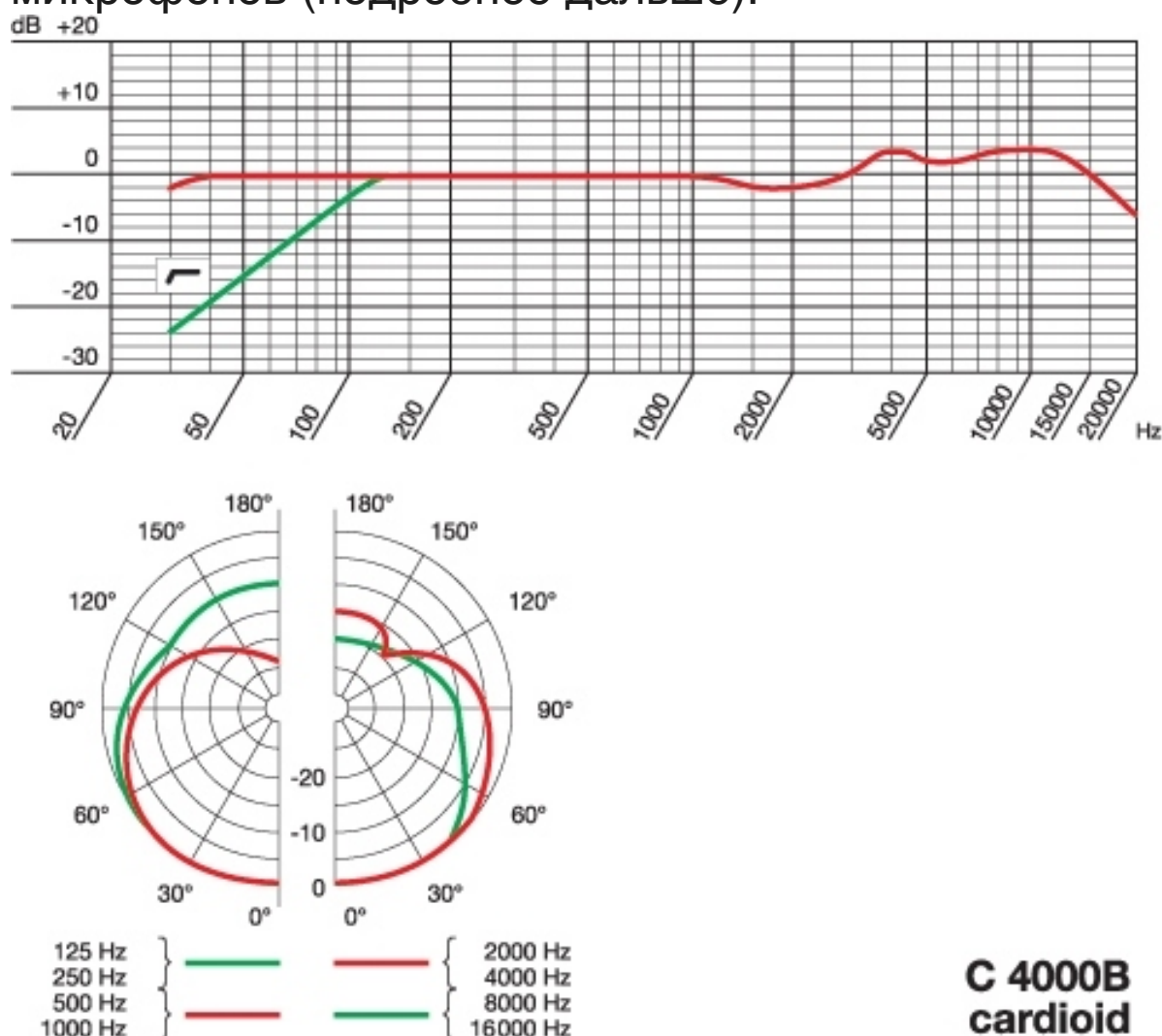


Из записанной частотной характеристики определяется неравномерность.

Неравномерность частотной характеристики — разность максимального и минимального значения уровня чувствительности в номинальном диапазоне частот. Например, для микрофона DPA 4006 неравномерность в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц равна +/-2 дБ.

Обычно частотные характеристики высококачественных микрофонов обладает минимальной неравномерностью, это является одним из главных индикаторов качества микрофонов, поскольку определяет степень неискаженной передачи тембра источника, однако в некоторых случаях, например, для записи речи и вокала, делается подъем в области 2-8 кГц с целью

увеличения разборчивости (presence peak), рис. 5. Кроме того, в большинстве современных микрофонов предусмотрена возможность коррекции частотной характеристики на низких частотах для записи в условиях шумов или для компенсации ее подъема за счет "эффекта близости" (proximity effect) у направленных микрофонов (подробнее дальше).



Направленные свойства микрофонов, то есть зависимость уровня чувствительности микрофона от угла падения звуковой волны, определяются с помощью следующих параметров.

Характеристика направленности (Directional pattern) — зависимость чувствительности

микрофона на заданной частоте в свободном поле от угла падения звуковой волны. Частотные характеристики направленности определяются как семейство частотных характеристик чувствительности, измеренных при разных углах падения звуковой волны в свободном поле. Эти же характеристики могут быть записаны в полярных координатах, показывающих зависимость уровня чувствительности (дБ) от угла падения волны. На рис. 5 окружности соответствуют различному уровню чувствительности в дБ (обычно выбирается шаг 5 дБ), а диаметры — углу падения звуковой волны по отношению к оси в град. Полярные диаграммы (polar pattern) также записываются в заглушенной камере, но микрофон при этом вращается вокруг оси относительно излучателя.

Коэффициент направленности — отношение чувствительности микрофона на данной частоте при падении звуковой волны под углом α к чувствительности при угле падения звуковой волны 0 град (то есть по оси): $\Gamma(\alpha) = SM(\alpha) / SM(0)$.

Индекс направленности равен двадцати десятичным логарифмам от коэффициента направленности: $D = 20 \lg \Gamma(\alpha)$.

Коэффициент осевой концентрации определяет отношение звуковой энергии, падающей на микрофон вдоль оси, к энергии со всех остальных направлений. Он определяется как отношение квадратов чувствительности, измеренной по свободному полю и по диффузному полю (при использовании третьоктавного шумового сигнала с центральной частотой f Гц):

$\Omega = SM(0)^2 / SM_{диф}^2$.

Индекс осевой концентрации — десятикратный логарифм коэффициента осевой концентрации:
 $Q = 10 \lg \Omega$.

Перепад чувствительности, "фронт-тыл" — разность между уровнями чувствительности микрофонов, измеренными при углах приема 0 и 180 градусов на данной частоте в свободном поле:
 $Q_{0/180} = 20 \lg \{SM(0) / SM(180)\} = N_0 - N_{180}$.

Выбор микрофонов с различными характеристиками направленности определяется условиями записи: расположением источников (например, инструментов в оркестре), шириной звуковой панорамы, уровнем шумов в окружающем пространстве, стремлением получить специальные звуковые эффекты и др. Именно поэтому в настоящее время выпускаются микрофоны с различными видами характеристик направленности (часто с возможностью переключения).

Уровень максимального звукового давления (max SPL) — уровень звукового давления, при котором коэффициент гармонических искажений не превосходит заданного значения. В современных студийных микрофонах этот уровень составляет 140-150 дБ при величине коэффициента гармонических искажений 0,5% на частоте 1000 Гц.

Полный коэффициент гармонических искажений (THD) определяется по методике, используемой для определения чувствительности, но при этом с помощью анализатора спектра измеряется напряжение на выходе микрофона, соответствующее первой гармонике (U_1), второй

гармонике (U_2) и т. д. Коэффициент рассчитывается по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1}.$$

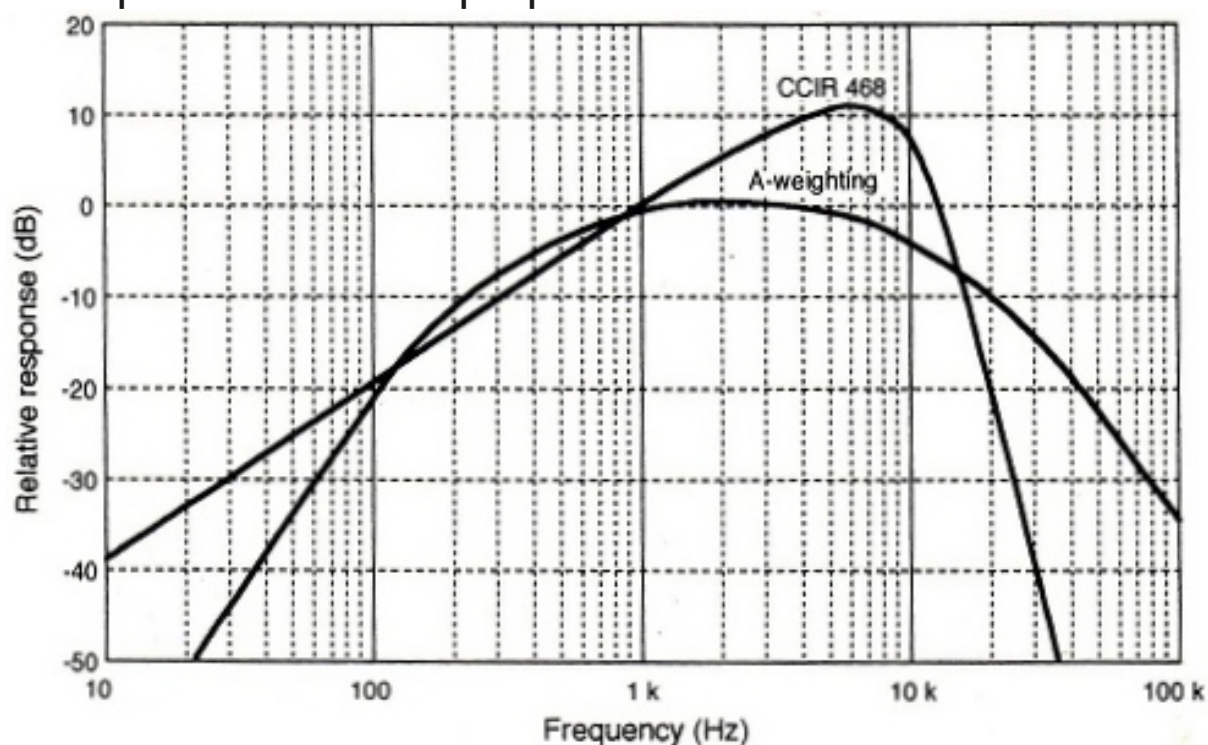
Обычно величина коэффициента гармонических искажений для современных микрофонов составляет $< 0,5\%$. Следует заметить, что этот коэффициент должен быть измерен для капсуля микрофона вместе с предусилителем, иногда фирмы указывают эту величину, измеряя только искажения в предусилителе (замещая капсуль эквивалентной нагрузкой), что дает заниженные значения. Поскольку измерять значения коэффициента гармонических искажений для таких высоких уровней давления очень трудно из-за искажений, возникающих в измерительных громкоговорителях, то используют различные приближенные методы (например, с помощью эквивалентных электрических цепей или пистонфона, который представляет собой жесткий корпус, куда вставляется на близком расстоянии движущийся поршень — аналог громкоговорителя — и измеряемый микрофон).

Примером могут служить значения max SPL для микрофона DPA 4004 Hi-SPL: 142 dB ($< 0,5\%$ THD), 148 dB ($< 1\%$ THD).

Уровень собственных шумов микрофонов определяется с помощью параметра, который называется **эквивалентный уровень шумов (Equivalent Noise Level)**. В соответствии с

отечественными и международными стандартами он определяется как уровень звукового давления, который создает напряжение на выходе микрофона, равное напряжению, возникающему в нем только за счет собственных шумов при отсутствии звукового сигнала (то есть в тишине). Это можно объяснить таким образом: за счет собственных шумов на выходе микрофона всегда имеется некоторое напряжение $U_{ш}$, даже если на него не падает звуковая волна. Если поместить на его место некоторый идеальный микрофон, в котором отсутствуют шумы, то чтобы создать на его выходе такое же напряжение $U_{ш}$, надо чтобы на его вход поступил звуковой сигнал с определенным давлением $p_{ш}$. Уровень этого давления в дБ и называется эквивалентным уровнем шумов. Он может быть рассчитан по формуле $L_{ш} = 20 \lg U_{ш} / S p_0$, где $U_{ш}$ — напряжение на выходе микрофона, обусловленное внешними и внутренними шумами, S — чувствительность микрофона, $p_0 = 2,10^{-5}$ Па. Это означает, что измеряется напряжение на выходе микрофона в отсутствие звукового давления, обусловленное только шумами, и затем определяется по вышеприведенной формуле, какому уровню звукового давления оно будет соответствовать. Например, если при измерениях в тишине на выходе микрофона имеется напряжение равное 0,001 мВ, а чувствительность микрофона 10 мВ/Па, то эквивалентный уровень шума будет равен 14 дБ-А. Способы измерения этого параметра несколько отличаются в разных стандартах, поэтому обычно в

современных каталогах приводятся два значения эквивалентного уровня шумов: по стандарту DIN 45 412 (IEC 60268-1) и по стандарту DIN 45 405 (CCIR 468-3). В первом случае при измерениях используется взвешивающая стандартная кривая А (рис. 6). Во втором случае используется другая форма взвешивающей кривой (так называемая психометрическая кривая), также показанная на рис. 6 (имеются и некоторые другие отличия в методике), обычно она применяется для измерительных микрофонов.



Для студийных конденсаторных микрофонов, эквивалентный уровень шума находится в пределах 10-20 дБ(A) (IEC179) и 20-30 дБ (CCIR 468-3). Например, для конденсаторного микрофона МКН80 фирмы Sennheiser эквивалентный уровень шумов по стандарту IEC-179 (DIN45-634) составляет 10 дБ(A), а по стандарту CCIR468-3 (DIN45-405) — 20

дБ. При выборе микрофона необходимо хорошо разбираться в таких тонких отличиях.

В ламповых микрофонах эквивалентный уровень шума выше и находится в пределах 17-23 дБ(А). В динамических микрофонах уровень собственных шумов существенно ниже, примерно на 10 дБ.

Поэтому в цепи микрофон-усилитель-пульт уровень шумов определяется, в основном, последними двумя звеньями, в то же время при использовании конденсаторных микрофонов их уровень микрофонных шумов является определяющим.

В международных каталогах на микрофоны обычно указывается **отношение сигнал/шум (Signal/Noise ratio)**, которое также рассчитывается двумя способами:

1) S/N ratio IEC 60268-1 — отношение сигнал/шум, измеренное как разница между опорным уровнем звукового давления 94 дБ (1 Па) и уровнем эквивалентного звукового давления, измеренного с взвешиванием по кривой А;

2) S/N ratio CCIR 468-3 — отношение сигнал/шум, измеренное как разница между опорным уровнем звукового давления 94 дБ (1 Па) и уровнем напряжения, соответствующего собственному шуму, измеренному с фильтром по CCIR 468-3.

Для студийных конденсаторных микрофонов эти величины находятся в пределах 74-64 дБ (CCIR468-3) и 84-74 дБ(А) (IEC-179). Например, для того же микрофона МКН80 эти отношения составляют 84 дБ и 74 дБ.

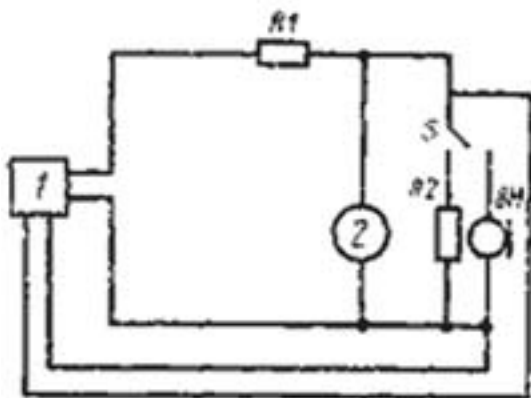
Динамический диапазон (dynamic range) — разность между максимальным уровнем звукового

давления (max SPL), при котором нелинейные искажения на выходе микрофона не превышают заданную величину, и эквивалентным уровнем шумов. Например, для микрофона МКН80 он равен 126 дБ-А.

Номинальный электрический импеданс

определяется из измерения модуля полного электрического сопротивления микрофона. Полное электрическое сопротивление есть отношение величины напряжения на выходе микрофона к результирующему току. Измерение модуля полного электрического сопротивления $[Z]$ динамических микрофонов производится по схеме на рис. 7.

Напряжение, подаваемое на микрофон, не должно превышать значения напряжения на выходе микрофона при воздействии предельного звукового давления, указанного в технической документации. Значения резистора R_2 приблизительно выбирается равным модулю импеданса микрофона $[Z]$, суммарное сопротивление R_1 и выходное сопротивление генератора должно не менее чем в 20 раз превышать ориентировочное значение $[Z]$ микрофона на частоте 1000 Гц. На заданной частоте измеряется уровень напряжения с микрофона и резистора R_2 . Результат определяется по формуле: $[Z] = R_2 \cdot 10^{(L_m - L_R)/20}$, где L_R — уровень напряжения при включенном резисторе R_2 , дБ; L_m — уровень напряжения при включенном микрофоне, дБ; R_2 — сопротивление резистора, Ом. Обычно задается значение $[Z]$ на частоте 1000 Гц.



Для конденсаторных микрофонов в стандарте ГОСТ 16123-88 предусмотрен также несколько другой метод, при котором микрофон замещается конденсатором равной емкости.

Величина выходного электрического импеданса (output electrical impedance), то есть модуля полного электрического сопротивления, в большинстве современных конденсаторных микрофонов находится в диапазоне 50-200 Ом, у динамических микрофонов до 600 Ом. При этом входное сопротивление предусилителей (input recommended load impedance) должно быть больше выходного сопротивления микрофона в 5-10 раз и составляет обычно 1000-2000 Ом. При таком соотношении сопротивлений обеспечиваются меньшие потери в кабеле.

Климатико-механические требования: кроме указанных выше электроакустических параметров на микрофоны задается обычно рабочий диапазон изменения температуры и влажности окружающей среды, внутри которого чувствительность не должна изменяться более чем на +/-2 дБ.

Электродинамические микрофоны имеют рабочий диапазон, как правило, -40...+50 град по температуре и 95% влажности при 20 град,

конденсаторные -10....+35 град и 85% влажности при 20 град. Минимальные требования к другим климатико-механическим характеристикам микрофонов различных групп сложности изложены в стандарте ГОСТ6495-88.

В спецификациях микрофонов иногда указываются также такие параметры как величина допустимого уровня снижения сигнала (preattenuation), например, на -10 дБ (могут быть и другие значения), ток насыщения (current consumption) и др.

В международных стандартах нормируются только методы измерений, параметры устанавливает фирма-производитель. В условиях жесткой конкуренции эти параметры постоянно улучшаются, примером могут служить параметры микрофона AKG C4000B (рис. 8).

Concert hall
Recording
Strings
Vocals

C 4000 B

Polar pattern	cardioid, hypercardioid, omnidirectional
Frequency range	20 to 20,000 Hz
Sensitivity	25 mV/Pa (-32 dBV)
Max. SPL	145/155 dB (THD=0.5%)
Equivalent noise level (IEC 60268-4)	19 dB
Equivalent noise level	8 dB-A
Signal/noise ratio (A-weighted)	86 dB
Preattenuation pad	10 dB, switchable
Bass filter	12 dB/octave at 100 Hz
Impedance	200 ohms
Recommended load impedance	>1.000 ohms
Supply voltage	9 to 52 V phantom power to DIN 45596
Powering	<2 mA
Connector	3-pin XLR
Finish	silver gray
Net weight	450 g / 1 lb.
Shipping weight	1 kg / 2.2 lbs.
Patent(s)	Electrostatic transducer (Patent no. AT 395.225, DE 4.103.784, JP 2.815.488)



Субъективная экспертиза является необходимой процедурой при выпуске новых моделей микрофонов на производстве, а также при сравнительном выборе микрофонов для звукозаписи, поскольку качество звучания микрофона, как и других видов электроакустической аппаратуры, не может быть полностью предсказано только с помощью измерения объективных параметров (в связи с тем,

что проблема расшифровки слухового образа не является окончательно решенной).

Часть 3. Классификация микрофонов.

В предыдущих статьях (см. [Микрофоны, часть 1](#) и [Микрофоны, часть 2](#)) была рассмотрена история микрофонов, а также основные параметры и методы их измерений. В данной статье будет представлена классификация микрофонов. Все применяемые в практике звукозаписи микрофоны можно классифицировать по следующим категориям:

- по принципам преобразования энергии;
- по видам характеристик направленности;
- по областям применения и конструктивным особенностям.

По принципам преобразования акустической энергии в электрическую микрофоны подразделяются на несколько категорий: электродинамические (в том числе катушечные, ленточные и др.), конденсаторные (электретные); угольные, пьезоэлектрические, кремниевые, оптические и др.

Наибольшее распространение в практике звукозаписи имеют в настоящее время электродинамические (катушечные, ленточные) и конденсаторные (электретные) микрофоны, поэтому остановимся только на их принципах преобразования, другие типы микрофонов или устарели (угольные), или находятся в стадии освоения (оптические, кремниевые и др.). О них

было рассказано в предыдущей статье, более подробную информацию можно получить из литературы.

Вид преобразования энергии нередко отражается в названии микрофона, например: МД-52 (D-40S) — микрофон электродинамический (52 — номер разработки); МЛ-20 (R-44) — микрофон электродинамический ленточный, МК-011 (С-3000) — микрофон конденсаторный; МКЭ-19 -микрофон электретный и т.д.

Электродинамические микрофоны

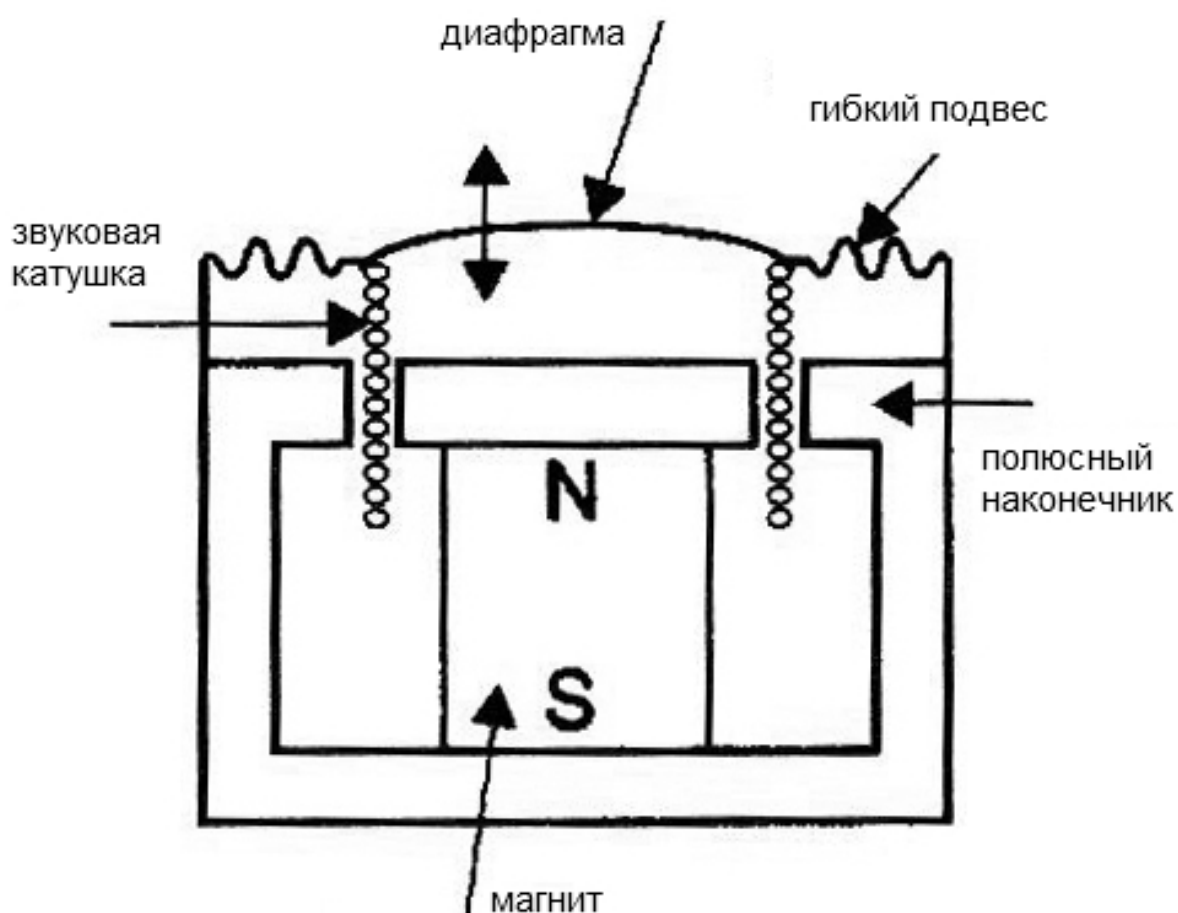
Как уже отмечено ранее, принцип действия таких микрофонов основан на индукционном принципе, открытом Фарадеем в 1831 году и заключающемся в том, что если при перемещении проводника в магнитном поле он пересекает силовые линии, то в проводнике возникает электродвижущая сила (ЭДС). Когда этот проводник замыкается на внешнюю цепь, в ней под действием ЭДС появляется индукционный ток. В

электродинамическом микрофоне звуковая волна воздействует на легкую диафрагму, которая начинает колебаться и приводит в движение связанный с ней проводник, помещенный в постоянное магнитное поле. При движении проводника в магнитном поле в нем индуцируется электрический ток, который затем усиливается и передается для дальнейшей обработки. В зависимости от вида проводника (звуковой катушки, то есть провода, намотанного на цилиндрический каркас, или металлической ленточки и др.) электродинамические микрофоны

подразделяются на микрофоны катушечные, ленточные и другие типы (например, изодинамические).

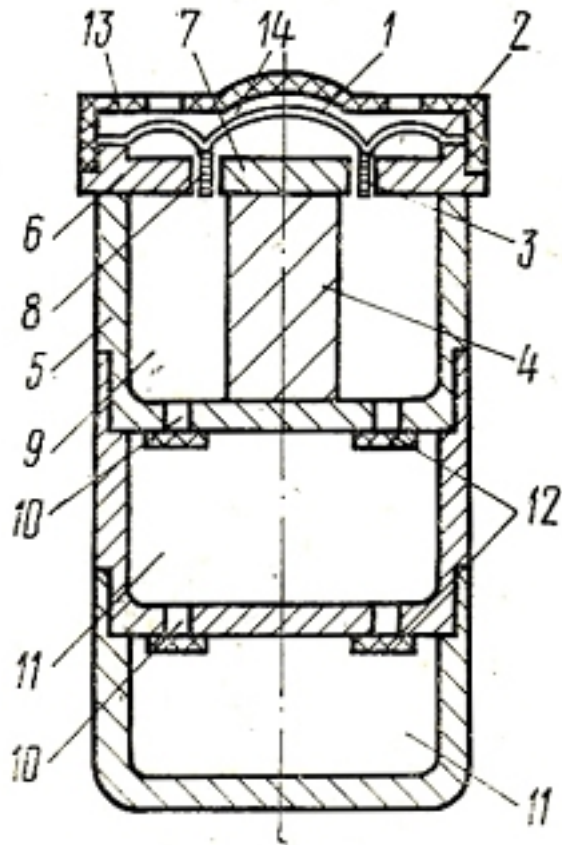
Электродинамические катушечные микрофоны

Конструкция ненаправленного динамического микрофона схематически показана на рис. 1. На рис. 1а изображена упрощенная модель, на рис. 1б представлен разрез конструкции реального микрофона.



К диафрагме, которая состоит из сферического купола (1) и гофрированного подвеса (2), приклеена звуковая катушка (3), состоящая из каркаса с намотанным на него в два слоя проводником. Магнитная цепь включает в себя: постоянный магнит (4), магнитопровод в виде стакана (5), фланца (6) и полюсного наконечника (7).

Гофрированный подвес диафрагмы приклеивается к верхнему фланцу (через прокладку), так чтобы катушка разместилась в середине зазора (8). Поскольку магнит намагничен вдоль оси, то магнитные силовые линии пересекают зазор, поэтому когда при движении диафрагмы под действием звукового давления катушка начинает колебаться, пересекая при этом магнитные силовые линии, в ней индуцируется ток, связанный с действующей величиной звукового давления на диафрагму соотношением $F=BLI$, где $F=pS$ — сила, действующая на диафрагму (Н), S — площадь диафрагмы (кв. м), p — звуковое давление (Па), B — индукция в зазоре (Tesla), L — длина проводника звуковой катушки (м), I — сила тока (А).



1 — диафрагма; 2 — гофри-
 рованный подвес; 3 — зву-
 ковая катушка; 4 — магнит;
 5 — стакан; 6 — фланец; 7 —
 полюсный наконечник; 8 —
 воздушный зазор; 9 — объ-
 ем; 10 — отверстия в дне
 стакана и объемов; 11 —
 объемы; 12 — ткань; 13 —
 накладка; 14 — щель

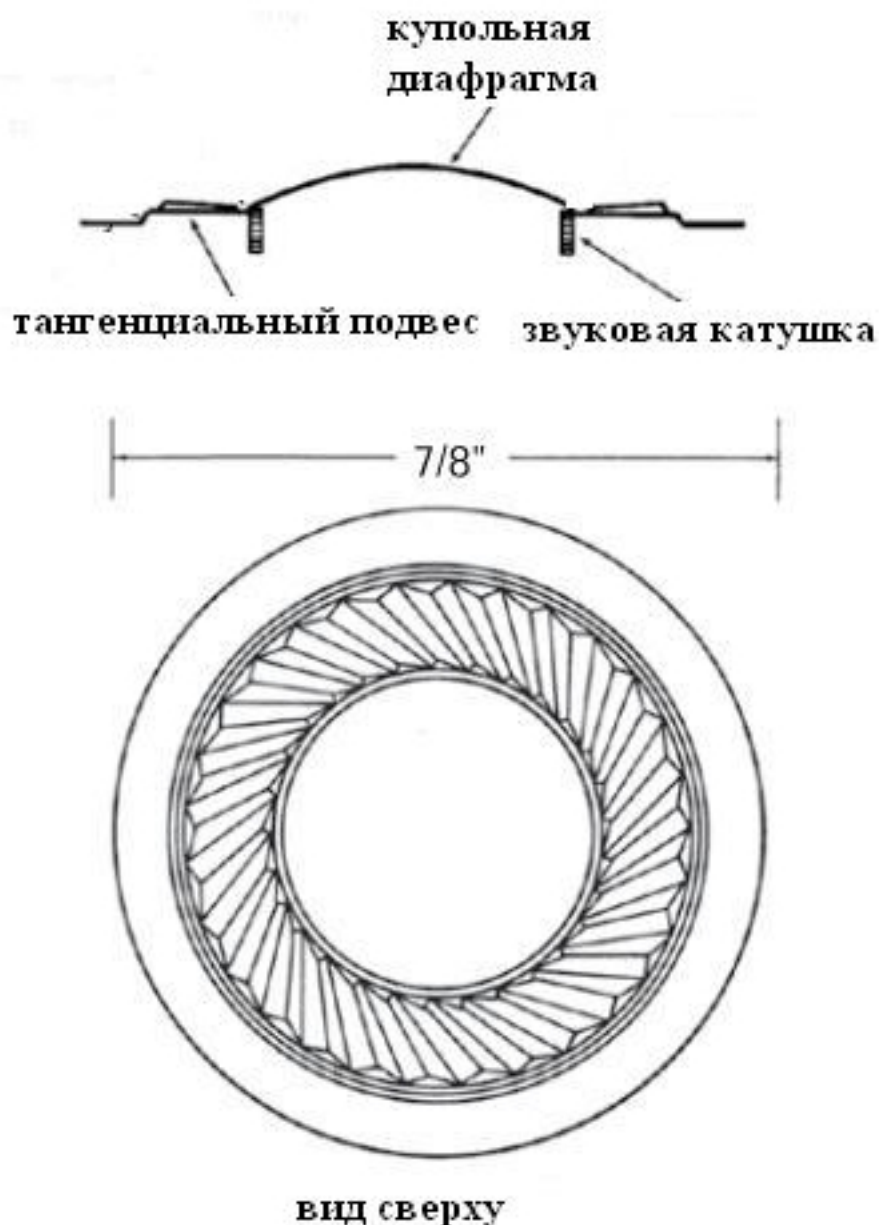
При колебаниях диафрагмы в полостях между ней, полюсным наконечником и верхним фланцем возникает избыточное звуковое давление, и воздух начинает через зазор выходить в полость (9), а затем через отверстия в дне стакана (10) в полость (11). Отверстия эти обычно закрыты тканью (12), что дает возможность регулировать сопротивление звуковому потоку. Сверху над диафрагмой обычно устанавливается накладка (13), форма которой в

центральной части повторяет сферическую форму диафрагмы, она имеет широкие окна, то есть акустически прозрачна. Между диафрагмой и накладкой имеется узкая полость (14), которая также оказывает свое влияние на демпфирование колебаний диафрагмы.

Поскольку чувствительность электродинамического микрофона приближенно определяется как $S \sim smBL/Z$, где sm — площадь мембраны, B — магнитная индукция в зазоре, L — длина проводника, Z — импеданс (сопротивление) микрофона, то для того, чтобы чувствительность не зависела от частоты, то есть микрофон имел ровную частотную характеристику, необходимо, чтобы сопротивление микрофона сохранялось постоянным в широком диапазоне частот. С этой целью в конструкции динамических микрофонов и используются последовательности воздушных полостей со специально подобранными значениями массы (m_i) и гибкости (c_i) воздушного объема и активного сопротивления потерь (r_i) за счет трения в щелях (которое, как сказано ранее, регулируется выбором размеров щелей и параметров ткани, их закрывающей). Таким образом, образуется сложная многорезонансная акустико-механическая система, в которой создается последовательность близко расположенных резонансов (с примерно равной добротностью), огибающая которых и формирует ровную частотную характеристику.

Выбор конструкции диафрагмы (материала, толщины, формы и др.), магнитной цепи и других элементов также оказывает существенное влияние

на форму частотной характеристики, уровень нелинейных и переходных искажений и другие параметры. Диафрагма с подвесом (рис. 2) обычно изготавливаются методом горячего прессования из пленки толщиной ~20 мкм (например, полиэстер типа Майлар (Mylar), обладающей высокой температурной (от -40 до +77 градусов) и вибрационной стабильностью и выдерживающей большое натяжение. Кроме того, такая пленка обладает достаточной жесткостью, что позволяет сохранять поршневой режим колебания диафрагмы в достаточно широком диапазоне частот, и имеет низкий удельный вес.



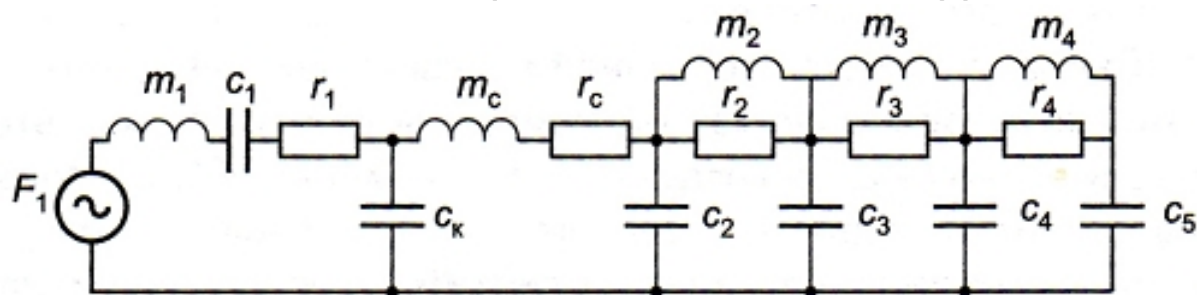
В качестве магнита используются магнитотвердые сплавы с высокой остаточной индукцией (например, магниты из неодима). стакан и фланец изготавливаются из магнитомягких материалов (малоуглеродистой стали или пермаллоя). Диаметр стакана 20-40 мм, что определяет общий размер капсуля. Капсюль вместе с амортизаторами, предохраняющими его от ударов и тряски, закрепляется в корпусе микрофона.

В зависимости от конструкции стакана микрофоны могут работать в режиме приемника давления или

в режиме приемника градиента давления, если обеспечен доступ внешней звуковой волны к тыльной поверхности диафрагмы через боковые отверстия в стаканах (конструкция такого микрофона будет показана в следующей статье). Соответственно они могут иметь все виды характеристик направленности, о которых будет сказано далее.

Теория проектирования и методы расчета динамических микрофонов хорошо разработаны, поскольку они выпускаются на протяжении уже нескольких десятилетий. В работах Гутина Л. Я., Фурдуева В. В., Вахитова Ш. Я, Вахитова Я.Ш., Гарри Олсона и др. представлены расчеты электродинамических микрофонов на основе анализа эквивалентных электрических схем (метод электромеханических аналогий). Эквивалентная схема динамического микрофона (приемника давления) показана на рис. 3, где m_1 , c_1 , r_1 — масса, гибкость и сопротивление подвижной системы, m_i , c_i , r_i — масса, гибкость и сопротивление воздуха в полостях за диафрагмой. Расчет таких схем (определение их частотных и импульсных характеристик, импедансов и др.) не представляет проблем, например, с помощью программ MicroCAD и др. Трудности возникают с измерениями параметров в реальном микрофоне: гибкостей, масс, сопротивлений и т. д. Кроме того, точность расчетов с использованием метода электромеханических аналогий можно считать удовлетворительной в области низких частот (где можно рассматривать конструктивные элементы

микрофона как систему с сосредоточенными параметрами), при повышении частоты необходимо учитывать распределенные свойства подвижной системы и использовать более точные методы. В настоящее время расчет колебательных процессов в сложных конструкциях капсулей микрофонов (с учетом колебаний элементов подвижной системы, колебательных процессов в сложной системе воздушных полостей, дифракции на корпусе и т.д.) выполняется с помощью численных методов.

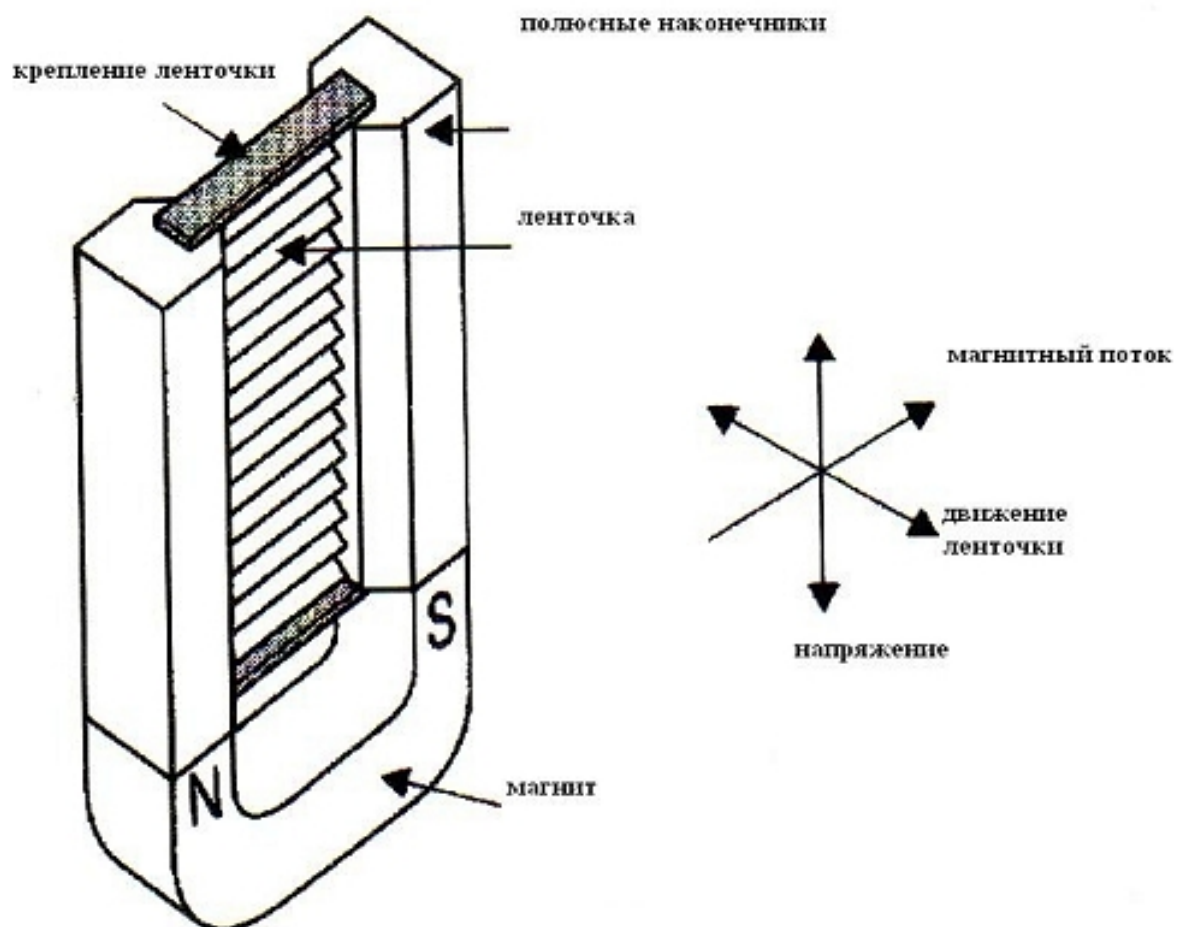


Динамические микрофоны обеспечивают достаточно хорошие электроакустические параметры (хотя и уступают конденсаторным микрофонам по чувствительности, неравномерности и уровню переходных процессов), а именно: большой динамический диапазон, устойчивость к механическим, климатическим нагрузкам и ветровым помехам, низкий уровень шумов (ввиду отсутствия необходимости использовать источники питания и предусилители), большую надежность и т. д., поэтому они находят широкое применение в системах звукоусиления, в конференц-системах, в радиовещании, в репортажах с места событий, речевых студиях и т. д. Имеется огромное многообразие конструкций

динамических микрофонов, выпускаемых ведущими мировыми фирмами.

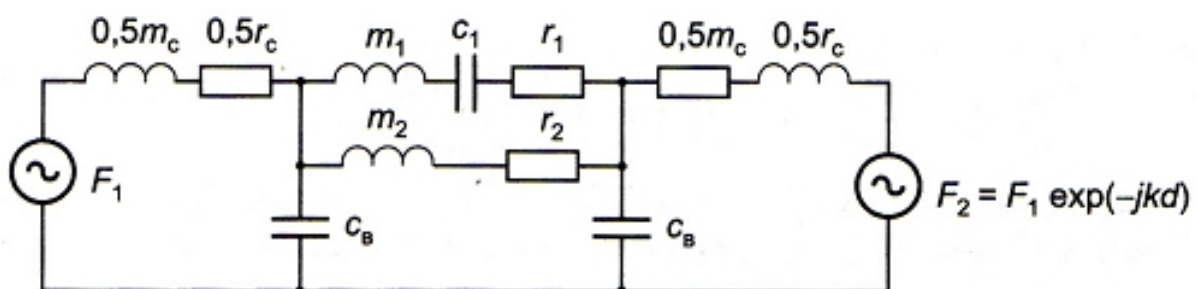
Электродинамические ленточные микрофоны

Схематически конструкция ленточного микрофона показана на рис. 4. Между полюсами магнита параллельно силовым линиям располагается гофрированная металлическая ленточка. Ленточка обычно изготавливается из алюминиевой фольги толщиной 2-4 мкм, шириной 1,5-2 мм, длиной 20-40 мм. При падении звуковой волны ленточка начинает колебаться, пересекает силовые линии, при этом в ней индуцируется ЭДС и в цепи, куда включен микрофон, появляется индукционный ток, который связан с действующей силой таким же соотношением: $F=BLI$.



Поскольку длина ленточки много меньше, чем длина проводника звуковой катушки в динамическом микрофоне, а ширина ленточки больше диаметра провода, то она имеет низкое сопротивление (порядка 0,2-0,5 Ом) и величина напряжения возникающего на ее концах очень мала (10-50 мкВ/Па). Поэтому ленточные микрофоны всегда используются с повышающим трансформатором, располагающимся прямо в корпусе микрофона, чтобы избежать помех за счет наводок в кабеле. Благодаря этому чувствительность возрастает до 1...2 мВ/Па, сопротивление до 200-300 Ом.

Эквивалентная схема ленточного микрофона представлена на рис. 5, где m_1 , c_1 — эквивалентная масса и гибкость ленточки, r_1 — активное сопротивление ленточки, m_2 , r_2 — масса и сопротивление трения воздуха в зазорах между ленточкой и полюсными наконечниками, m_c и r_c — присоединенная масса воздуха и сопротивление излучения, c_B — гибкость воздуха в полостях перед и за ленточкой.



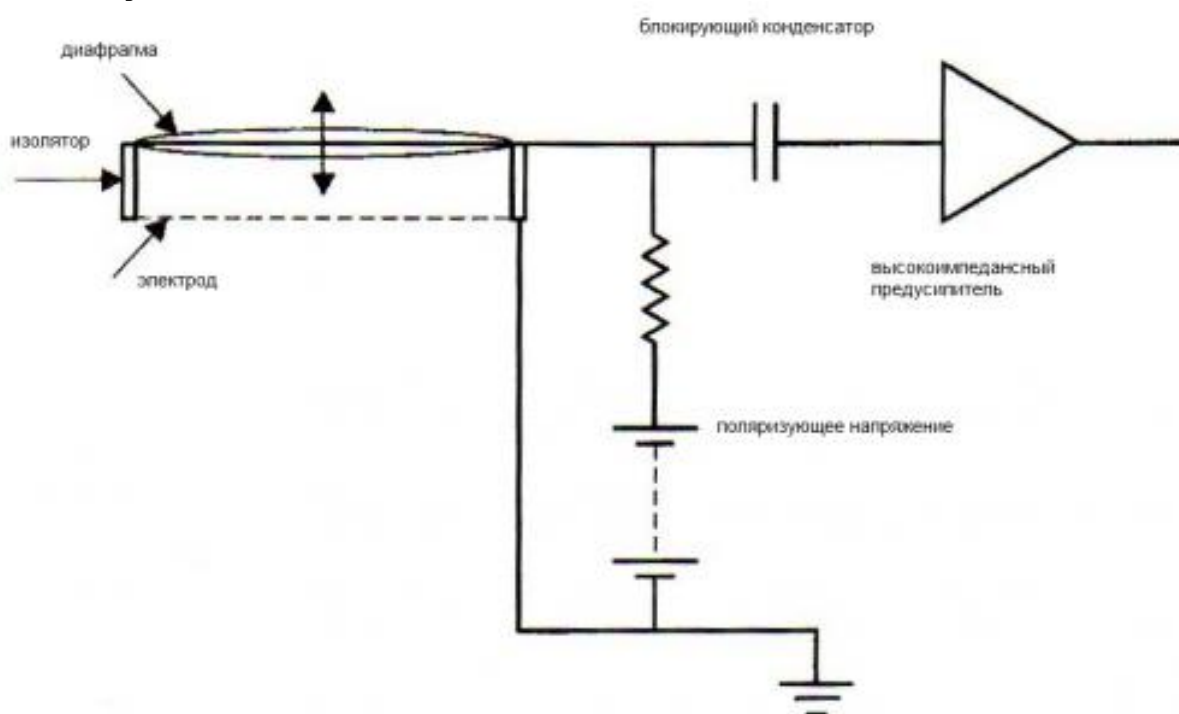
Ленточные микрофоны имеют малый уровень переходных искажений из-за малой инерционности легкой ленточки, поэтому обеспечивают чистое, "теплое" звучание, за что высоко ценятся в студийной звукозаписи. Однако они требуют

бережного отношения при транспортировке и очень чувствительны к климатическим и механическим воздействиям. Кроме того, из-за больших размеров магнита и наличия трансформатора они обладают сравнительно большими габаритами и достаточно дороги в производстве.

Конденсаторные микрофоны

Принцип работы конденсаторного микрофона показан на рис. 6. Капсюль микрофона представляет собой конденсатор, одна пластина которого неподвижна (массивный электрод), вторая — тонкая натянутая мембрана из металлизированной с внешней стороны высокополимерной пленки. На конденсатор подается постоянное поляризующее напряжение (обычно 48 В) через высокоомный резистор, наличие которого обеспечивает постоянство заряда на его обкладках. При падении звуковой волны на микрофон мембрана начинает колебаться, при этом меняется расстояние между пластинами и меняется емкость конденсатора, которая равна $C_0 = \epsilon_0 S / d$, где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная воздуха ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м), S — площадь электрода (или эффективная площадь диафрагмы), d — расстояние между обкладками. Заряд конденсатора пропорционален емкости C_0 и приложенному поляризующему напряжению U_0 : $Q_0 = C_0 U_0$. При колебаниях диафрагмы происходит изменение емкости, пропорциональное величине смещения диафрагмы: $\Delta C = \epsilon_0 S / (d - x)$, где x — смещение диафрагмы. Поскольку при изменении емкости конденсатора заряд сохраняется

практически постоянным, то должно, соответственно, изменяться напряжение на нем: $Q_0 = C_0 U_0 = \Delta C (U_0 - u)$, где u — переменная составляющая напряжения, возникающая при колебаниях диафрагмы. Из приведенных выражений следует, что переменная составляющая напряжения пропорциональна величине поляризующего напряжения, смещению диафрагмы и обратно пропорциональна величине расстояния между обкладками: $u = U_0 x/d$.



Переменное напряжение, обусловленное колебаниями мембраны, через блокирующий (от проникновения постоянного поляризующего напряжения) конденсатор подается на предусилитель, который трансформирует высокое (емкостное) сопротивление капсуля к более низкому значению для согласования его с входным сопротивлением последующего микрофонного усилителя. С целью уменьшения потерь на кабеле

предусилитель размещается непосредственно в корпусе микрофона.

Чтобы чувствительность конденсаторного микрофона не зависела от частоты (то есть имела место плоская частотная характеристика) необходимо выполнение следующих условий:

$$R_n > 1/2\pi f_n C_0 \text{ и } f_0 > f_v,$$

где f_n и f_v — нижняя и верхняя частоты рабочего диапазона микрофона, f_0 — резонансная частота мембраны. Требования эти означают, что первая резонансная частота мембраны должна находиться выше верхней частоты рабочего диапазона частот, поэтому мембраны из тонких металлизированных полимерных пленок с толщиной от 5 мкм сильно натягиваются. Нижняя частота рабочего диапазона определяется величиной сопротивления резистора R_n и емкостью мембраны C_0 . Например, если емкость капсуля 100 пФ, то для частоты 30 Гц надо иметь величину сопротивления не менее 0,5109 Ом. Обычно же она находится в пределах $(0,5...2)10^9$ Ом.

При выполнении указанных условий чувствительность микрофона не будет зависеть от частоты и будет определяться как:

$$S \sim U_0 S c / d,$$

где U_0 — поляризующее напряжение, S — площадь мембраны, c — общая гибкость системы (гибкость мембраны плюс гибкость объема воздуха под мембраной), d — расстояние между обкладками.

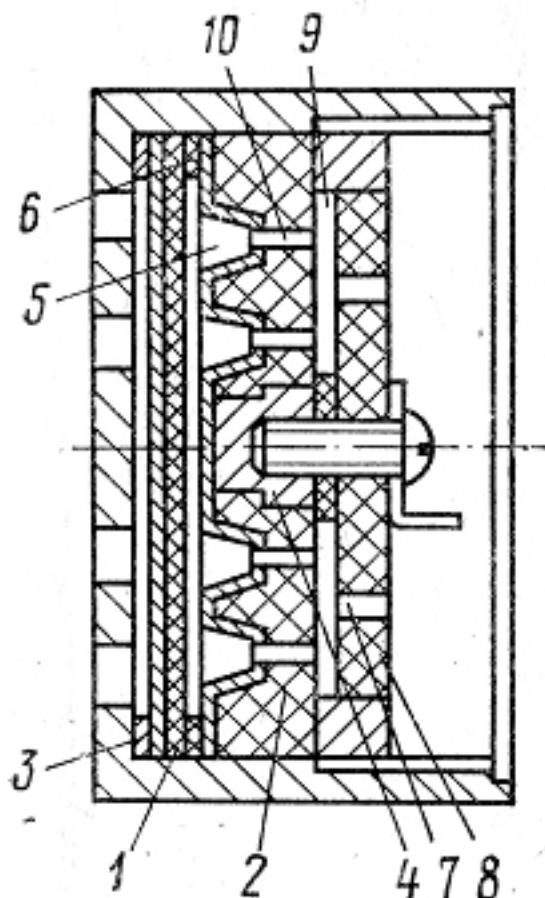
Из приведенного соотношения следует, что для повышения чувствительности микрофона надо увеличивать поляризующее напряжение, но этому

препятствует малый зазор между мембраной и неподвижным электродом ($d=20\ldots 40$ мкм), поскольку при этом возрастает вероятность "пробоя" (при $U_0/d\sim 10^4$ В/мм конденсатор пробивается), поэтому оно не превышает 48 В. Можно увеличивать площадь S , но при этом сужается характеристика направленности на высоких частотах и увеличиваются технологические трудности в изготовлении (обеспечение равномерного натяжения и др.), поэтому, в основном, используются мембраны с диаметром 6...20 мм (в последние годы появились микрофоны с "большими" диафрагмами диаметром 25 мм). При таких малых расстояниях между электродами упругое сопротивление воздушного слоя под мембраной становится достаточно большим и ей приходится преодолевать его при колебаниях, что снижает чувствительность микрофона. Для уменьшения упругости воздушного объема в массивном электроде делают специальные канавки, при этом за счет дополнительного воздуха в канавках общая упругость воздушного слоя уменьшается, в то же время емкость практически не меняется, так как она определяется плоской частью поверхности. При колебаниях диафрагмы также возникают нелинейные искажения за счет нелинейных свойств тонкого слоя воздуха в подмембранном объеме, нелинейных свойств подвижной системы и др. Представленная на рис. 6 схема включения капсюля микрофона называется *низкочастотной схемой включения с поляризующим напряжением*,

однако существует *высокочастотная схема включения*, когда микрофонный конденсатор включается в цепь с высокочастотным генератором. При движении мембраны под действием звуковой волны меняется емкость и происходит модуляция высокочастотной несущей частоты (например, 8 МГц), которая затем демодулируется и из нее выделяется низкочастотная составляющая. В практике применяются схемы, использующие как фазовую, так и частотную и амплитудную модуляцию. Такие схемы исключают необходимость применения высокого поляризующего напряжения (достаточно источника питания 6-12 В), позволяют снять ограничения по воспроизведению низких частот, снижают нелинейные искажения и требования к изоляции кабеля (так как для высокой частоты он имеет достаточно низкий импеданс). Однако они требуют высокой стабильности частоты генератора и постоянства емкости капсуля при отсутствии звукового сигнала, которое может произойти при изменении внешних климатических условий. Обе схемы (модулятор и демодулятор) размещаются в корпусе микрофона и на его выходе имеет место только напряжение звуковой частоты. Такие схемы включения используются иногда в измерительных и некоторых студийных микрофонах (например, модель Sennheiser MKH805). Поскольку они применяются значительно реже, то дальше будет рассматриваться только первый — низкочастотный вариант включения).

Изложенные ранее соображения реализуются в конденсаторных микрофонах следующим образом: конструкция капсуля, показанная на рис. 7, включает в себя мембрану (1) — натянутую полимерную пленку с внешним металлическим слоем (нанесенным вакуумным напылением), которая приклеивается с помощью электропроводящего клея к металлическому кольцу. Вторая обкладка выполняется в виде неподвижного электрода (2), изготовленного из металлической пластины или методом горячего прессования из композиционного диэлектрика, металлизированного по поверхности. Между мембраной и неподвижным электродом с помощью изоляционных прокладок образуется воздушный зазор (5), обычно толщиной 20-40 мкм. Изолятор разделяет корпус и неподвижный электрод. В электроде имеются отверстия (7), определяющие общую гибкость системы, кроме того, используется шайба с отверстиями (8), образующая щель (9), которая создает дополнительную массу и трение для формирования характеристики направленности (см. далее), а также втулка и планка для снятия напряжения. Сверху над мембраной устанавливается сетка, служащая защитой от электростатических помех и механических повреждений мембраны. Капсюль устанавливается в корпусе, который включает в себя также предусилитель, элементы крепления, амортизаторы и др. Показанная конструкция относится к ненаправленному конденсаторному микрофону (приемнику давления), конструкция направленных

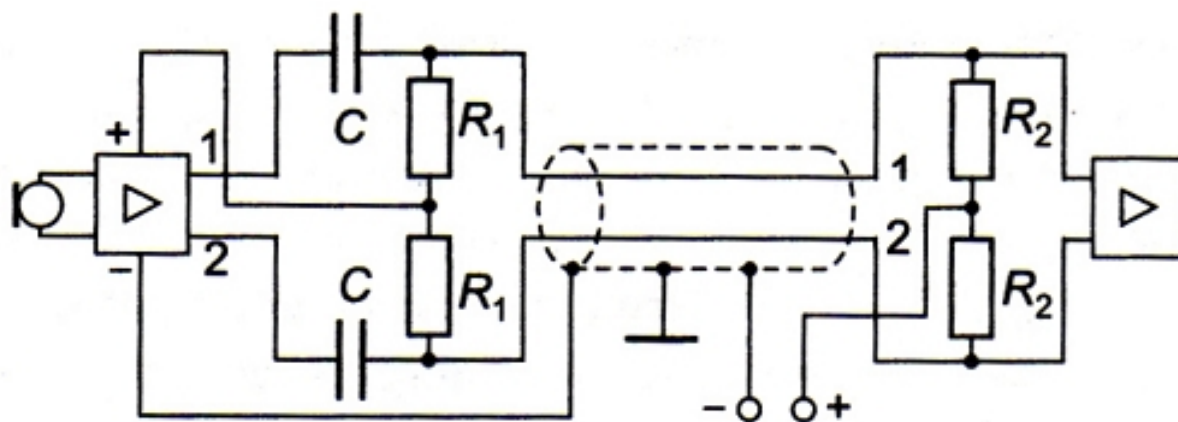
микрофонов (приемников градиента давления) отличается и будет представлена далее.



1 — мембрана; 2 — неподвижный электрод; 3 — кольцо; 4 — втулка; 5 — углубление в НЭ; 6 — изоляционное кольцо; 7 — отверстия; 8 — шайба; 9 — щель; 10 — отверстие в дне НЭ

Конденсаторный микрофон нуждается в высоковольтном источнике питания для зарядки капсуля и для предусилителя. Обычно для этого используется фантомное питание, имеющееся в пультах, видеокамерах и др. Схема подачи фантомного питания представлена на рис. 8. Название "фантомное" выбрано потому, что

постоянное напряжение к микрофону подается по тому же двухканальному кабелю, по которому с микрофона снимается переменное напряжение.



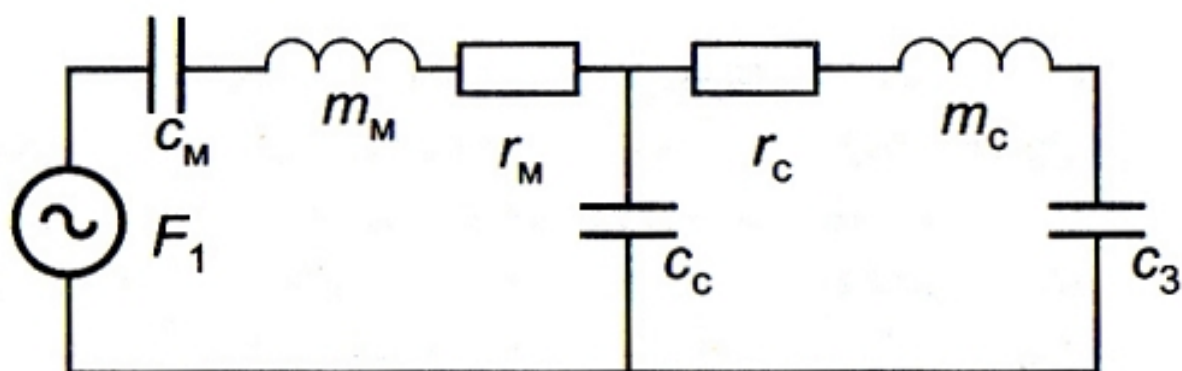
Конденсаторные электретные микрофоны

В 70-х годах начался промышленный выпуск электретных конденсаторных микрофонов, использующих эффект создания пленочных электретов (открытый японским физиком М. Ягути), способных длительное время сохранять электрический заряд. Капсюль такого микрофона также представляет собой конденсатор переменной емкости, но в качестве одной из обкладок используется тонкая диэлектрическая пленка (например, из поливинилфторида и др.), способная сохранять заряд после поляризации. Электрет характеризуется плотностью заряда на его поверхности (определяется способом поляризации) и временем его удержания, которое зависит, в первую очередь, от условий эксплуатации (например, температуры и влажности воздуха) и особенностей конструкции, в которой он используется. Мембрана металлизирована с наружной стороны и приклеивается к металлическому кольцу в натянутом состоянии.

Неподвижный электрод изготавливается из композитного изоляционного материала и со стороны мембраны металлизирована. Применение таких пленочных электретов не требует постоянного напряжения поляризации, так как заряд поддерживается за счет электризации пленки. Требуется только небольшое напряжение (порядка нескольких вольт) для питания предусилителя. Миниатюризация предусилителей и использование малогабаритных источников питания позволяют разместить их внутри корпуса микрофона. Это сделало возможным уменьшение размеров микрофона, упростило производство и условия эксплуатации. Кроме того, в электретных микрофонах можно использовать меньшую толщину зазора между пленкой и электродом (так как заряды находятся в связанной форме, не происходит их перетекания к центру при движении мембраны и потому не происходит "залипания" мембраны к электроду) и вследствие этого увеличить чувствительность.

Особой разновидностью электретных микрофонов являются микрофоны с "массивным электретом", то есть микрофоны, у которых электретная пленка нанесена на неподвижный электрод, а вторая обкладка конденсатора делается из тонкой полимерной пленки, как у обычного конденсаторного микрофона. Это позволяет уменьшить толщину колеблющейся пленки, а значит поднять чувствительность микрофона, но при этом сохранить преимущества электретных микрофонов.

Теории расчета конденсаторных микрофонов уделяется значительное внимание в литературе: имеется большое количество работ, использующих метод электромеханических аналогий для расчета параметров конденсаторных микрофонов (пример эквивалентной схемы конденсаторного ненаправленного микрофона представлен на рис. 9), а также значительное количество монографий, статей и диссертаций, использующих точные численные методы для расчета колебательных процессов в капсуле конденсаторного микрофона и дифракционных процессов на его корпусе.



Конденсаторные (электретные) микрофоны имеют ряд преимуществ, которые позволяют широко использовать их в студийной практике. К числу основных можно отнести следующие: низкий уровень переходных искажений (из-за малой массы диафрагмы), широкие частотный и динамический диапазоны, высокая чувствительность, малая чувствительность к магнитным помехам и т. д. Однако они обладают меньшей механической (к вибрации, тряске и др.) и климатической стойкостью (температурный режим от -10 до $+35$ градусов, влажность не более 85%), требуют дополнительного напряжения поляризации, имеют

более высокую стоимость и более высокий уровень шумов, чем динамические микрофоны.

Шумы

Поскольку уровень шумов — существенный фактор в использовании всех типов микрофонов, остановимся на причинах их появления и методах борьбы с ними подробнее.

Микрофонные шумы обычно разделяются на внутренние, наводимые и внешние. *Внутренние (собственные)* шумы возникают в капсулях (в результате случайных колебаний молекул воздуха в слое между мембраной и неподвижным электродом) и элементах электрической схемы, расположенных в корпусе микрофонов (за счет случайных тепловых процессов в сопротивлении нагрузки, в интегральных схемах предусилителя и др.), что приводит к появлению напряжения (тока) на выходе микрофона при отсутствии внешнего звукового воздействия. Поскольку в конденсаторных микрофонах предусилители используются всегда, а в динамических катушечных микрофонах их обычно нет (в них собственные шумы возникают в основном в активном сопротивлении звуковой катушки), то уровень внутренних шумов у конденсаторных микрофонов существенно выше, чем у динамических.

Наводимые шумы (помехи) появляются за счет воздействия внешних электромагнитных и электрических полей на элементы микрофонных конструкций (на выходные трансформаторы, например, у ленточных микрофонов, звуковые

катушки динамических микрофонов и др.).

Источниками *электромагнитных помех*, которые проявляются в виде низкочастотного фона, являются кабели мощных осветительных приборов, электропитающих устройств и др. Для борьбы с ними защищают трансформаторы экранами из низкоуглеродистой стали, пермаллоя и др. В профессиональных динамических микрофонах применяют антифоновые катушки, наматываемые на корпус, в котором находится капсуль.

Индуктивность такой катушки равна индуктивности звуковой катушки, но с целью компенсации помех намотка проводится в противоположном направлении. В микрофонах возникают также *электростатические помехи*, которые проявляются как в виде фона, так и в виде щелчков, шорохов и др. при резком перемещении микрофона и его кабеля. Защита от них осуществляется с помощью симметрирования микрофонных цепей и электростатической экранировки кабелей (с помощью чулка из гибкой металлизированной заземляемой оплетки). *Внешние шумы (помехи)* производятся находящимися в помещении оборудованием (вентиляция, осветительные приборы, видеокамеры и др.) и людьми (публика, операторы и т. д.). Такие шумы создают в помещении, как правило, диффузное звуковое поле, энергия которого распределена равномерно. Учитывая, что полезные источники звука имеют точную локализацию в помещении, для отстройки от этих шумов применяются направленные и остронаправленные микрофоны, выбирается

оптимальное расположение микрофона по отношению к источнику и т. д. Кроме того, к внешним шумам относятся *аэродинамические шумы*, то есть помехи, возникающие вследствие обтекания микрофона потоками воздуха (из-за ветра, резкого перемещения, дыхания вокалиста при произнесении взрывных и фрикативных согласных и др.). Защитой от этих помех служат ветровые экраны ("ветрозащита") из травленого поролона или многослойных металлических сеток, рассекающих поток воздуха. Эффективность экранов увеличивается с увеличением их размеров. Однако поскольку экраны оказывают существенное влияние на форму частотной характеристики в области высоких частот, оптимальный выбор их параметров имеет большое значение. Наконец, имеются *вибрационные и структурные шумы*, обусловленные низкочастотными колебаниями, действующими через элементы конструкции на капсуль, из-за колебаний опор (стойки, пола и др.), тряски микрофона в руках исполнителя, случайных ударов, толчков и др. Защитой от такого типа шумов служит применения амортизаторов внутри корпуса, с целью уменьшения передачи колебаний корпуса микрофона на капсуль. Структурный шум возникает вследствие трения микрофона об одежду (для петличных микрофонов), сжимания и трения в руках исполнителя и др. Для его снижения необходимо уменьшать шероховатость корпуса, увеличивать его толщину, разделять металлические части корпуса и капсуль резиновыми и полимерными прокладками и др.

Часть 4. Классификация микрофонов по видам характеристик направленности.

В [предыдущей части статьи](#) рассматривалась классификация микрофонов по принципам преобразования энергии. В данной части будет рассмотрена классификация по видам характеристик направленности.

По этому параметру все микрофоны могут быть разделены на следующие группы:

ненаправленные (omnidirectional) — приемники давления;

двунаправленные (bidirectional) — симметричные приемники градиента давления;

однаправленные (unidirectional) —

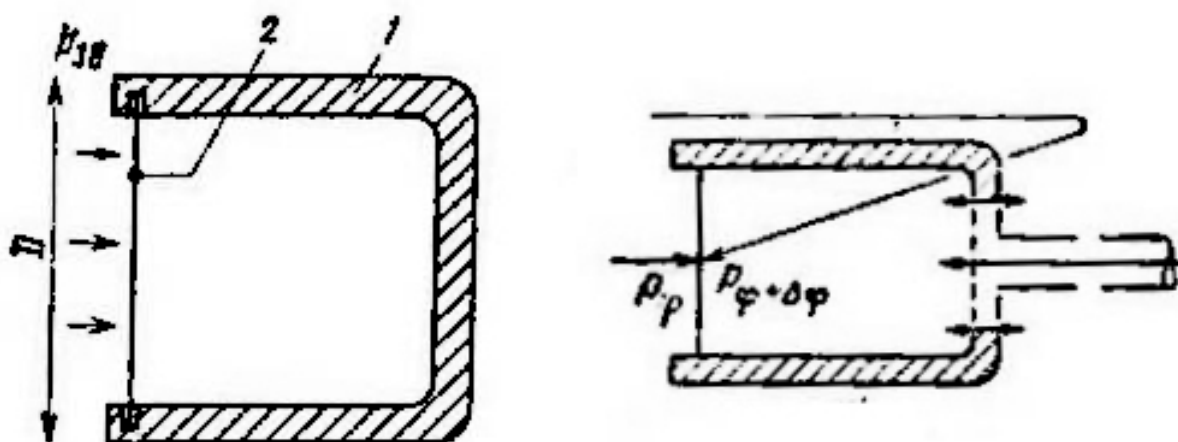
несимметричные приемники градиента давления и комбинированные;

остронаправленные — микрофоны типа Shotgun и параболические.

Ненаправленные микрофоны

Если условно изобразить микрофон (это относится к любому типу преобразования) в виде гибкой диафрагмы в корпусе с жесткими стенками, то переменное звуковое давление от источника звука будет воздействовать на диафрагму с одной стороны (рис. 1). Когда длина волны значительно больше размеров микрофона ($\lambda \gg d$), то есть на низких частотах, звуковая волна обтекает корпус микрофона и звуковые волны со всех направлений (как фронтальных, так и боковых и задних) приходят в одинаковой фазе на все точки мембраны в пределах ее площади, то есть

микрофон как бы "не чувствует" направление их прихода.



Характеристика направленности такого микрофона представляет собой шар, в центре которого находится микрофон (рис. 2), то есть чувствительность микрофона одинакова для всех направлений прихода звуковой волны. Такой микрофон называется *ненаправленным* или *приемником давления*.

Ненаправленная ("шар")	Двухнаправленная ("двухмерка")	(кардиоида)	Односторонне направленная (суперкардиоида)	(суперкардиоида)

Следует отметить, что это свойство сохраняется только на низких частотах, с повышением частоты начинает сказываться экранирующее действие корпуса и возникает разность фаз между волнами, приходящими с разных направлений в пределах

площади мембраны. При этом микрофон приобретает отчетливо направленные свойства в сторону передних источников звука.

Ненаправленные микрофоны находят широкое применение в технике звукозаписи, особенно для записи звуков окружающего (реверберационного) пространства и шумов. Они применяются также как репортажные, так как у них отсутствует эффект "близости" (proximity), который всегда существует в направленных микрофонах (подробнее о нем будет рассказано дальше).

Двунаправленные микрофоны

Схематически принцип работы микрофона — приемника градиента давления, показан на рис. 1 справа. В таком микрофоне независимо от принципа преобразования обеспечен доступ звуковой волны как с передней, так и с тыльной стороны мембраны (так как в корпусе микрофона имеются отверстия для доступа звуковых волн к задней части мембраны). При этом мембрана находится под действием разности (то есть градиента) сил $\Delta F = F_1 - F_2$, где

$F_1 = \rho v S \sin \omega t$ — сила, действующая на переднюю сторону диафрагмы;

$F_2 = \rho v S \sin(\omega t - \Delta \varphi)$ — сила, действующая на

заднюю сторону диафрагмы, она равна по амплитуде силе F_1 , но отстает от нее по фазе на $\Delta \varphi$, так как звуковые волны проходят более

длинный путь (D) до задней стороны диафрагмы. Эта разность фаз приближенно равна $\Delta \varphi = 2\pi (D$

$\cos\alpha) / \lambda$, при этом градиент сил действующих на диафрагму равен:

$\Delta F = p_{\text{зв}} S (D/c) \omega \cos\alpha$, где D — расстояние между фронтальным и задним входом звуковой волны, α — угол падения звуковой волны, c — скорость звука. Как видно из этого выражения, когда угол падения звуковой волны 0 град или 180 град, то разность (градиент) сил максимальна, так как $\cos 0$ град = 1, а $\cos 180$ град = -1, а когда угол падения 90 град, то она равна нулю ($\cos 90$ град = 0). Таким образом, зависимость уровня чувствительности от угла падения имеет вид, показанный на рис. 2.

Коэффициент направленности в данном случае равен: $\Gamma(\alpha) = \cos\alpha$. Характеристика направленности такого типа обычно называется "восьмерка" ("figure eight").

Микрофоны с данной характеристикой направленности чувствительны к звуковым волнам, падающим вдоль оси, и практически нечувствительны к звуковым волнам, падающим под углом 90 градусов к оси. Такую характеристику могут иметь микрофоны разных типов преобразования, например, ленточные с открытой с двух сторон ленточкой, динамические, конденсаторные и др.

Микрофоны такого типа находят широкое применение для записи боковых отражений в помещениях, в микрофонных стереосистемах, системах пространственного (surround) звука и др.

Однонаправленные микрофоны

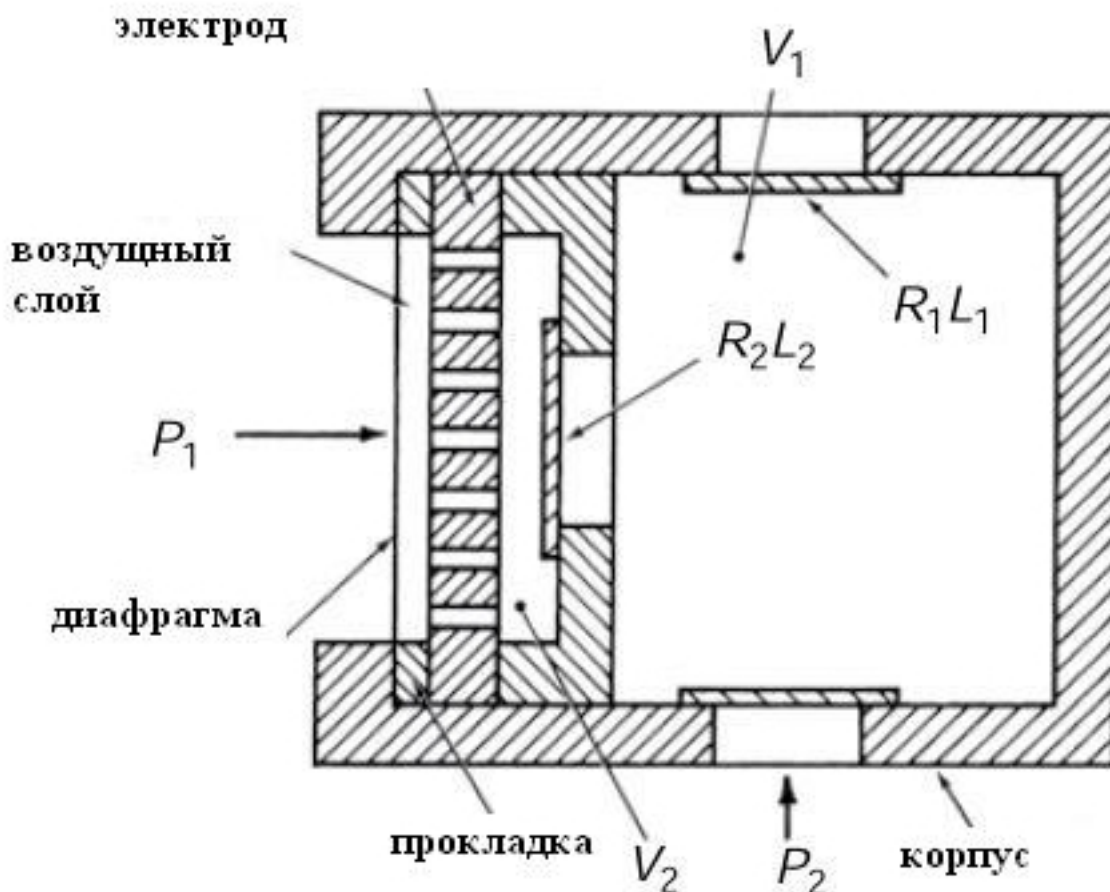
Если синтезировать характеристику направленности микрофона путем комбинирования

ненаправленной и двунаправленной характеристики, то в осевом фронтальном направлении чувствительность увеличивается (поскольку сигналы складываются в одинаковой фазе), а в тыловом направлении чувствительность уменьшается — сигналы взаимно вычитаются, так как их фазы противоположны. Пусть микрофон — приемник давления, имеет чувствительность S_1 , не зависящую от угла падения волны, а микрофон — приемник градиента давления, имеет чувствительность $S_2 \cos \alpha$. Если чувствительности обоих микрофонов на оси выбрать равными $S_1 = S_2$, то характеристика направленности такой комбинации микрофонов будет иметь вид:

$$G(\alpha) = (S_1 + S_1 \cos \alpha) / 2 \quad S_1 = 1/2(1 + \cos \alpha).$$

Полученная при этом форма диаграммы направленности называется *кардиоидой* (рис. 2). Для создания таких комбинированных микрофонов раньше (30-40 годы) размещали два капсюля в одном корпусе и электрически складывали их выходные напряжения. Однако односторонненаправленную характеристику направленности удавалось получить только в очень ограниченном диапазоне частот (две-три октавы) из-за различий амплитудных и фазовых характеристик обоих типов микрофонов. В современных односторонненаправленных микрофонах используется один преобразователь с двумя или более акустическими входами для доступа звуковой волны к диафрагме, однако в них условия доступа звуковой волны к передней и задней части диафрагмы неодинаковы. Такие

преобразователи относятся к группе несимметричных приемников градиента давления (рис. 3). Фазовый сдвиг между звуковыми волнами, падающими на переднюю и заднюю сторону диафрагмы, состоит из "внешнего", зависящего от длины пути между передней и тыльной стороной диафрагмы $\Delta \varphi 1 = 2\pi (D \cos \alpha) / \lambda$, и "внутреннего" $\Delta \varphi 2$, определяемого внутренней массой и упругим сопротивлением воздуха в объеме под диафрагмой и в отверстиях (для регулирования этого сопротивления отверстия закрываются шелком и др.). Таким образом, сила F_3 , действующая на заднюю поверхность мембраны, отстает от силы F_1 , действующей на переднюю поверхность, как на внешний, так и на внутренний фазовый сдвиг: $F_3 = \rho v S \sin(\omega t - \Delta \varphi 1 - \Delta \varphi 2)$. При этом внешний фазовый сдвиг зависит от угла падения звуковой волны (то есть $\cos \alpha$), а внутренний не зависит. Подбирая разность этих фаз, можно сформировать различные типы односторонних характеристик направленности.



Большинство современных направленных микрофонов как конденсаторного, так и динамического типа относятся именно к несимметричным приемникам градиента давления. Отверстие (может быть разделено на несколько отверстий) располагается на определенном расстоянии от задней стороны диафрагмы (обычно 3,8 см), примером конструкции капсюля конденсаторного микрофона градиента давления с одним входным отверстием может служить модель Electro-Voice DS35. Кроме этого существуют конструкции капсюлей, где два, три и множество отверстий располагаются на разных расстояниях от диафрагмы (рис. 4).



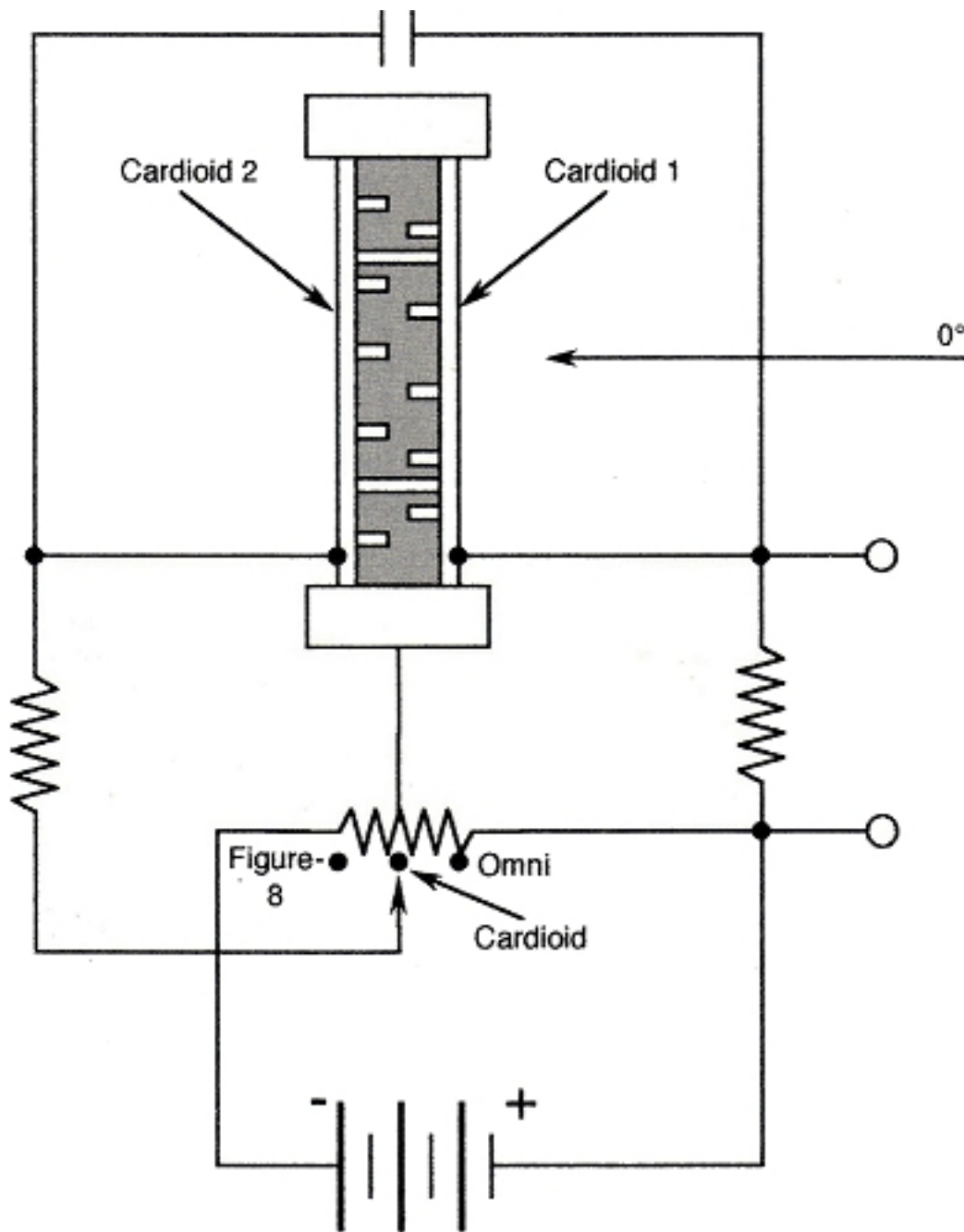
Примером может служить модель Sennheiser MD441 (рис. 5), где три отверстия располагаются на разном расстоянии: 3,8 см — высокочастотный вход, 5,6 см — среднечастотный вход, 7 см — низкочастотный вход. Такая конструкция более устойчива к эффекту близости (proximity), так как низкочастотное отверстие находится дальше от диафрагмы, а этот эффект (см. далее) уменьшается с увеличением расстояния от источника звука.



Конденсаторные микрофоны с двойными мембранами (комбинированные)

В современных конструкциях микрофонов часто используются двумембранные капсулы, которые представляют собой два совмещенных конденсаторных микрофона с отдельными мембранами и общим неподвижным электродом (рис. 6). В них имеются как замкнутые полости, так и сквозные отверстия, соединяющие

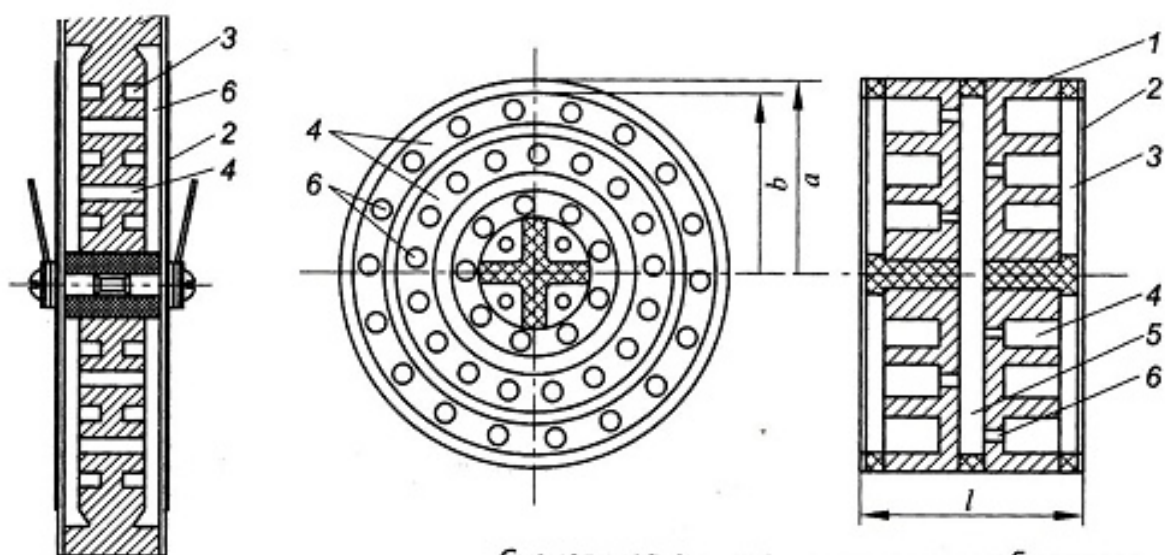
подмембранные зазоры обеих мембран. В таких микрофонах существует возможность управлять характеристикой направленности. При подаче поляризирующего напряжения на обе мембраны получается как бы два кардиоидных микрофона, оси которых развернуты под углом 180 град, выходное напряжение с первого микрофона равно $U_1 = U_0(1 + \cos \vartheta)/2$, а выходное напряжение со второго микрофона сдвинуто на 180 град и равно $U_2 = U_0(1 + \cos(\vartheta + 180 \text{ град}))/2$. Складывая напряжения с двух микрофонов, можно получить "ненаправленную" характеристику, вычитая — "восьмерку", а меняя соотношение напряжений можно получить другие виды характеристик направленности: кардиоиду, гиперкардиоиду и т. д.



Технически это осуществляется с помощью подачи поляризующего напряжения на потенциометр, который и является регулятором подаваемого напряжения (рис. 6): неподвижный электрод подключается через резистор к середине потенциометра, левая мембрана — к положительному полюсу источника питания, правая подключается в различных точках: при подключении в правой точке (Omni) получается

круговая характеристика, в средней точке (Cardioid) — кардиоидная (мембрана имеет тот же потенциал, что и неподвижный электрод, и, следовательно, не является электрически активной), при подключении в левой точке (Figure 8) характеристика направленности имеет вид восьмерки. На корпусах современных микрофонов обычно указываются виды характеристик направленности, выбираемые с помощью переключения.

Кроме конструкции капсюля с отдельным стоком воздуха из подмембранного объема, приведенной на рис. 6, в современных микрофонах используются конструкции с совмещенным стоком, позволяющим реализовать лучшие параметры (рис. 7).



Двухмембранный капсюль с отдельным стоком

Схематическая конструкция двухмембранного капсюля с совмещенным стоком: 1 — неподвижные электроды, 2 — мембраны, 3 — подмембранный зазор, 4 — подмембранные полости в виде концентрических пазов, 5 — межэлектродный зазор (щель), 6 — отверстия, соединяющие объем 4 с щелью 5

В общем случае характеристика направленности микрофонов может быть записана в виде:

$$G(\alpha) = \frac{1}{1+A} (1 + A \cos \alpha).$$

При разных значениях коэффициента "А" получаются разные формы характеристики направленности:

$A=0$, $\Gamma(\alpha)=1$ — круг,

$A=1$, $\Gamma(\alpha)=1/2(1+\cos\alpha)$ — кардиоида,

$A=1,7$ — суперкардиоида,

$A=3$ — гиперкардиоида,

$A \rightarrow \infty$, $\Gamma(\alpha)=\cos\alpha$ — восьмерка.

Односторонненаправленные микрофоны находят очень широкое применение для записи музыки и речи в различной окружающей обстановке, особенно при наличии шумов и помех, а также в системах звукоусиления.

Другие характеристики

Кроме перечисленных свойств микрофонов можно указать еще несколько характеристик, связанных с их направленностью.

Чувствительность к окружающим звукам (ambient sound rejection) — односторонненаправленные микрофоны менее чувствительны к окружающим шумам и звукам, чем ненаправленные микрофоны, в силу особенностей их характеристики направленности, поскольку они имеют меньшую чувствительность для задних и боковых направлений прихода звуковой волны (поэтому их предпочтительнее использовать в системах звукоусиления для уменьшения вероятности возникновения обратной связи). Для оценки этих свойств используется величина "чувствительность к окружающему шуму" по отношению к ненаправленному микрофону: если у ненаправленного микрофона ее принять за 100%,

то у микрофонов с кардиоидной характеристикой направленностью она равна 33%, для других типов ее значения даны в таблице 1.

Коэффициент расстояния (distance factor) — поскольку направленные микрофоны "схватывают" меньше окружающего шума, чем ненаправленные, они могут использоваться на больших расстояниях от источника звука, сохраняя при этом баланс между прямым звуком и отраженным. Например, кардиоидный микрофон может быть отодвинут на расстояние в 1,7 раза большее, чем ненаправленный, при сохранении того же баланса. Значения этих расстояний относительно ненаправленного микрофона для микрофонов с разными типами характеристики направленности даны в таблице 1.

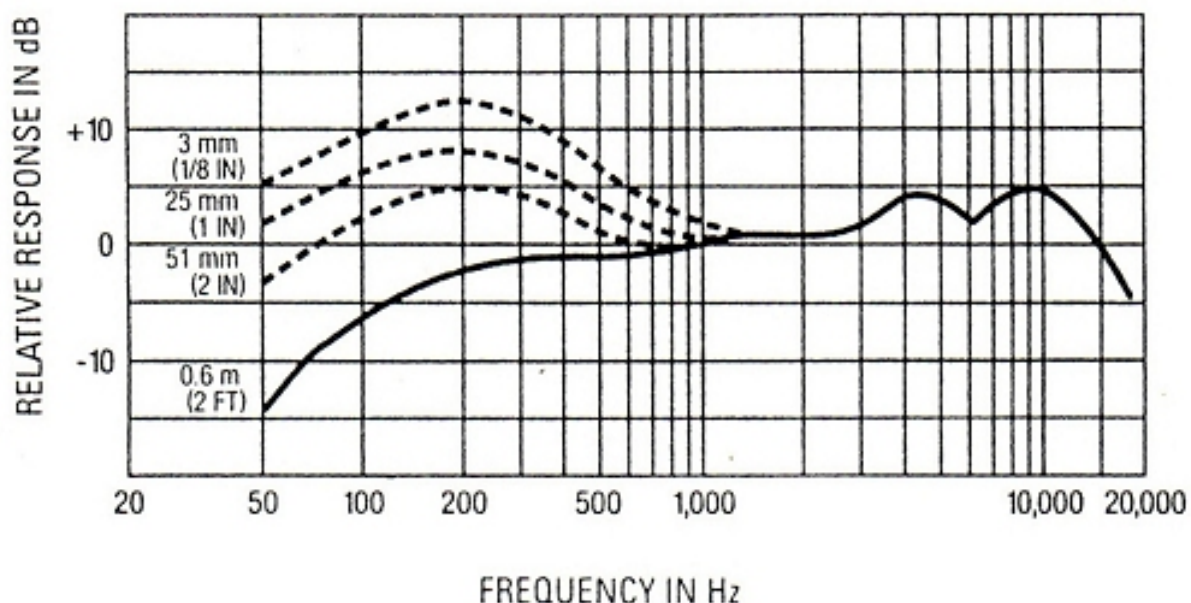
Угол максимального подавления (angle of maximum rejection) — угол, в направлении которого микрофон наименее чувствителен к окружающему звуку. Например, для кардиоидного микрофона этот угол 180 град, для других типов углы даны в таблице 1. Значения этих углов полезно учитывать при расстановке микрофонов и излучателей для минимизации обратной связи.

В таблице 1 приведен еще один параметр — *отношение фронт-тыл* (rear rejection), который представляет собой отношение чувствительности при угле падения 0 град к чувствительности при угле падения 180 град, выраженной в дБ.

Характеристика направленности	круг	кардиоида	суперкардиоида	гиперкардиоида	восьмерка
Угол покрытия	360 ⁰	131 ⁰	115 ⁰	105 ⁰	90 ⁰
Угол максимального подавления	-	180 ⁰	126 ⁰	110 ⁰	90 ⁰
Отношение фронт-тыл	0	∞	12 дБ	6 дБ	0
Чувствительность к окружающим шумам	100%	33%	27%	25%	33%
Фактор расстояния	1	1,7	1,9	2	1,7
Индекс осевой концентрации DI	0 дБ	4,8 дБ	5,7 дБ	6 дБ	4,8 дБ

Направленные микрофоны обладают еще одним свойством — зависимостью уровня чувствительности от расстояния до источника, особенно на низких частотах. Это свойство называется *"эффектом близости"* (proximity effect). Этот эффект объясняется тем, что на близком расстоянии (то есть когда расстояние до источника меньше длины волны) микрофон находится в "ближней зоне", то есть в зоне распространения сферической волны. В сферической волне звуковое давление изменяется с расстоянием ($p \sim 1/r$), поэтому разность давлений, которые действуют на переднюю часть мембраны и на ее тыльную часть, увеличивается за счет дополнительного уменьшения давления, возникающего в сферической волне с увеличением расстояния. Поэтому чувствительность направленного микрофона на низких частотах возрастает. По мере повышения частоты длина волны становится меньше, и расстояние, на котором находится микрофон, начинает превышать длину волны, так что этот эффект перестает сказываться. Форма частотной характеристики направленного

микрофона при разных расстояниях до источника показана на рис. 8.



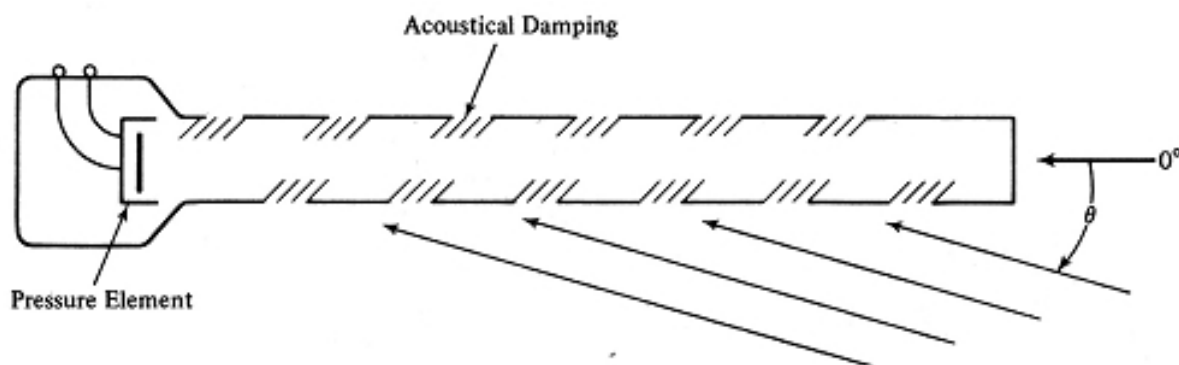
При использовании направленных микрофонов на малых расстояниях необходимо учитывать подъем частотной характеристики на низких частотах (вводя необходимую коррекцию). Ненаправленные микрофоны не имеют этого эффекта, их форма частотной характеристики от расстояния не зависит, поэтому тембр голоса солиста или музыкального инструмента практически не меняется с изменением расстояния.

Анализ чувствительности одномембранных и двумембранных микрофонов к изменению расстояния до источника звука, выполненный на фирме Neumann, показал следующие результаты: в среднем поле (при измерении на расстоянии 1,25 м) существенных различий в форме частотной характеристики и других параметров у микрофонов с одиночными и двойными мембранами нет, но в дальнем (на расстоянии 5 м) и ближнем поле (на расстоянии 0,05 м) эти различия становятся

существенными. В дальнем поле у микрофонов с двойными диафрагмами имеет место подъем чувствительности на низких частотах и расширение диаграммы направленности до широкой кардиоиды, а это означает, что в дальнем диффузном поле такие микрофоны "схватывают" больше басов, что может привести к подчеркиванию низкочастотной части реверберации (если в этом нет необходимости при записи, то лучше выбрать микрофоны с одиночными мембранами, что дает более сухой звук). В ближнем поле, наоборот, подъем частотной характеристики за счет "эффекта близости" у микрофонов с двойными диафрагмами меньше, поэтому они часто предпочитают для записи речи и вокала.

Остронаправленные микрофоны

Микрофоны типа *shotgun* обычно состоят из односторонненаправленного капсюля, нагруженного на трубку с отверстиями (или прорезями), закрытыми тканью (рис. 9).



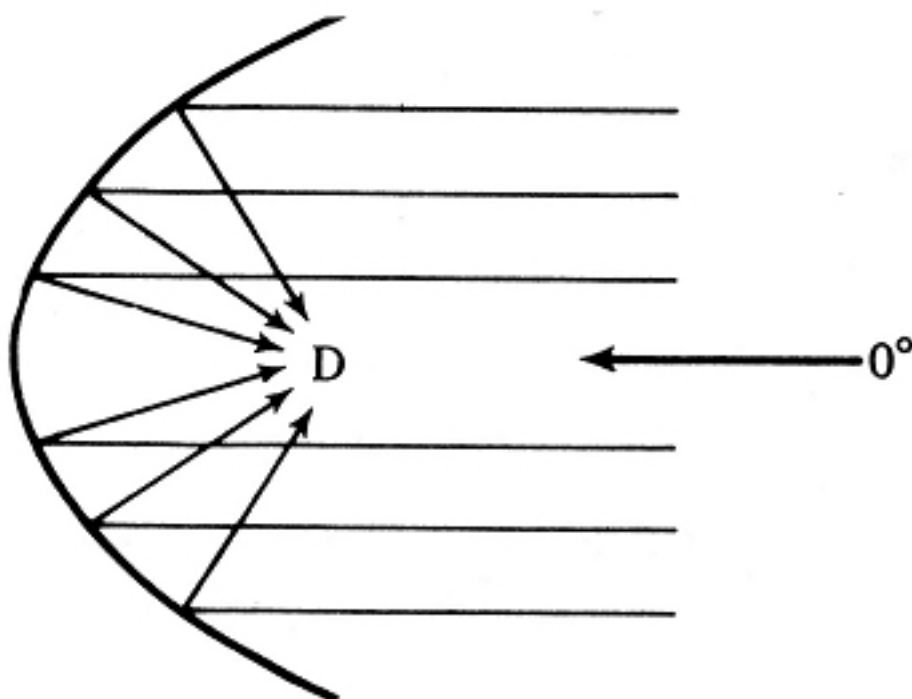
Трубка представляет собой своего рода линию задержки, так как при падении звуковых волн под углом α к оси микрофона они достигают мембраны с разными сдвигами фаз:

$\Delta \varphi = \omega d_i(1 - \cos \alpha) / c$, где d_i — расстояние от начала трубки до отверстия i , c — скорость звука, ω — круговая частота. При этом из-за интерференции звуковых волн на поверхности мембраны происходит частичное или полное их гашение (в зависимости от угла падения), и давление на поверхности мембраны уменьшается. Ткань на отверстиях трубки является дополнительным акустическим сопротивлением, которое возрастает по мере приближения к капсулю микрофона. В некоторых конструкциях используют постепенное уменьшение диаметра отверстий. Существенное обострение характеристики направленности начинается с частот, где длина трубки больше половины длины волны $L > \lambda/2$. Общий вид такого типа микрофона показан на рис. 10.



Параболический микрофон (parabolic microphone) представляет собой рефлектор параболической формы (как у телескопа), в фокусе которого находится микрофонный капсюль (ненаправленный или направленный), обращенный фронтальной стороной к рефлектору (рис. 11). Все звуковые лучи, падающие параллельно оси, концентрируются в фокусе. До фокуса они проходят равное расстояние, то есть попадают на мембрану в одинаковой фазе, следовательно, происходит суммирование звуковых давлений и усиление

сигнала. Звуковые волны, приходящие под углом к оси, рассеиваются и не попадают на микрофон. На низких частотах ($ka > 0,5$, где $k = \omega/c$, a — радиус рефлектора) рефлектор практически не отражает и усиления на оси не происходит, на более высоких частотах ($0,5 < ka < 3$) усиление растет примерно с крутизной 6 дБ/окт и микрофон становится остронаправленным. Реальные размеры рефлектора — от 0,3 до 1 м, поэтому на низких частотах (примерно до 200 Гц) он практически не эффективен. Такие микрофоны (в силу своей громоздкости) используются редко — иногда в натурных съемках, для записи голосов птиц и т. п.



Часть 5. Стереосистемы микрофонов.

С момента появления звукозаписи и начала широкого использования ее в кино, на радио и телевидении одной из основных проблем была и

остаётся передача естественности тембров и пространственного ощущения звучания, которое возникает у слушателя, находящегося в первичном зале (концертном, театральном и др.).

Ощущение "пространственности" звучания в помещении складывается из "окруженности" слушателя звуком со всех сторон, формируемой за счет прихода прямого и отраженных звуков с разных направлений, соотношение уровней которых зависит от объема, формы, обработки стен помещения и др., а также из восприятия "протяженности" оркестра как единого звукового источника, которое зависит от степени коррелированности (близости) сигналов, приходящих на левое и правое ухо, уровня боковых отражений и др. Все это формирует "акустическую атмосферу" зала и помогает слушателю выделить интересующий его инструмент (это свойство называется "прозрачностью" звучания), а также оценить расположение отдельных инструментов по фронту и глубине.

Восприятие этой атмосферы происходит в первую очередь благодаря способности слуха к бинауральной локализации звуков в трехмерном пространстве: в горизонтальной плоскости (за счет оценки временной и интенсивностной разности сигналов), в вертикальной плоскости (за счет учета изменений спектральных составляющих звука из-за дифракции на голове и ушной раковине) и по глубине (за счет изменения уровня сигнала, изменения спектральных характеристик и оценки соотношений уровней прямого и отраженного

сигналов). Кроме того, оценка тембра, прозрачности, общей атмосферы зала происходит за счет сложных процессов в высших отделах слуховой системы по выделению звуковых потоков, формированию музыкальных образов и др. На первом этапе развития звукозаписи использовалась монофоническая запись, то есть запись производилась одним микрофоном, передавалась по одному каналу и воспроизводилась через один громкоговоритель. В этом случае не удавалось передать пространственные характеристики звука в первичном зале, поскольку прямые и отраженные звуки, записанные одним микрофоном, приходили к слушателю через один громкоговоритель, то есть из одной точки, а, как уже было сказано ранее, для возникновения ощущения пространственности необходимо, чтобы отраженные звуки поступали с разных направлений к слушателю (от боковых стен, потолка и др.), именно это и дает возможность оценить "протяженность" источника и "окружение" звуком. При этом также утрачивалась "прозрачность" звучания, то есть делимость инструментов. Попытки улучшить качество монофонических систем проводились на протяжении длительного времени, предлагались системы моноамбиофонические, псевдостереофонические и др., в которых запись производилась с помощью нескольких микрофонов, воспроизведение происходило через систему распределенных громкоговорителей и т. д., но поскольку передача сигнала шла через один канал,

принципиального улучшения в передаче пространственной информации не происходило. В 30-40-годы начались первые эксперименты по созданию систем *стереозвука* (Harvey Fletcher, фирма Bell Labs, США), что было существенным шагом вперед в процессе передачи пространственных ощущений в записи, поскольку позволяло записать звук с помощью двух микрофонов, передать его по двум каналам связи и воспроизвести через два громкоговорителя. Это в значительно большей степени передавало ощущение пространственности, прозрачности и естественности звучания, при этом источники звука могли быть локализованы как по фронту на линии, соединяющей громкоговорители, так и по глубине (за счет передачи информации о реверберационном процессе в помещении). Субъективные экспертизы показали значительную предпочтительность слушателями качества звучания при стереофонических передачах по сравнению с монофоническими.

Впервые идея использовать специальную систему из двух совмещенных микрофонов для записи стереосигналов была предложена в 1931 году Аланом Блумляйном (Alan Blumlein), одновременно с этим на фирме Bell Laboratory была разработана система разнесенных микрофонов (Harvey Fletcher), с помощью которой были сделаны первые экспериментальные записи филладельфийского оркестра.

С середины 80-х годов XX века, когда стал активно внедряться цифровой звук, появились новые

возможности в передаче пространственности звучания. В настоящее время активно развиваются такие системы записи, передачи и воспроизведения звука как Dolby Digital, Binaural, Ambiphonic, Wave Field и др. Соответственно, для обеспечения многоканальной записи разрабатываются специальные микрофонные системы для пространственного звука, особенно много новых систем появилось за последние годы. Большинство промышленно выпускаемых в настоящее время микрофонных стереосистем можно разделить на следующие группы:

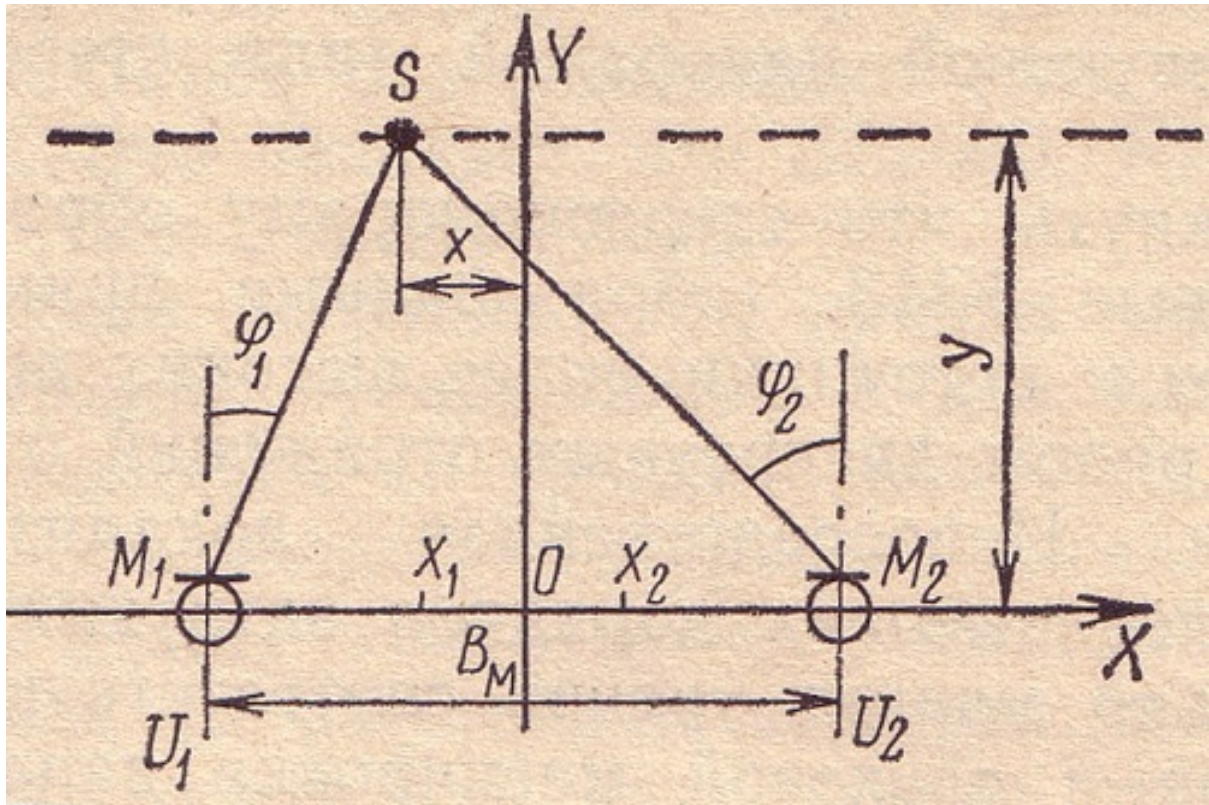
- отдельные стереосистемы (AB, DIN, NOS, ORTF, Baffled);
- совмещенные стереосистемы (XY, MS, Blumlein);
- "верхние" стереосистемы (Overhead);
- системы типа "искусственной головы" (Head related);
- бинауральные стереосистемы (Binaural).

Специальные микрофонные системы, созданные для пространственного звука, будут представлены во второй части этой статьи.

Отдельные микрофонные стереосистемы

AB. При записи с помощью такой системы по фронту перед исполнителями устанавливаются два (или несколько включенных на один канал) одинаковых по чувствительности и направленности микрофона на некотором расстоянии друг от друга, так чтобы каждый канал мог работать на свою зону. Акустические оси микрофонов могут быть параллельными или развернутыми. Микрофоны могут быть как ненаправленными, так и

направленными (например, две кардиоиды или две восьмерки). Общая схема записи показана на рис. 1. Пример промышленной реализации системы АВ показан на рис. 2. Поскольку основное влияние на локализацию при такой записи оказывает сдвиг по времени между звуковыми волнами от различных источников (так как при ненаправленных микрофонах разница по интенсивности будет только из-за разницы расстояний между левым и правым микрофоном до источника, и она не очень значительна, особенно на низких частотах), то систему относят к "временной стереофонии", хотя, если применять направленные микрофоны, то можно получить и более значительную разность по интенсивности, что сделает локализацию более отчетливой. Преимущества такой микрофонной системы заключаются в том, что она достаточно хорошо передает пространственную панораму в звукозаписи.



Однако, как показали экспериментальные исследования системы АВ, она обладает определенными недостатками, а именно: не точно

передает информацию о позиции первичного источника звука при его перемещении и о скорости его движения. При движении реального источника звука (например, солиста вдоль сцены) аналогичное перемещение мнимого источника во вторичном помещении наблюдается только в достаточно узкой зоне. При увеличении отношения расстояния до микрофонов от источника (Y) к ширине базы между микрофонами (BM) искажения будут возрастать (например, когда $Y/BM=1$ искажения составят 50%, то есть мнимый источник будет проходить только половину пути вместе с реальным источником, а затем окажется локализованным в правом (или левом) громкоговорителе, хотя реальный источник будет продолжать двигаться). При этом будет происходить и искажение скорости движения реального источника. Результаты измерений показывают, что для расширения зоны правильной передачи движения звукового источника надо уменьшить отношение Y/BM , например, при $Y/BM=0,1$ правильность передачи движения будет составлять 75% пути. Однако возможности таких изменений ограничены, поскольку при уменьшении расстояния между микрофонами и источником (Y) возрастают искажения по глубине; при использовании ненаправленных микрофонов они меньше, чем при применении направленных микрофонов (кардиоидных или с характеристикой направленности "восьмерка"), но у двух последних повышается уровень низких частот за счет "эффекта близости". При этом искажения по глубине увеличиваются при движении источника от

краев к центру (то есть центральные источники кажутся более удаленными). Кроме того, поворот микрофонов в системе АВ друг от друга также приводит к увеличению искажений по глубине, но при этом расширяется зона правильной передачи фронтального движения источника. Увеличение расстояния между микрофонами (ВМ) может приводить к нарушению музыкального баланса, то есть преувеличению громкости боковых источников и ослаблению центральных (провал середины, например, он имеет место при расстоянии между микрофонами больше 1 м, что на практике для двух микрофонов не используется, обычно применяемое расстояние 50-60 см). С уменьшением расстояния между микрофонами угол охвата расширяется, однако при приближении микрофонов на расстояние меньше 40 см стереоэффект практически исчезает. Выбор параметров системы АВ (расстояния между микрофонами, характеристик направленности и угловой ориентации, расстояния до источника звука и др.) — задача неоднозначная, зависит от особенностей ансамбля, жанра произведения и др. По совокупности искажений по фронту и глубине лучшим в системе АВ считается вариант с кардиоидными микрофонами. Изменяя значения Y/V ВМ, в зависимости от поставленной творческой задачи можно подчеркнуть фронтальное или глубинное положение источника звука или усилить пространственность звучания. Следует отметить, что в случае использования системы АВ возникают проблемы при

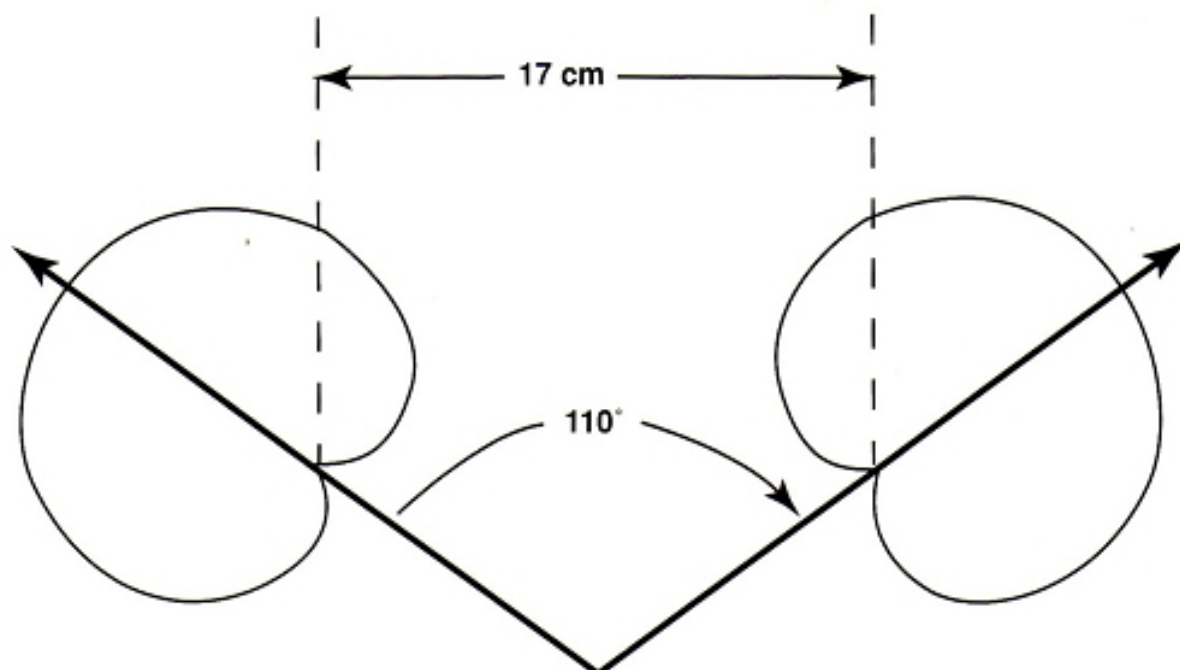
необходимости совмещения записи в одну монофоническую фонограмму — из-за наличия временных сдвигов между канальными сигналами при совмещении появляются интерференционные искажения. Стереосистемы АВ используются, в основном, для передачи ощущения пространства (за счет натуральных реверберационных процессов в помещении). Для точной локализации отдельных источников внутри ансамбля система АВ менее полезна. Обычно система АВ используется с дополнительными центральными или совмещенными стереомикрофонами (например, типа XY и MS).

В практике звукозаписи используется также особая группа отдельных микрофонных стереосистем, в которых микрофоны размещены на близком расстоянии друг от друга (17-20 см), примерно равном диаметру головы. С одной стороны, это сохраняет "воздух", делает более открытым звук, с другой — обеспечивает лучшую совместимость с моно, так как разность фаз (то есть разница по времени прихода сигнала на каждый микрофон) незначительна и существенно сказывается только на высоких частотах.

К числу наиболее распространенных систем такого типа относятся ORTF, DIN, NOS и Baffle.

ORTF (Office de Radiodiffusion Television Francaise — французское национальное агентство по радиовещанию) использует два кардиоидных микрофона, разнесенных на 17 см под углом 110 град между капсулями (рис. 3). Размещение микрофонов соответствует расстоянию между

ушами, а угол моделирует теневой эффект человеческой головы. Поскольку здесь используется как различие между сигналами по интенсивности, так и по времени (последнее становится существенным на частотах выше 1000 Гц), эта техника создает четкий стереообраз, хорошую локализацию источников, обеспечивает угол охвата 95 град, сохраняет ощущение "открытости" и др., поэтому она широко используется в практике звукозаписи.

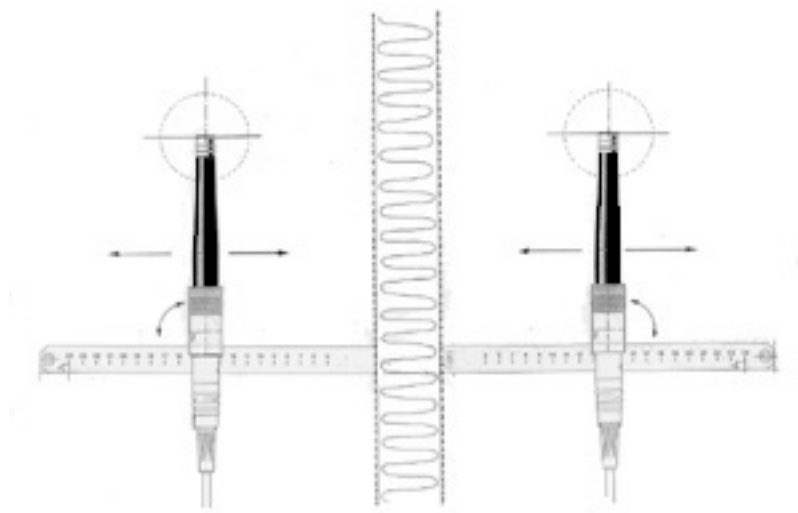


DIN (Deutsche Institute für Normung — немецкий институт стандартизации) также является разновидностью системы АВ. Стереобраз создают два кардиоидных микрофона, размещенных под углом 90 град на расстоянии 20 см. Система создает временной и интенсивностно-разностный стереосигнал, обеспечивает угол охвата порядка 115 град, она полезна для записи на близких расстояниях, например, пианино, малых ансамблей и др.

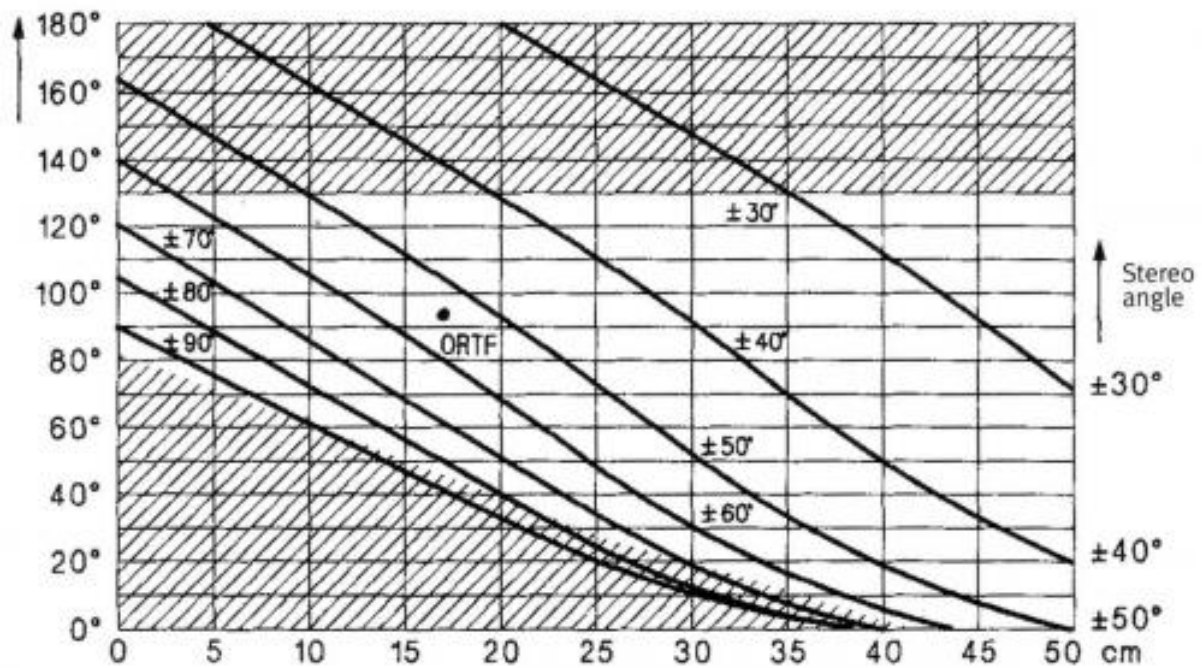
NOS (Nederlandsche Omroep Stichting — радио Нидерландов) использует два кардиоидных микрофона, размещенных под углом 90 град на расстоянии 30 см друг от друга. Стереобраз также создается с помощью комбинации интенсивностной и временной стереофонии (поскольку здесь больше расстояние между микрофонами, чем у ORTF, разница по времени начинает сказываться уже с 250 Гц, что создает проблемы при необходимости совмещения с монопередачей). Эта техника используется, в основном, на близких расстояниях для записи малых ансамблей (угол охвата меньше 80 град).

Baffle (стерео с экраном) — разнесенная микрофонная стереотехника, использующая акустический поглощающий экран. Экран размещается между двумя микрофонами в разнесенных стереосистемах, например, типа ORTF. Поглощающий эффект экрана оказывает положительное влияние на затухание звука от источников вне оси и улучшает разделение каналов. Одна из широкоизвестных экранированных стереосистем Jecklin Disk (по имени ее изобретателя — Jurg Jecklin) использует два ненаправленных микрофона, размещенных на расстоянии 16,5 см, и специальный акустически обработанный диск диаметром 28 см, размещенный между ними (рис. 4). Реальные преимущества такой системы проявляются при ее установке на относительно большом расстоянии от источника, где имеется баланс между прямыми и отраженными сигналами в помещении, которые хорошо

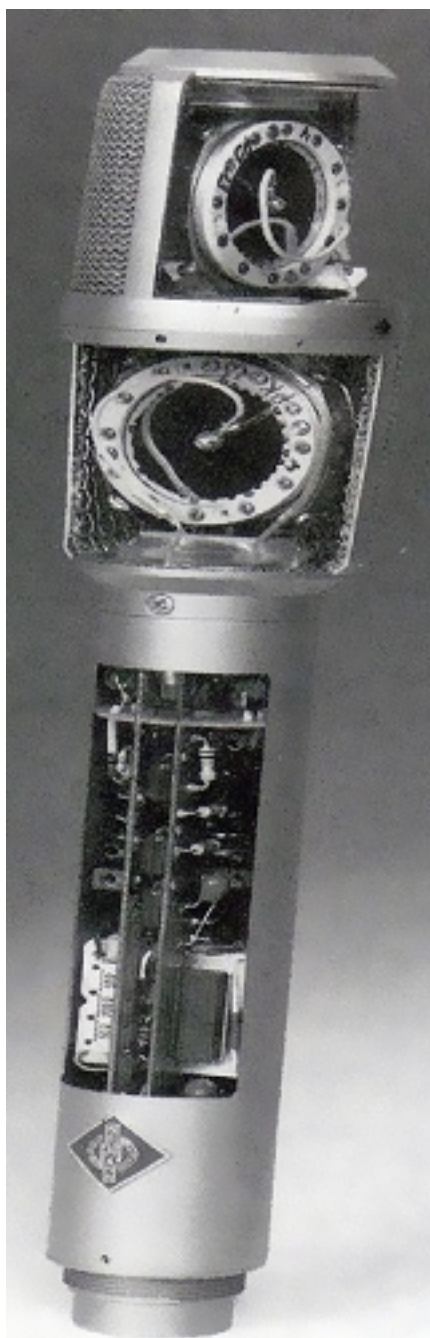
"схватываются" ненаправленными микрофонами, что особенно ценно в "сухих" помещениях с малым временем реверберации.



Попытки найти оптимальные соотношения между расстояниями и углами установки микрофонов продолжают все время. Обобщая полученные результаты таких работ, Michael Williams построил полезную номограмму (рис. 5), позволяющую установить связь расстояния и угла между микрофонами и эффективного угла охвата источников при записи (угол охвата является параметром кривых).



Совмещенные микрофонные стереосистемы

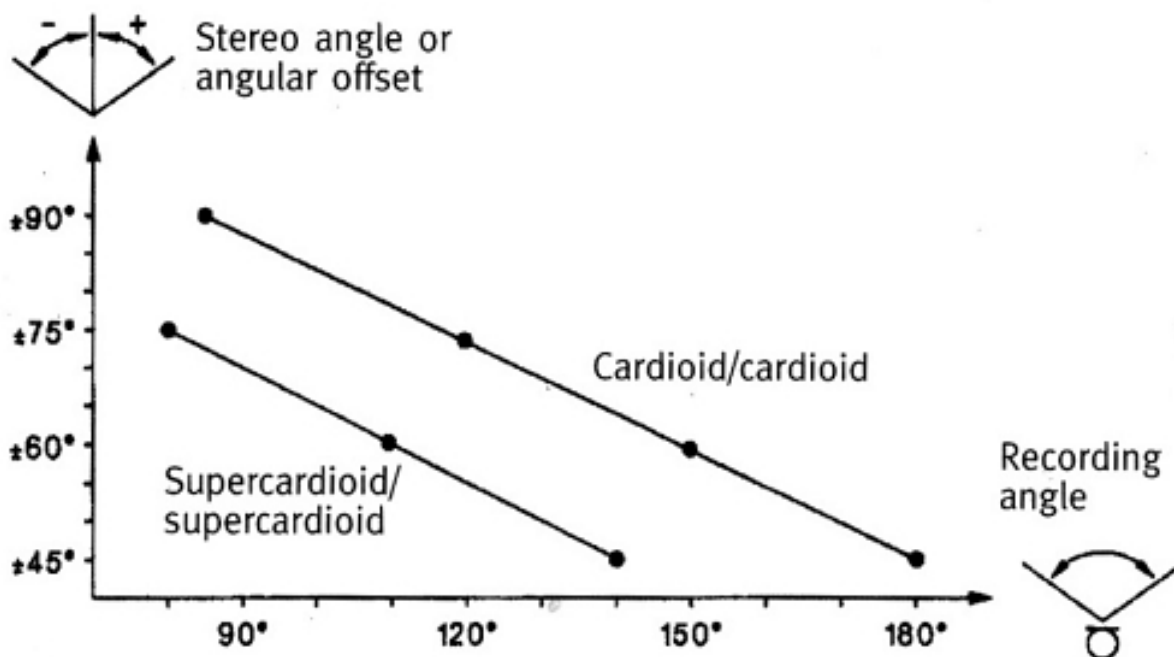
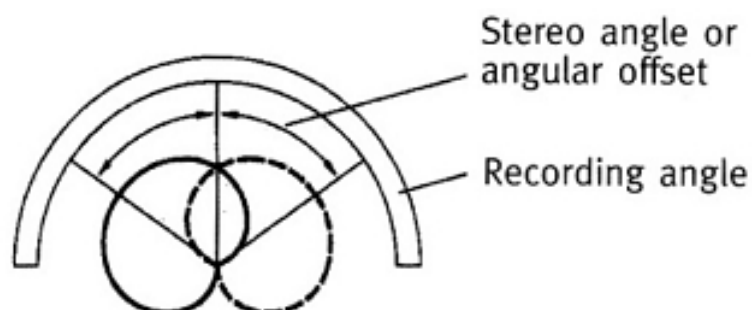


Эта техника стереозаписи предполагает использование двух направленных микрофонов, расположенных в одной точке (практически они устанавливаются друг над другом, пример конструкции показан на рис. 6). Ширина стереообраза зависит от формы характеристик направленности микрофонов, их угла разворота и выбора места установки. В этих системах используется только интенсивностная разность

сигналов в каналах, временные (фазовые) различия в них отсутствуют, поскольку расстояния от источника звука до обоих микрофонов одинаковы. Некоторые специалисты считают, что такая техника не обеспечивает достаточной пространственности, но дает четкий и сухой звук. Наиболее известные системы такого типа: XY, MS и Blumlein.

XY. В этой системе используются два направленных микрофона (две кардиоиды, две суперкардиоиды или две восьмерки), установленные на одной оси. Акустические оси микрофонов повернуты и образуют некоторый угол, чаще всего в пределах 60-130 град, в зависимости от размеров звукового источника и расположения микрофонной пары. Пример конструкции стереомикрофона фирмы Neumann показан на рис. 6. Стереофонический эффект возникает здесь за счет разностей интенсивностей сигналов от источника (так называемая "интенсивностная" стереофония). Система XY дает правильное соответствие мнимого и реального источников, если он находится в определенных угловых пределах. Связь между углом разворота микрофонов (стереоуглом) и углом охвата при записи показана на рис. 7 для кардиоидных и суперкардиоидных микрофонов. Благодаря отсутствию в сигналах левого и правого каналов временных сдвигов, система XY обладает хорошей совместимостью с монофонической системой. В этой системе должны выполняться жесткие требования к остроте и идентичности характеристик направленности микрофонов (иначе

не удастся получить разность по интенсивности), кроме того, у направленных микрофонов проявляется "эффект близости" при приближении к источнику. Поэтому часто используются более направленные микрофоны (супер- или гиперкардиоидные), поскольку их можно установить на большем удалении при сохранении отношения сигнал/шум. В этом случае "эффект близости" проявляется меньше, но и угол охвата у них будет меньше.

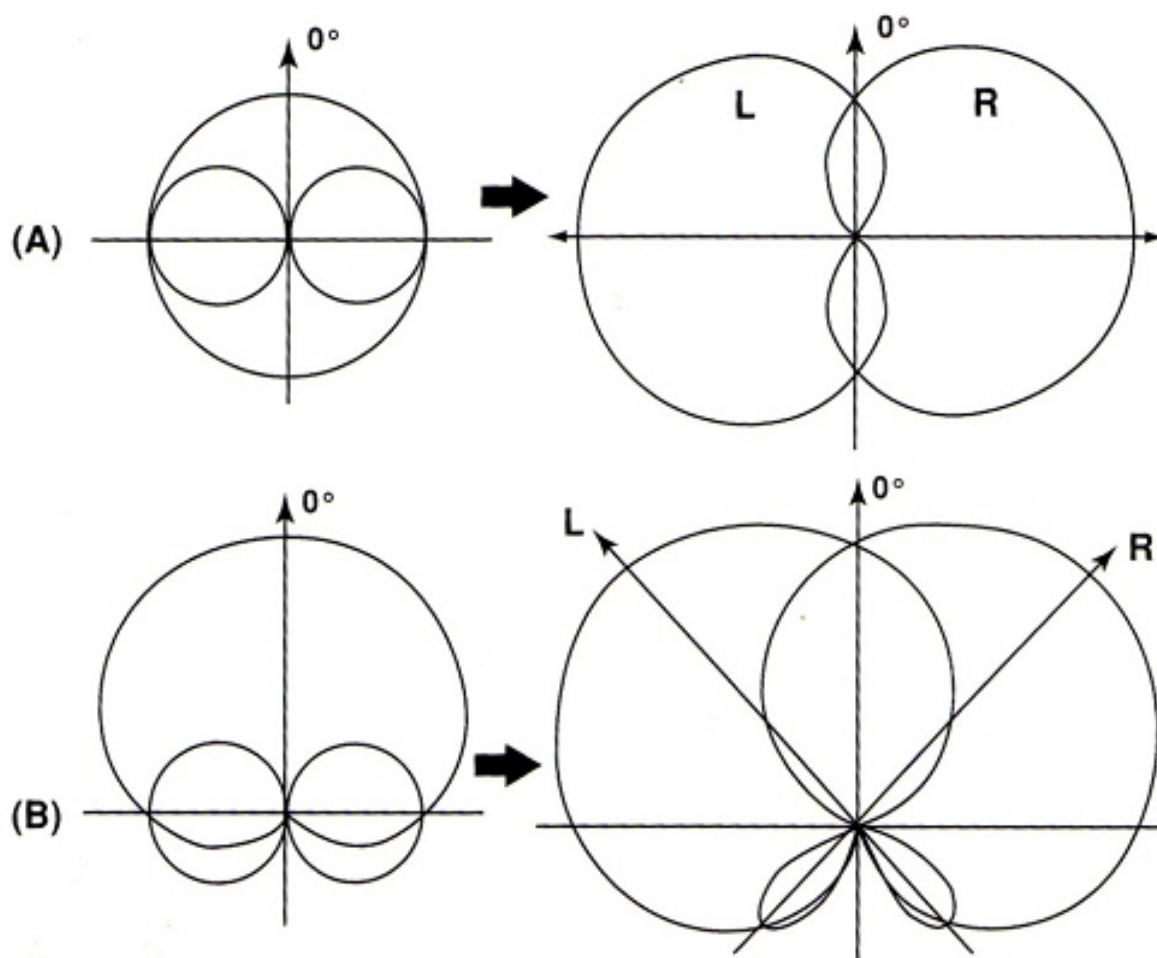


Однако при использовании этой системы также возникают искажения пространственной панорамы

по глубине и по фронту (они будут рассмотрены совместно со следующей системой — MS).

MS. Эта система также содержит два совмещенных микрофона в одной точке, но с различающимися характеристиками направленности, сигналы которых подвергаются суммарно-разностному преобразованию. Обычно используются два совмещенных микрофона с характеристиками направленности круг-восьмерка или кардиоида-восьмерка (рис. 8). Название системы образовано первыми буквами слов Mittel (середина) и Seite (сторона). Напряжение на выходе микрофона М будет неизменным (если выбран ненаправленный микрофон) при любом положении источника, а напряжение с микрофона S определяется формой его характеристики направленности (восьмерки): при положении источника слева или справа оно будет максимальным, при положении в центре равно нулю. Поэтому при расположении источника под углом $+90$ град выходное напряжение будет равно сумме напряжений с микрофонов М и S, при положении источника под углом 0 град оно будет равно только напряжению с М-микрофона, а при положении -90 град оно равно разности напряжений с М- и S-микрофонов. В результате суммарно-разностного преобразования формируются сигналы в двух каналах передачи. Система MS требует введения в схему дополнительных узлов: суммарно-разностных преобразователей, стереорегуляторов направления и базы, но она имеет и ряд преимуществ перед системой XY, например, дает возможность легко

регулировать как общую ширину базы, так и ширину отдельных участков, занятых группами исполнителей. MS-техника обеспечивает точную локализацию источников внутри ансамбля и очень полезна для записи движущихся источников звука. Она обеспечивает хорошую моносовместимость и гибкость при микшировании.



Искажения по глубине в системах XY и MS больше, чем в системе AB, они уменьшаются при удалении от источника звука. В отличие от системы AB при смещении источника от центра к краям искажения возрастают (в системе AB происходит наоборот) — слушателю кажется, что по мере смещения реального источника от центра базы к краю сцены мнимый источник удаляется в глубину.

В системах XY и MS также возникают искажения в передаче фронтального движения источника (по протяженности фронта и скорости движения), они зависят от вида характеристик направленности микрофонов, от расстояния до источника (чем оно больше, тем больше сокращение фронта, но меньше искажения скорости движения). Поворот микрофонов к оси вызывает увеличение искажений фронтального типа. Пространственная реверберация в таких системах проявляется значительно меньше, чем в системе AB.

Поэтому довольно часто выбирается комбинированная система AB и XY или MS.

Blumlein — совмещенная стереотехника (разновидность XY-стереофонии), использующая два микрофона с характеристикой направленности типа "восьмерка", установленных в одной точке под углом 90 градусов. За пределами определенного угла охвата смещение реального источника не сопровождается соответствующим смещением мнимого источника. Эта техника в настоящее время используется редко.

Overhead (микрофоны над головой)

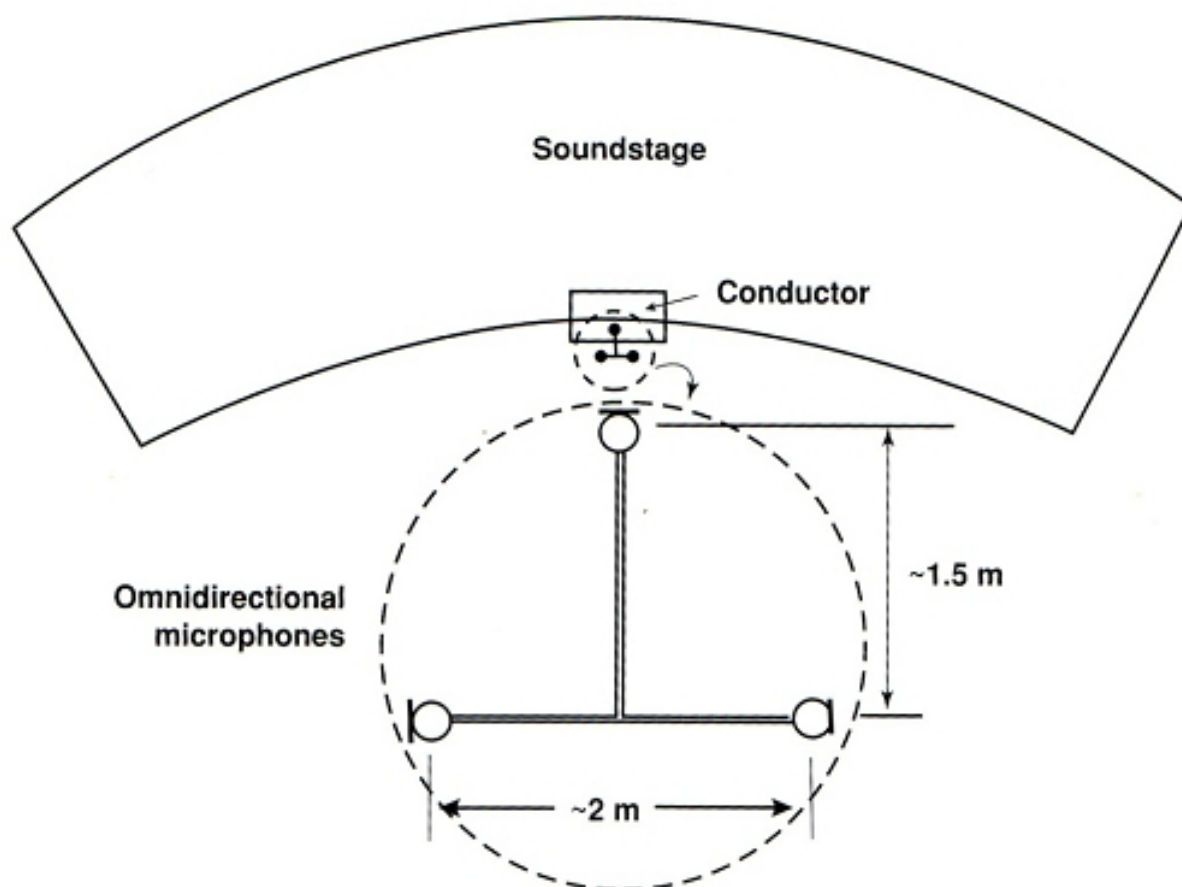
За счет размещения микрофона выше музыкальных инструментов на большом расстоянии часто оказывается возможным получить более натуральный тембр, так как звуки от разных индивидуальных инструментов достигают микрофонов с более реальным распределением по времени, чем при их близком расположении. Кроме того, имеется возможность записать при этом несколько первых отражений в помещении, что

больше соответствует естественному окружению инструментов.

Spaced Omni — ненаправленные микрофоны устанавливаются на стойках перед исполнителем на высоте 1,2-2,4 м, для улучшения пространственности их иногда поднимают на 3 м или выше. Эта техника дает глубину и хороший стереообраз, но может вносить фазовые искажения.

Decca Tree — эта техника была разработана на британской студии Decca Records в середине 50-х и до сих пор еще используется. Три ненаправленных микрофона размещаются на стойках на 3-3,7 м выше и слегка позади головы дирижера. Они наклонены приблизительно на 30 град вниз по направлению к оркестру и установлены под определенным углом друг к другу: один направлен в центр, два других — под 45 град от центра (рис. 9). Расстояние между стойками правого и левого микрофона приблизительно 2 м, центральный микрофон сдвинут на 1,5 м вперед. Кроме того, два дополнительных ненаправленных микрофона располагаются по краям оркестра, обычно немного сзади, чтобы записать реверберацию зала. Эта техника дает реалистичный стереообраз, обеспечивает хороший баланс между инструментами оркестра и позволяет записывать отдельно центральный канал, что полезно при микшировании в пространственных системах. В практике звукозаписи, особенно для кино, используются различные варианты конфигураций системы Decca Tree: варьируются расстояния

между микрофонами, используются различные варианты характеристик направленности микрофонов, применяются в качестве центрального микрофона стереопары XY или MS, что позволяет четко локализовать стереобраз и подчеркнуть пространственность.

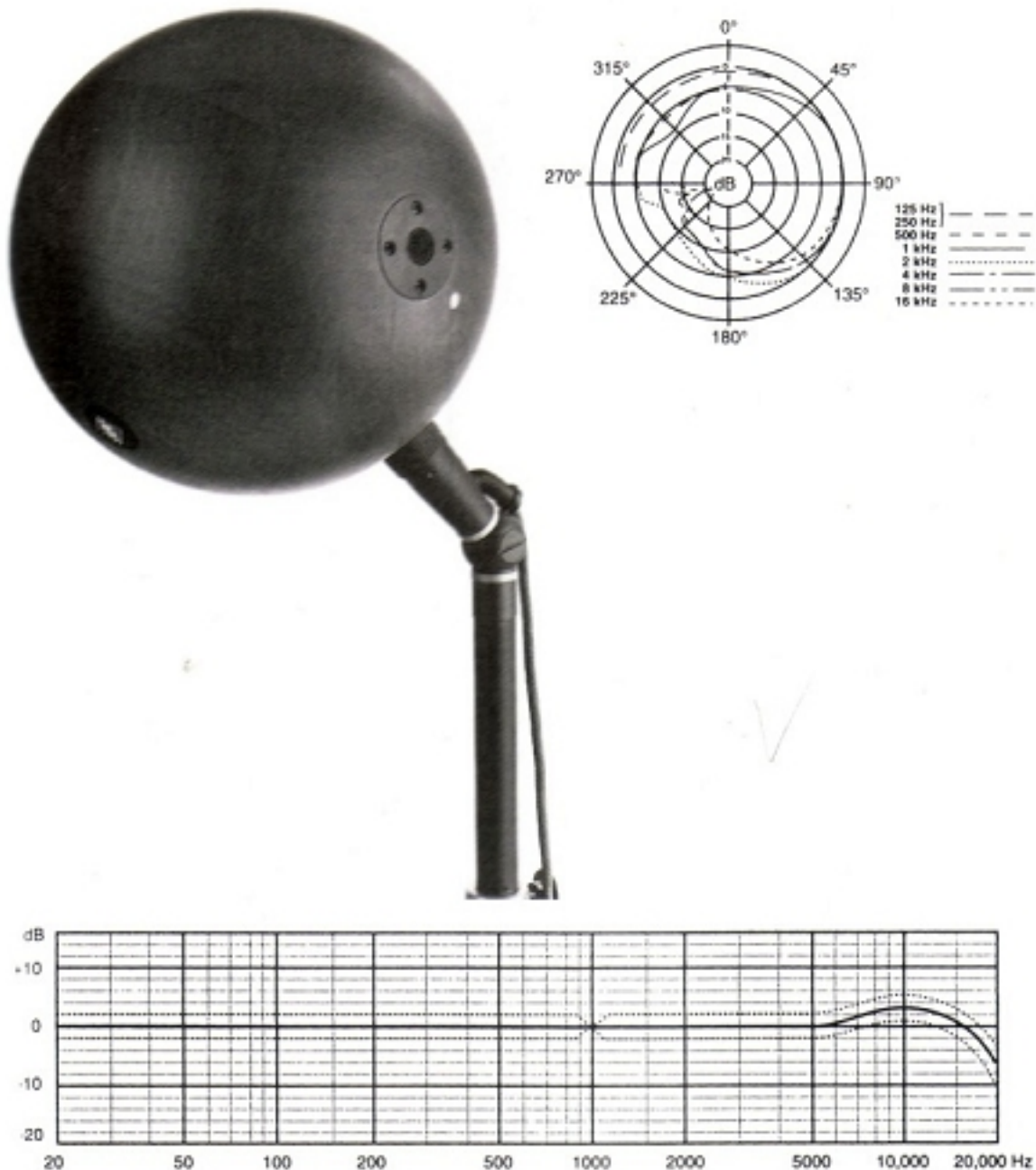


Стереосистемы типа "искусственная голова"

При естественном прослушивании разница по времени и по интенсивности двух сигналов, приходящих на левое и правое ухо, формируется за счет разнесенности приемников на расстояние, равное диаметру головы, а также за счет дифракции на голове и ушных раковинах (а также на торсе), что позволяет слуховой системе формировать пространственный звуковой образ. Поэтому уже на протяжении длительного времени

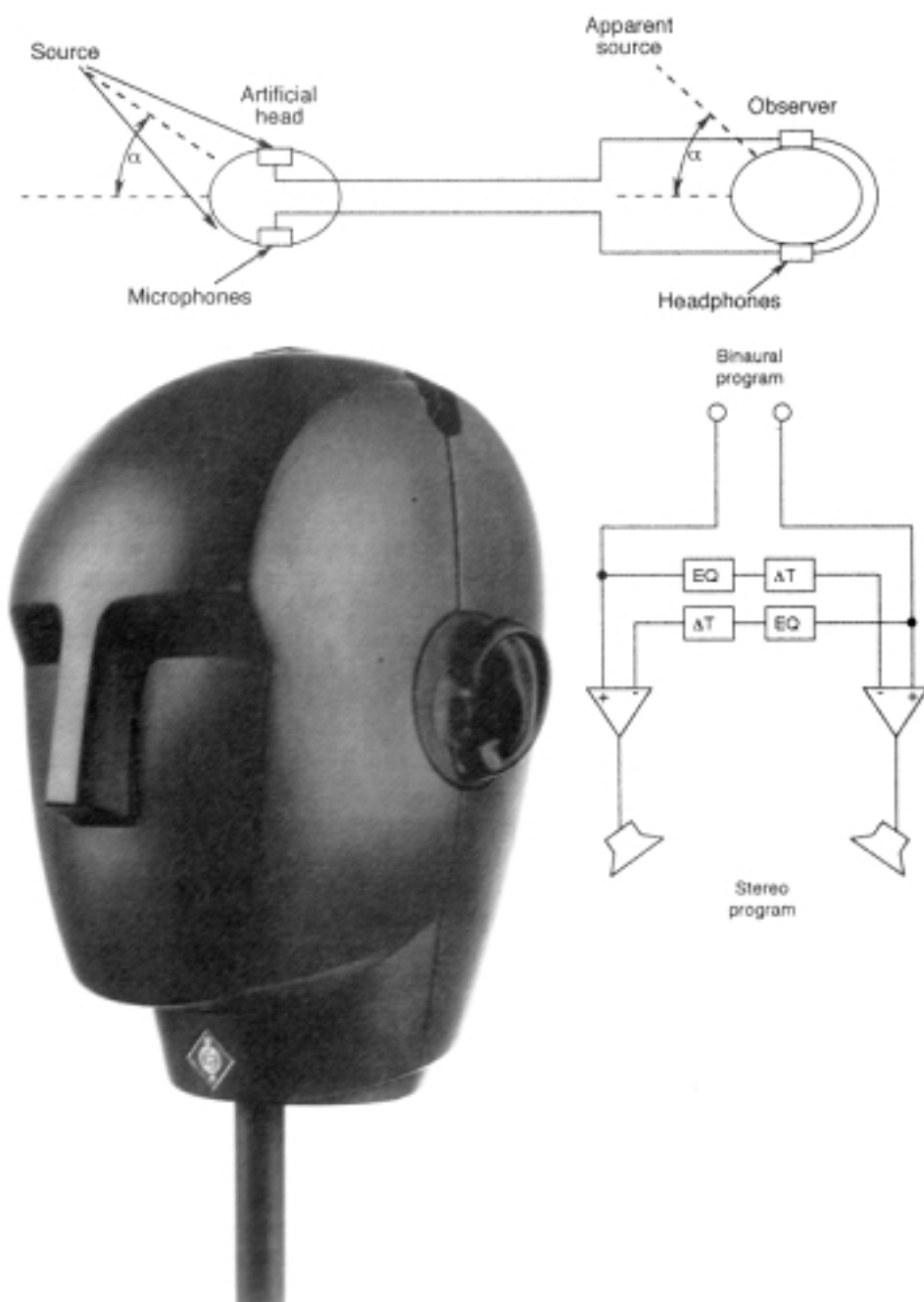
ведутся поиски микрофонных стереосистем, которые обеспечивали бы эти признаки похожим образом.

В 1991 году Guenther Theile предложил стереосистему, в которой два ненаправленных микрофона размещаются на твердой сфере диаметром 20 см, моделирующей акустическое поле вокруг человеческой головы. Диафрагмы микрофонов совмещены с поверхностью сферы. Геометрические размеры, используемые в этой технике (ее часто называют **Theile Sphere**), моделируют базовые пропорции человеческой головы, то есть междуушное время задержки. Пример конструкции такой микрофонной системы — Neumann KFM100, а также ее АЧХ (которая является равномерной, в отличие от искусственной или реальной головы) показаны на рис. 10. Аналогичную модель выпускает фирма Schoeps — KFM6U. Записи, сделанные с помощью этого устройства, звучат довольно реалистично в стереотелефонах, но имеют значительное окрашивание при воспроизведении через громкоговорители.



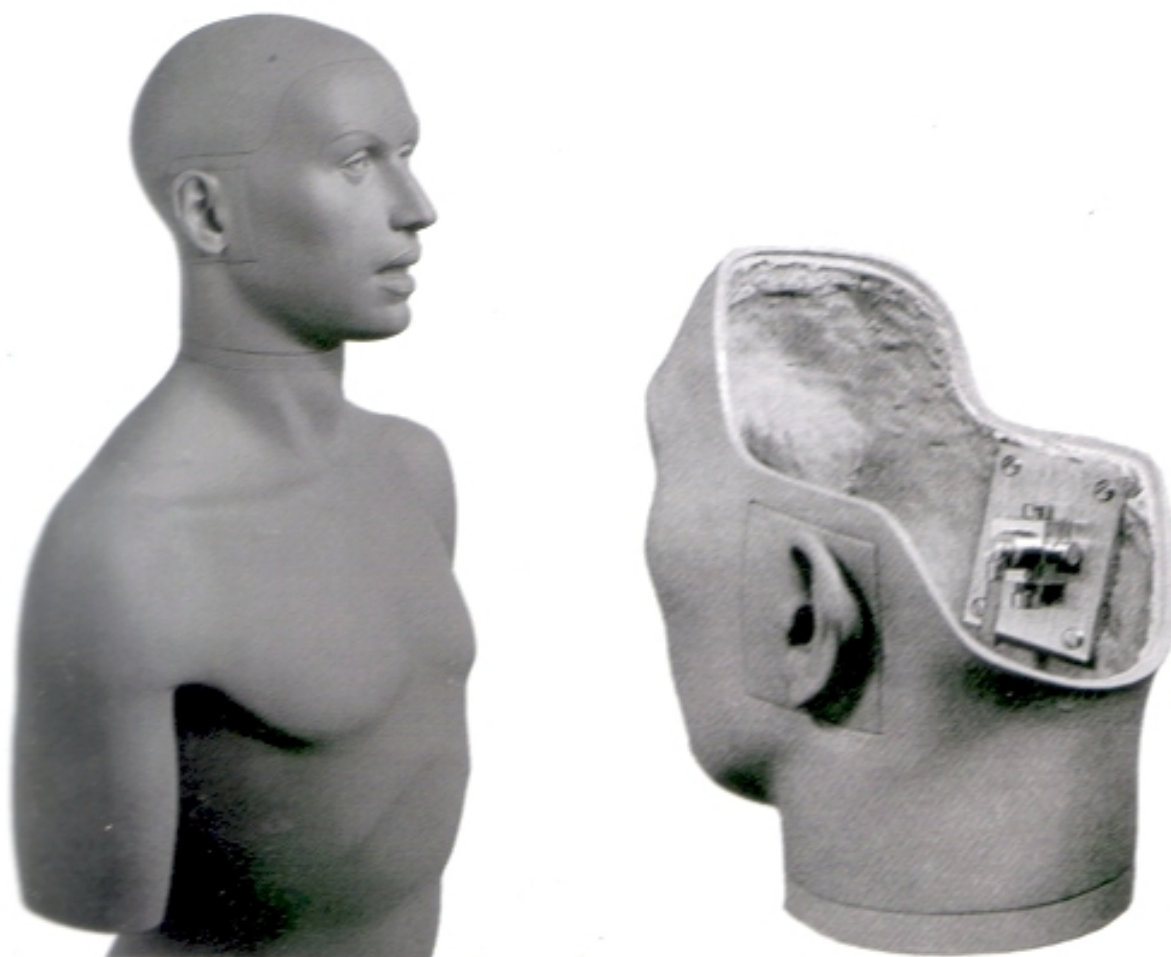
Кроме того, есть стереосистемы, в которых используется модель **искусственной головы (Dummy Head)** с микрофонами, расположенными внутри слуховых каналов (рис. 11а). В таком приборе довольно точно моделируется форма головы и ушных раковин, а физико-механические параметры материалов выбираются таким образом, чтобы моделировать костную проводимость. В этой системе звуковой сигнал поступает на мембрану

микрофона уже после обработки в раковине и слуховом канале, то есть он несет в себе закодированную информацию о пространственном положении источника, которую можно передать по двум каналам и воспроизвести через стереотелефоны. При этом слушатель получает достаточно точное пространственное ощущение первичного помещения. Однако необходимо, чтобы прослушивание происходило через стереотелефоны, при прослушивании через громкоговорители возникают перекрестные связи и пространственные ощущения разрушаются, для их восстановления необходимо использование специальных бифонических процессоров.



Искусственная голова — довольно сложное и дорогое устройство, которое производится только немногими фирмами, например: Neumann KU100, B&K 4128C, Head Acoustics Aachen Head, IRP KEMAR (рис. 11b). Каждая из этих моделей отличается определенными конструктивными особенностями, например, система 4128C дополнена моделью торса. Модель KU100 обладает следующими параметрами: частотный диапазон **20-20000** Гц,

чувствительность 20 мВ/Па, эквивалентный уровень звукового давления 16 дБ-А, максимальный уровень SPL при THD<0,5% равен 135 дБ, динамический диапазон 119 дБ.



Таким образом, все существующие стереосистемы микрофонов создаются с целью передачи в звукозаписи тембральной и пространственной информации максимально близко к естественному восприятию звука. Каждая из рассмотренных систем решает эту задачу с разной степенью приближения. Наилучшее приближение достигается при записи на искусственной голове, но здесь возникают проблемы при воспроизведении, так как для воссоздания пространственной информации требуется

прослушивание через стереотелефоны, при использовании громкоговорителей необходима дополнительная процессорная обработка. Однако следует отметить, что если запись с помощью микрофонных стереосистем пассивно фиксирует физические различия сигналов в стереоканалах, то слуховая система производит активную обработку информации в высших отделах коры, что позволяет ей отличать прямые звуки от отраженных, восстанавливать размеры помещения по отраженным звукам, производить локализацию по первому звуку (маскируя последующие, приходящие в течение 30-50 мс), выделять и распознавать отдельные источники в ансамбле и многое другое, что, естественно, ни одна микрофонная система сделать не может.

Часть 6. Системы микрофонов для пространственной звукозаписи.

Широкое внедрение в профессиональную и домашнюю звукотехнику различных пространственных систем звукопередачи (Dolby Surround 5.1, Dolby Pro-Logic, Dolby Digital, DTS, SDDS, WFS и др.) потребовало пересмотра требований к микрофонным системам. Главная цель всех surround-систем — это улучшенная передача пространственной атмосферы зала, недоступная для стереофонических систем. В связи с этим изменились требования к технологии микрофонной записи, в числе которых можно отметить следующие:

- точная запись прямого звука со сцены с сохранением натурального баланса и естественности звучания;
- запись достаточного количества ранних отражений от потолка и от припортальных боковых стен, приходящих в первые 25-60 мс, для передачи в последующем воспроизведении протяженности источника звука, интимности, ясности, разборчивости и других важных субъективных параметров музыкальных сигналов;
- запись реверберационного процесса и его некоррелированное представление во всех громкоговорителях воспроизводящей системы во вторичном помещении, что имеет принципиально важное значение для полноты звука, пространственности и др.

Для соответствия этим требованиям начали использоваться новые микрофонные системы, обеспечивающие формирование четырех и более каналов, которые затем кодируются в два канала и декодируются в 5.1 (или более) каналов воспроизведения.

Усовершенствование микрофонных систем шло по пути создания более сложных (по сравнению со стереофоническими) как *совмещенных*, так и *разнесенных* систем.

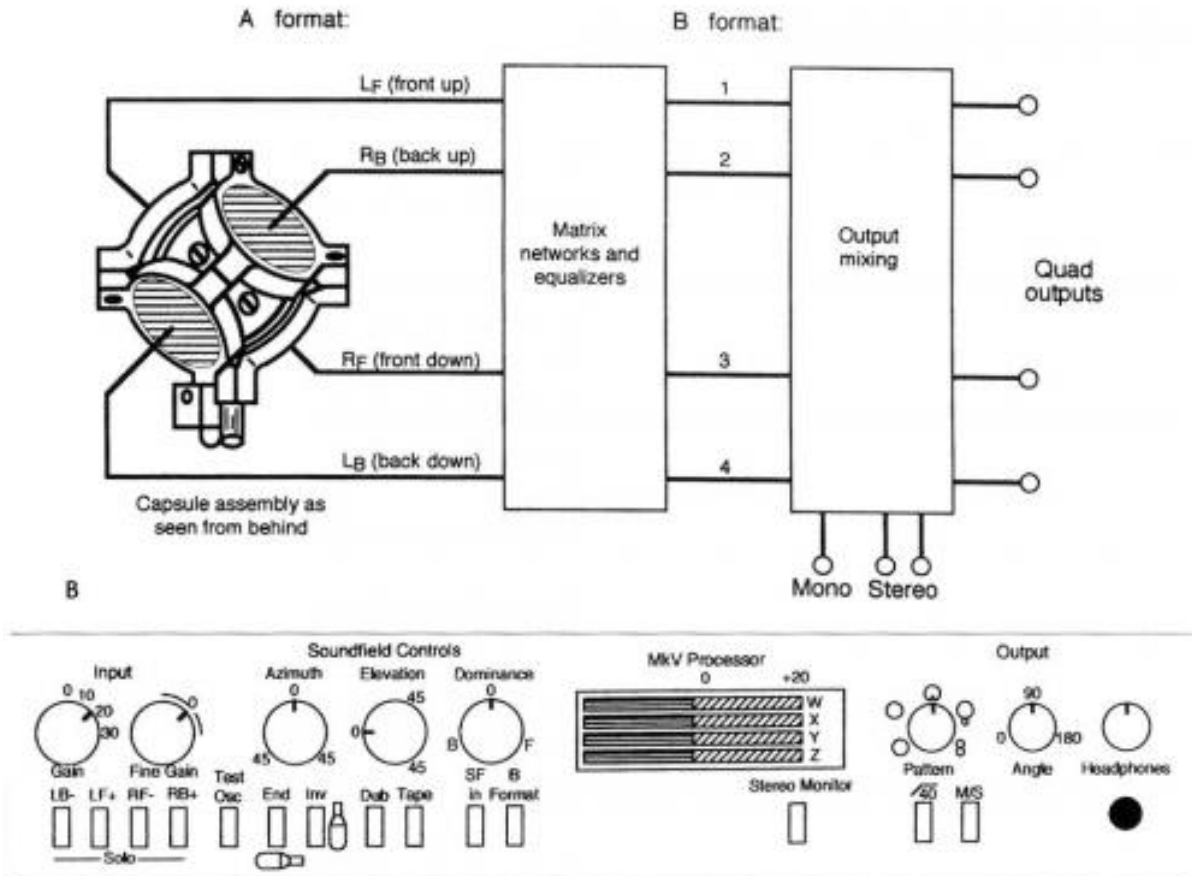
Совмещенные системы

К этой группе можно отнести такие системы, как Soundfield, Surround Sphere, DoubleMS и др.

Система **Soundfield** использует четыре кардиоидных капсюля, размещенных в форме тетраэдра, и соответствующий процессор (рис. 1).

Подобную конструкцию впервые предложили Michael Gerzon и Peter Craven в 1973 году.

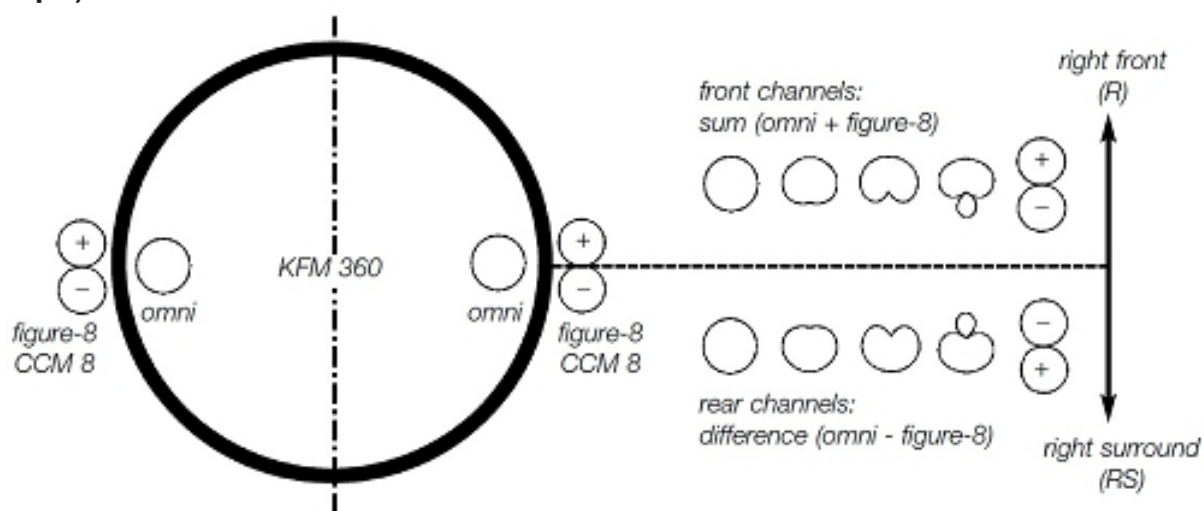
Первичные сигналы, получаемые от этих капсулей (LF, RB, RF, LB) образуют **A**-формат. Затем с помощью специального цифрового процессора из них формируются четыре новых сигнала W, X, Y, Z (**B**-формат), из которых сигнал W соответствует сигналу от ненаправленного микрофона, а сигналы X, Y и Z — сигналам от микрофонов с характеристикой направленности типа "восьмерка", ориентированным влево-вправо, вперед-назад и вверх-вниз. Четыре компонента B-формата могут быть электрически скомбинированы в разных пропорциях таким образом, что можно получить ряд кардиоидных (или других) характеристик направленности, ориентированных в любом направлении в пространстве, причем можно менять направление и наклон этих характеристик в процессе записи или при последующей обработке.



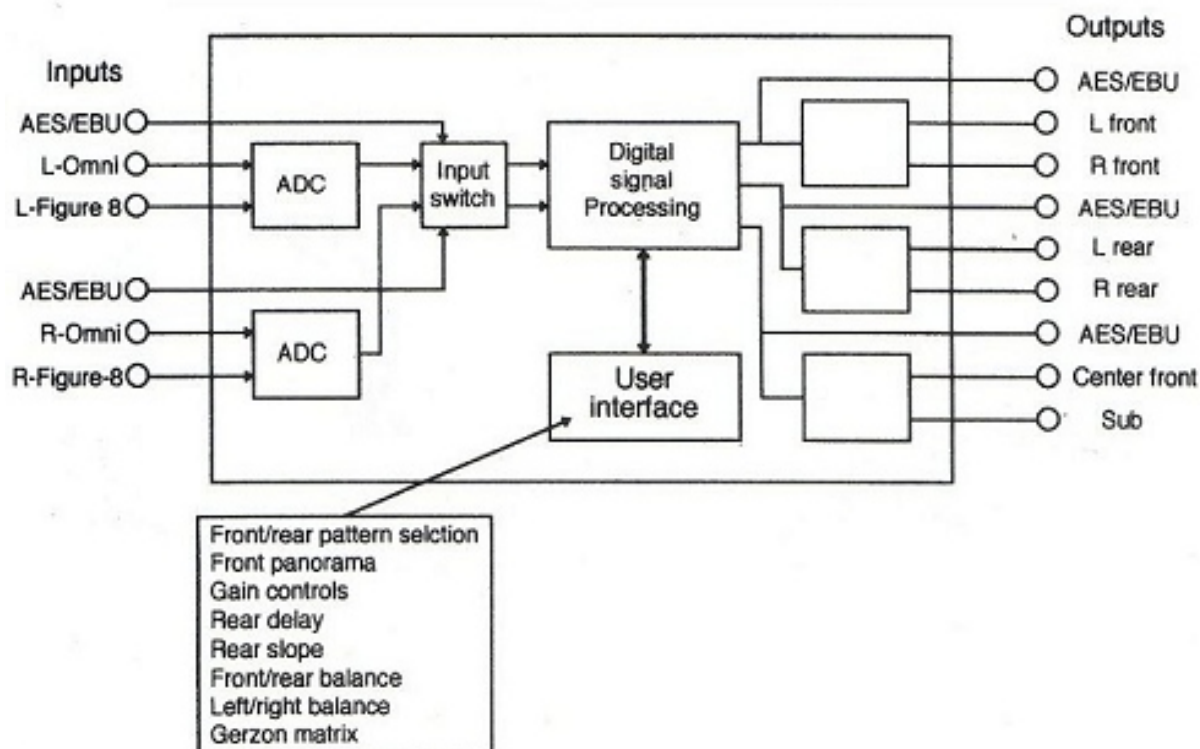
Используя специальный декодер, сигналы В-формата конвертируются в любые варианты сигналов для моно-, стерео- и surround-систем, вплоть до 10.1. Для конвертирования в самый распространенный формат 5.1 был разработан специальный процессор SP451. Учитывая компактность такой системы, большие возможности процессорной обработки и совместимость с большинством известных стереофонических и surround-форматов, она находит широкое применение в различных приложениях пространственной звукозаписи. Разновидностью этой системы можно считать предложенную фирмой Schoeps микрофонную систему, состоящую из одного ненаправленного микрофона и трех микрофонов с характеристикой

направленности типа "восьмерка", закрепленных очень близко друг к другу, то есть с ее помощью можно сразу записывать сигналы В-формата. В этой системе несколько проще процессорная обработка, можно использовать микрофоны разных фирм и т. д. Область применения ее такая же, как и предыдущей — пространственная звукозапись.

Surround Sphere. Учитывая требования пространственных систем по увеличению количества каналов записи, фирма Schoeps разработала новую микрофонную сферическую систему KFM360, в которой наряду с двумя направленными микрофонами, установленными на поверхности сферы, используются два микрофона с характеристиками направленности типа восьмерка, расположенные ниже их и направленные прямо по оси (рис. 2). Суммируя электрические выходы микрофонов в разных пропорциях, можно получить различные виды характеристик направленности как во фронтальной, так и в тыловой плоскости (круг, кардиоида, суперкардиоида, восьмерка и др.).

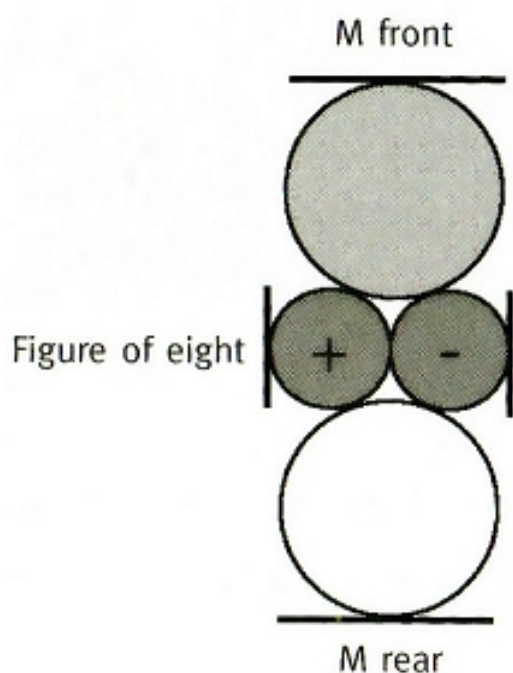


Благодаря широкому углу охвата (120 град), такая система может располагаться довольно близко к источникам. Посредством матричной обработки с ее помощью можно получить полный формат 5.1, включая низкочастотный канал (рис. 3). Система обеспечивает хорошую локализацию и эффективно используется при записи музыки, в частности для передачи различных пространственных эффектов.



DoubleMS. Для формирования четырехканального звука обычная стереосистема MS дополняется еще одним М-микрофоном (ненаправленным или

кардиоидным). При этом S-микрофон (характеристика направленности типа "восьмерка") используется как с передним, так и с задним M-микрофоном, который располагается выше его. Схема и конструкция такой системы показаны на рис. 4. Подбирая различные варианты характеристик направленности M-микрофонов, можно сформировать, с помощью соответствующей процессорной обработки, все каналы для формата 5.1. Такая система нашла особое применение в технике записи звука в кино для передачи пространственной атмосферы.





Системы с адаптивным цифровым управлением (Audio-Technica AT895, Microtech Gefell KEM970 и др.). Возможности цифровой обработки сигналов позволили создать новые микрофонные системы, представляющие собой своего рода микрофонные антенны, в которых с помощью цифровых фильтров синтезируются диаграммы направленности различной управляемой формы, ширины и ориентации, адаптированные к различным

условиями окружающего пространства и задачам обработки. Такие системы находят все большее применение в системах звукозаписи и озвучивания. Пример системы Audio-Technica AT895, состоящей из центрального остронаправленного микрофона и четырех кардиоидных микрофонов, с последующей цифровой фильтрацией их характеристик, показан на рис. 5.

Разнесенные системы

Вторая группа микрофонных систем также широко используется для пространственных записей, особенно когда речь идет о классической музыке. Все многообразие разнесенных микрофонных конфигураций, используемых в системах Surround Sound, можно условно разделить на две большие группы: пятиканальные системы "главных микрофонов" и системы с разделением фронтальных и задних микрофонов.

Первый тип систем обычно включает в себя пять близко расположенных микрофонов, каждый из которых создает сигнал для левого, правого, центрального и двух тыловых громкоговорителей. Такая система позволяет создать во вторичном помещении мнимые источники, распределенные в горизонтальной плоскости, обеспечивая при этом удовлетворительное пространственное впечатление. Однако использование такой "главной" микрофонной конфигурации все же приводит к определенным проблемам в воссоздании ощущения "пространственности" из-за малых расстояний между отдельными микрофонами, соответственно малых различий в

структуре звукового сигнала (малой декорреляции между ними). Поэтому в звукорежиссерской практике (особенно европейской) такая "главная" конфигурация дополняется микрофонами для отдельных инструментов.

Как показали многолетние исследования Лео Беранека (Leo Leroy Beranek) наибольшую связь с ощущением "пространственного" распределения источника в помещении показывают результаты измерения коэффициента внутрислуховой кросс-корреляции сигнала, который равен

$$\text{КВСКК} = \int_{-\infty}^{+\infty} p_l(t) p_{pr}(t - \tau) d\tau ,$$

где $p_l(t)$ и $p_{pr}(t)$ — давление на левом и правом ухе. Этот коэффициент определяет степень различия звуковых сигналов на двух ушах, как по времени, так и по амплитуде. Чем менее подобны звуки на левом и правом ухе, тем меньше этот коэффициент и тем больше кажущее расширение источника. В случае, если звуки одинаковы, коэффициент становится равным единице и кажущийся источник звука концентрируется в центре.

Измерения, выполненные в различных залах с помощью прибора "искусственная голова" на двадцати позициях при разных положениях источников звука, показали, что значения этого коэффициента для лучших по качеству звучания залов мира КВСККрЗ оказались в пределах 0,3-0,6. Если при записи микрофоны находятся слишком

близко друг от друга, то различия между сигналами в разных каналах будут малы и соответственно коэффициент корреляции будет больше 0,6, то есть будет мала декорреляция между сигналами.

По поводу выбора параметров в центральных микрофонных системах, таких как характеристика направленности, расстояние между микрофонами, угол наклона и др., обеспечивающих создание оптимального мнимого образа, большой комплекс работ проделал M. Williams. Результаты этих работ были представлены им на всех последних конгрессах AES и в специально посвященной этим вопросам книге.

Дизайн таких микрофонных комбинаций включает в себя следующие последовательные этапы: выбор желаемого "угла охвата" источника в пределах от +/-90 град до +/-50 град для передних микрофонов, определение желаемого баланса между передними и тыловыми микрофонными комбинациями (отсюда определение необходимых временных задержек между ними), установление угла охвата для тыловой комбинации микрофонов и расчет боковых сегментов охвата.

В этих работах M. Williams проанализировал сотни комбинаций микрофонов с различными характеристиками направленности и построил номограммы, позволяющие рассчитать необходимое расстояние между микрофонами в зависимости от заданного угла охвата источников при записи.

Один из примеров расчета для кардиоидных микрофонов представлен в таблицах 1а (для

передней группы микрофонов) и 1б (для тыловой группы).

Таблица 1а

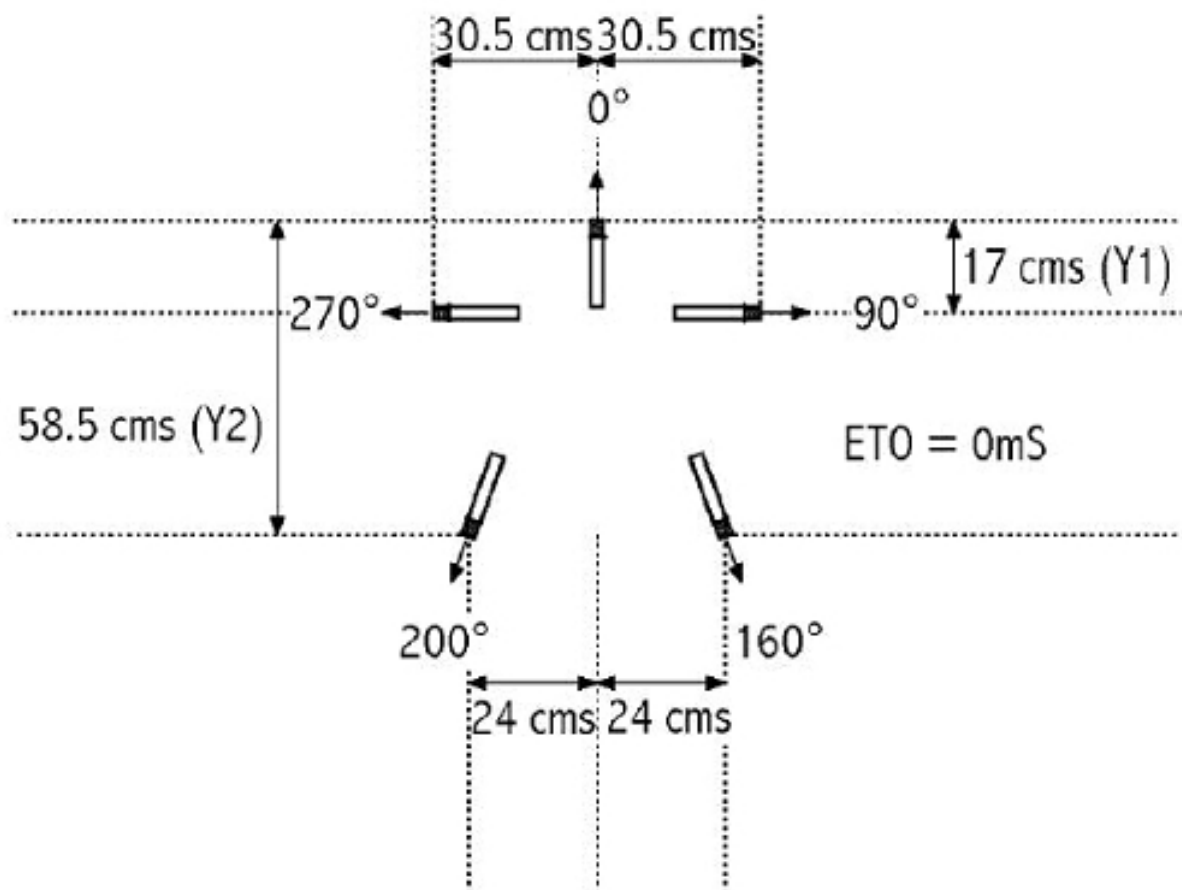
Ориентация микрофонов	Общий угол охвата +/-72 град		Y1-координата (рис. 6), см
	Расстояние между микрофонами (см)	X-координата (рис. 6), см	
90 град - L 270 град - R	35	+30,5 -30,5	17
80 град - L 280 град - R	37	+31 -31	20,5
72 град - L 288 град - R	39	+31,5 -31,5	23
60 град - L 300 град - R	42,5	+33 -33	26,5
50 град - L 310 град - R	45	+34 -34	29,5
40 град - L 320 град - R	48,5	+36,5 -36,5	31,5

Таблица 1б

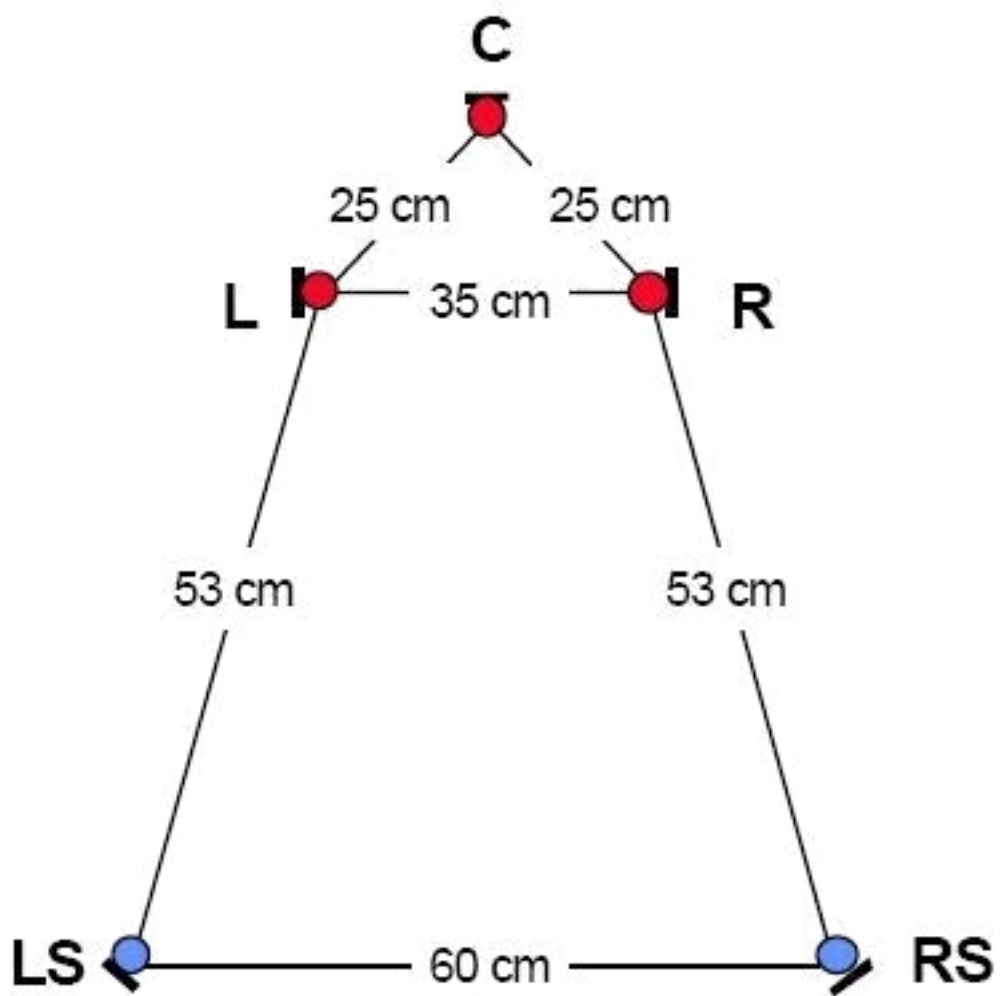
Угол тылового покрытия (град)	Ориентация тыловых микрофонов (град)	Угол между микрофонами (град)	Расстояние между микрофонами (см)	Y2 (рис. 6), см
72	160 - R 200 - L	40	48	58,5
72	155 - R 205 - L	50	45	59
72	144 - R 216 - L	72	39	60
72	135 - R 225 - L	90	34,5	62
72	130 - R 230 - L	100	32	63,5

Пользуясь этими таблицами можно составить различные варианты из передних и тыловых групп микрофонов.

Один из вариантов комбинации, соответствующей первой строке таблицы 1а и первой строке таблицы 1б, показан на рис. 6.



В последних работах, представленных на 118 конгрессе AES, M. Williams показал результаты анализа возможных конфигураций микрофонов для пятиканальных систем, обеспечивающих зоны покрытия выше и ниже горизонтальной плоскости, что может быть произведено выбором соответствующего сдвига микрофонов относительно друг друга в вертикальной плоскости. Следующим примером "главной" микрофонной системы, выполненной в соответствии с рекомендациями Вильямса, является пятимикрофонная система INA-5 (рис. 7а), собранная из кардиоидных микрофонов, которые могут двигаться, поворачиваться и их диаграммы направленности могут варьироваться.



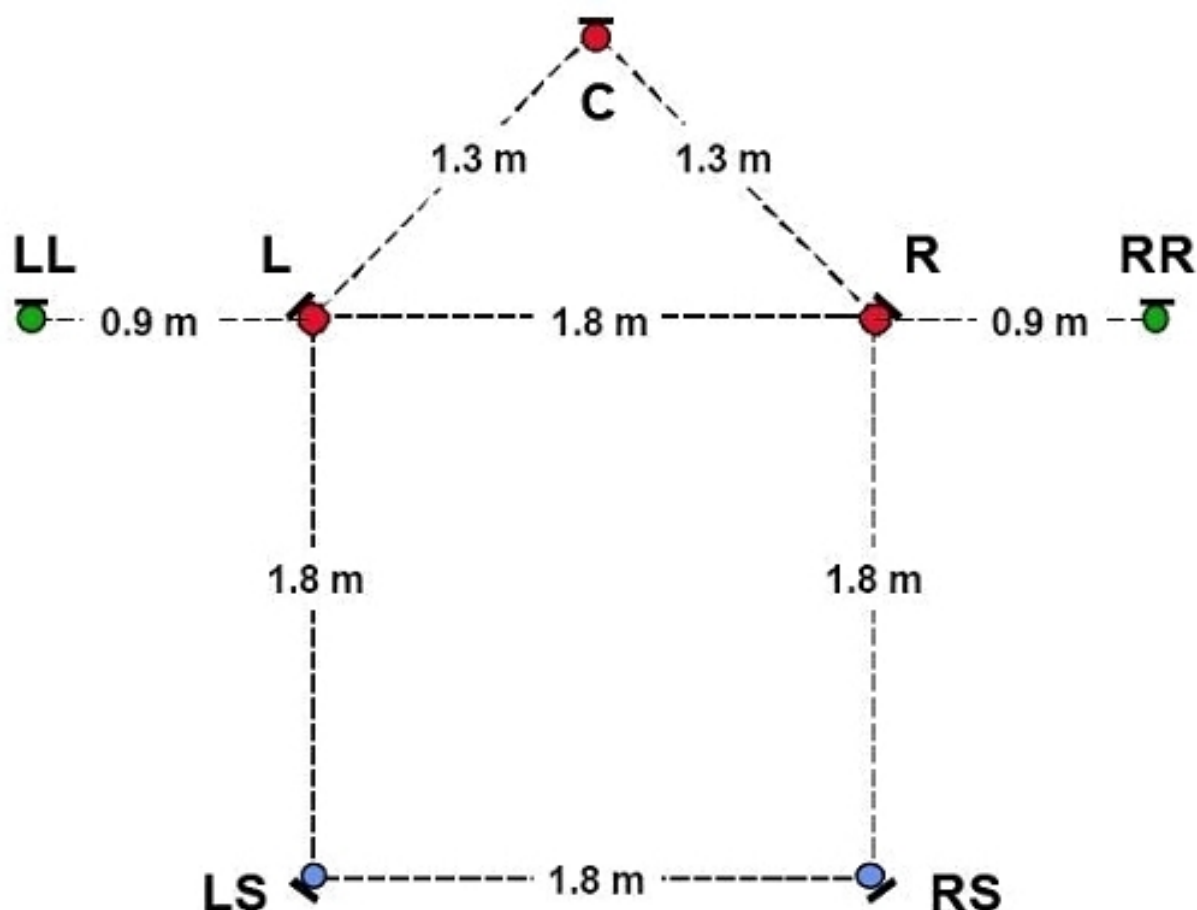
Промышленная реализация такой системы показана на рис. 7b.



Вторая группа микрофонных пятиканальных систем предполагает использование трех передних микрофонов для создания точного мнимого фронтального образа, а задних микрофонов только для схватывания "окружающего" пространства. Обычно для этого применяется известная комбинация трехканальных передних микрофонов, используемых в стереофонии, и к ней добавляются два микрофона с различным расположением в пространстве, обеспечивающих декоррелированную запись реверберации в помещении.

Примером может служить система **Fukada Tree** (рис. 8), где в качестве передней используется конфигурация типа Десса Трив (о которой было

рассказано в предыдущей статье — см. МО, сентябрь 2011), только ненаправленные микрофоны заменяются на кардиоидные с целью уменьшения количества реверберирующего звука, схватываемого передними микрофонами. Иногда добавляются два ненаправленных микрофона LL и RR с целью увеличения ширины охвата оркестра. Задние микрофоны используются также с кардиоидной характеристикой и располагаются они на "критическом" для данного помещения расстоянии.



Критическим называется расстояние, на котором величины прямой и отраженной энергии равны друг другу. Величина критического расстояния зависит от времени реверберации (T_c) и объема зала (V куб. м):

$$r_{кр} = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}}.$$

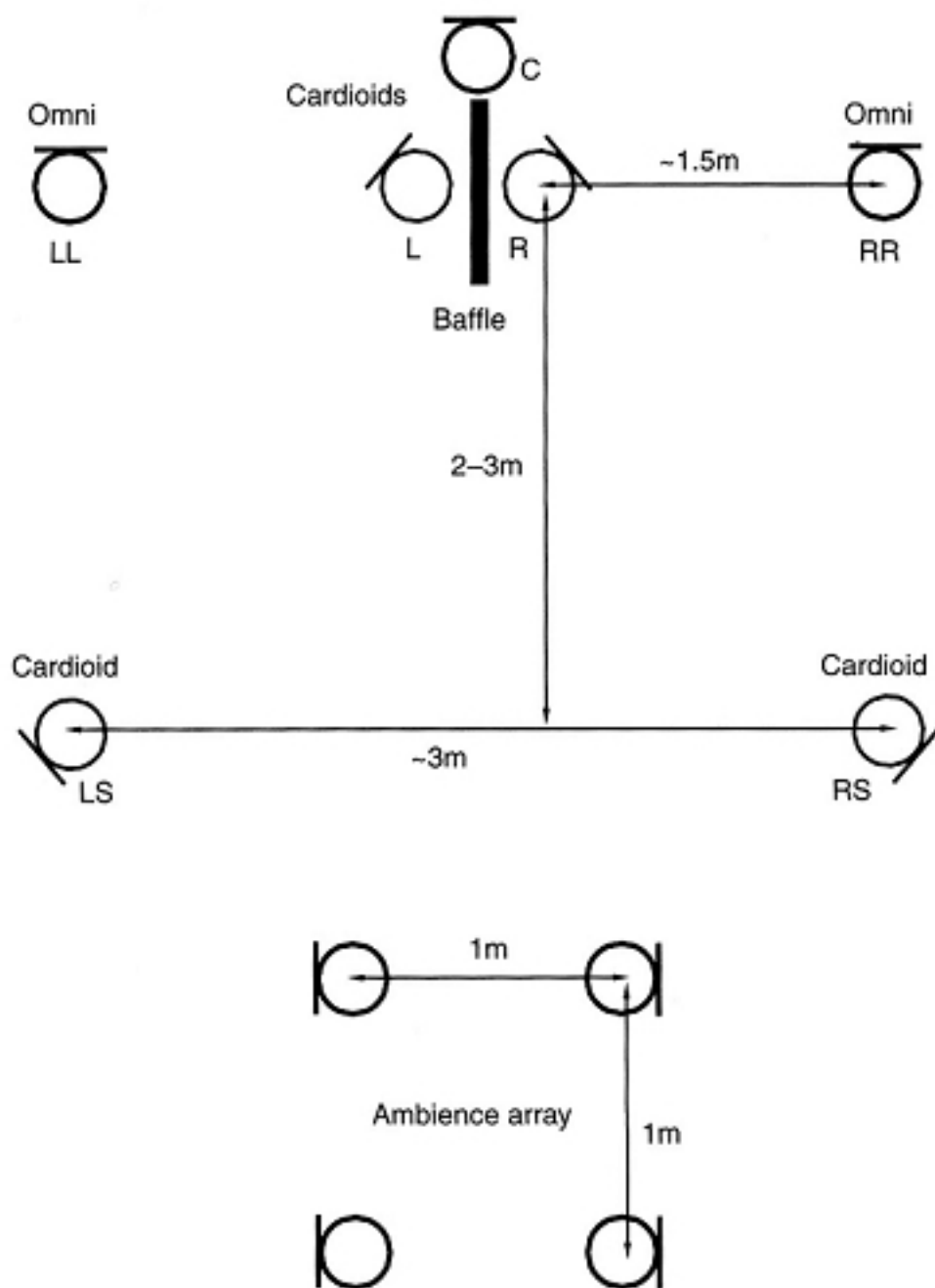
Примеры критического расстояния для лучших концертных залов мира: Musikvereinssaal в Вене — 4,6 м, Театр Национальной оперы в Париже — 5,4 м, Карнеги Холл в Нью-Йорке — 6,8 м, Альберт Холл в Лондоне — 10,6 м.

Расстояние между этими микрофонами может варьироваться в зависимости от ситуации. Выбор расстояния обеспечивает необходимую декорреляцию между сигналами, что позволяет создать требуемое ощущение пространственности. Существуют варианты такой системы (например, используемые звукозаписывающей фирмой Polyhymnia Int.), где применяются только ненаправленные микрофоны, что, по мнению фирмы, улучшает общий пространственный эффект.

Японская радиовещательная корпорация **NHK** предложила другую микрофонную конфигурацию для записи Surround Sound (иногда ее называют системой **Hamasaki**), показанную на рис. 9: два кардиоидных микрофона размещены на расстоянии 30 см друг от друга и разделены экраном.

Центральный микрофон также с кардиоидной характеристикой направленности размещен спереди. Два боковых ненаправленных микрофона расположены на расстоянии 3 м друг от друга. Они фильтруются на частоте 250 Гц и подмешиваются к левому и правому центральным микрофонам для улучшения пространственного воспроизведения

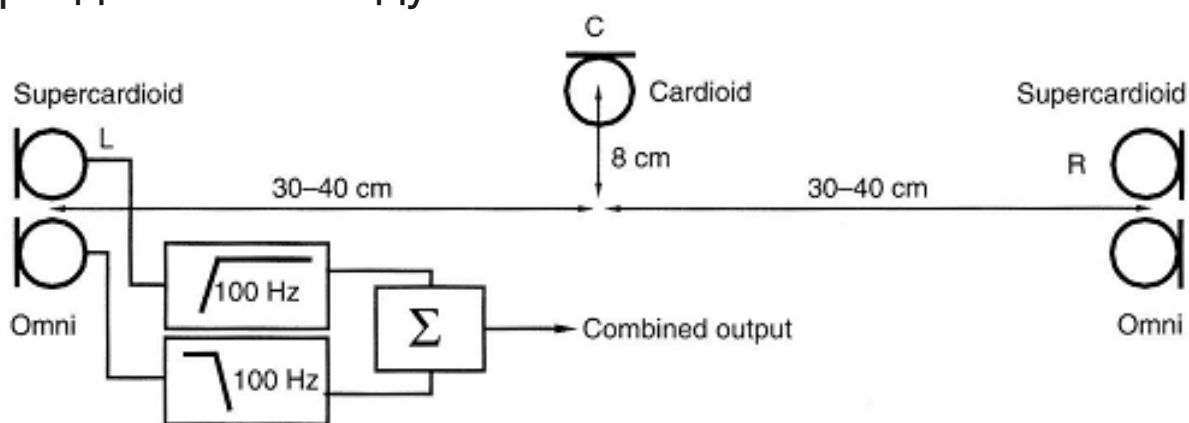
низких частот. Левый LS и правый RS расположены на расстоянии 2-3 м от центральных микрофонов и на расстоянии 3 м друг от друга.



Эта центральная конфигурация дополнена специальной комбинацией из четырех микрофонов с характеристикой направленности в форме восьмерки, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга, которая устанавливается достаточно высоко в глубине помещения, где происходит

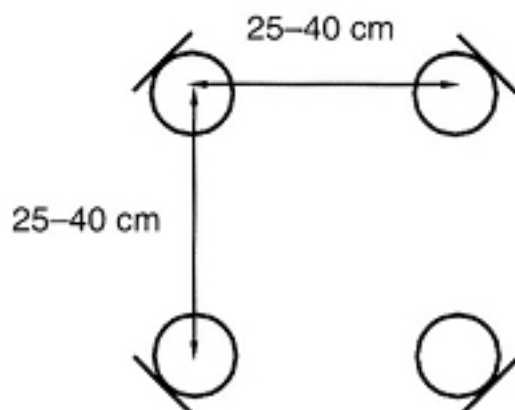
запись, для передачи общего пространственного ощущения зала.

Немецким институтом IRT была разработана новая система микрофонов (затем реализованная фирмой Schoeps как конфигурация **ОСТ** — Optimum Cardioid Triangle), представляющая собой конструкцию, показанную на рис. 10а. В ней предлагается использовать центральный кардиоидный микрофон и два боковых суперкардиоидных микрофона, дополненных ненаправленными микрофонами, сигнал которых фильтруется на частоте 100 Гц и подмешивается к левому и правому каналу. Кроме того, сигнал центрального микрофона также фильтруется (ФВЧ) на частоте среза 100 Гц. Поскольку суперкардиоида более направленная характеристика, чем кардиоида, и имеет наибольшее отношение прямой/отраженный звук, такая конфигурация обеспечивает наилучшее разделение между каналами.

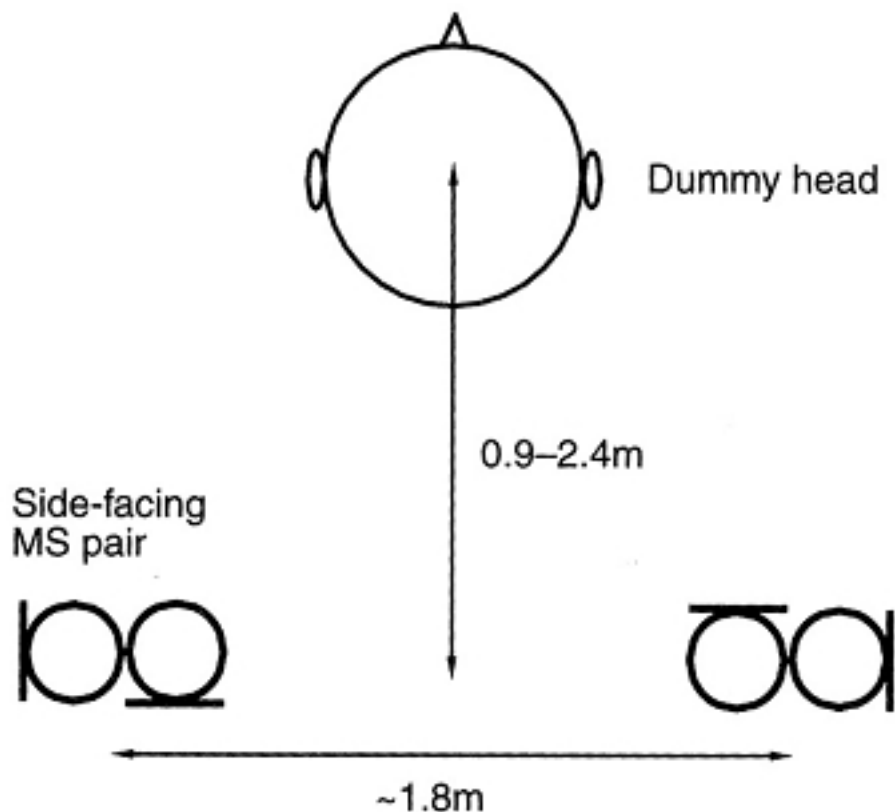


Для схватывания окружающего пространства была предложена система из четырех кардиоидных (или ненаправленных) микрофонов, показанная на рис. 10b. Расстояние между микрофонами выбирается в зависимости от желаемой степени корреляции

между каналами. Такая комбинация получила название **IRT Cross**.

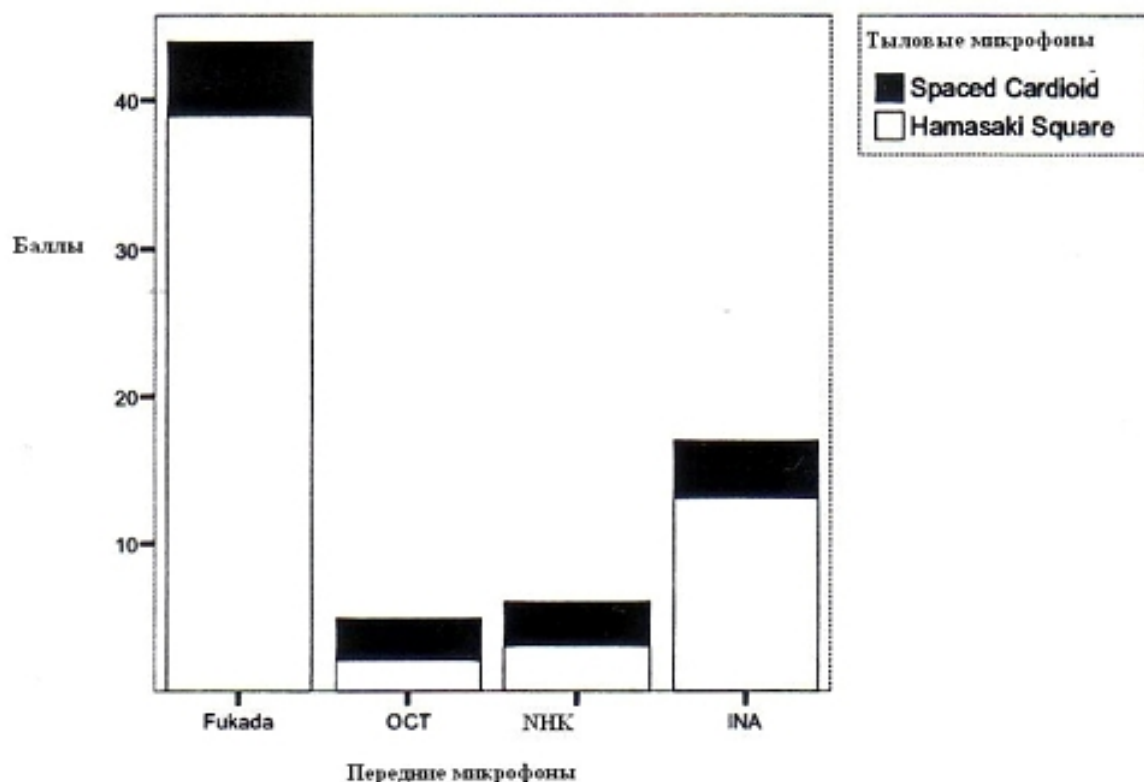


Фирма **Telarc** предложила интересную конфигурацию, в которой используются "искусственная голова" фирмы Neumann (рис. 11) и две пары MS-микрофонов, включенных между каналами левым центральным и тыловым (L и LS) и правым центральным и тыловым (R и RS). Получается некоторая смесь бинауральной стереофонии и стереофонии Surround Sound, что позволяет создать интересные пространственные эффекты.



Очень полезные результаты были представлены на 118 конгрессе AES специалистами их английского университета Surrey, которые провели сравнительный анализ перечисленных ранее микрофонных систем с точки зрения технического обеспечения записей и их субъективной оценки. Для анализа были выбраны четыре комбинации передних микрофонов и две тыловых. В качестве передних использовались комбинации трех микрофонов типа INA, Fukada Tree, OCT, NHK (Hamasaki), в качестве тыловых — четыре микрофона системы NHK или просто две разнесенные кардиоиды. Запись производилась в большой акустической студии с размерами 17 x 14,5 x 6,5 м (передняя центральная группа микрофонов устанавливалась на расстоянии 7 м от источника звука, тыловая

группа микрофонов — на расстоянии 14 м). Запись выполнялась как отдельных инструментов (рояля, скрипки, тромбона, клавесина и др.), так и различных ансамблей и голосов. Полученные записи проходили субъективную экспертизу, обобщенные результаты экспертиз показаны на рис. 12. Как видно из этих результатов, наибольшее предпочтение для передней группы микрофонов получила комбинация Fukada Tree. Эта техника обеспечивала хорошее пространственное впечатление (вероятно, за счет большей разнесенности микрофонов), уверенную локализацию по глубине, хороший тембральный баланс.



Второе место заняла конфигурация INA, у нее несколько хуже локализация, но зато она обеспечивает "открытость" звука и приятный

тембр, и может быть рекомендована для записи сольных инструментов. Конфигурации OСТ и NХТ оказались хуже по субъективным оценкам. Первая обеспечивала хорошую локализацию, но источники казались слишком узкими.

Сравнение тыловых комбинаций микрофонов дает несомненные преимущества для комбинации из четырех микрофонов НК (Namasaki), поскольку она обеспечивает наилучшее ощущение пространственности, создает более стабильный звуковой образ. Эксперименты предполагается продолжить для более широкого класса источников и более широкого сочетания различных комбинаций микрофонов.

Однако уже сейчас очевидно, что предложенные комбинации "разнесенных" микрофонных систем могут уверенно использоваться в технике звукозаписи для систем Surround Sound типа 5.1 и др. Поиски различных комбинаций микрофонов продолжаются и не исключено, что по мере накопления опыта работы могут быть предложены и другие варианты таких систем.

Необходимо отметить, что не только выбор конфигурации микрофонов для записи в технике Surround Sound представляют трудности, но и отработка технологии многоканального панорамирования в целом имеет значительные проблемы. Законы панорамирования, отработанные для стереосистем, здесь оказываются неподходящими, так как звук от тыловых громкоговорителей значительно изменяется по спектру за счет дифракции на ушных раковинах. В

настоящее время проводятся интенсивные исследования законов панорамирования, основанных на различных психоакустических принципах.

Все материалы взяты из открытых источников, носят исключительно ознакомительный характер и предназначены для студентов кафедры звукорежиссуры ТРФ МГИК очной/заочной форм обучения, на период введённого, в связи с режимом самоизоляции, дистанционного обучения. Не для публичного распространения!

Список источников:

allprosound.ru
cambridge-mt.com
digitalmusicacademy.ru
etheroneph.com
ldsound.ru
moinf.info
prosound.ixbt.com
samesound.ru