

Акустическая аппаратура для озвучения

Часть 3. Звуковые колонки

И.А. Алдошина

В технике озвучения и звукоусиления наряду с рупорными громкоговорителями широко используются групповые акустические излучатели, к числу которых можно отнести звуковые колонки, радиальные громкоговорители, звуковые люстры и др. Все они состоят из набора излучателей, расположенных особым образом в горизонтальной или вертикальной плоскости, что позволяет формировать разные характеристики направленности в этих плоскостях. Такое различие в характеристиках направленности оказывается очень полезным для построения различных видов систем звукоусиления.

В соответствии с ГОСТ16122-88 звуковая колонка определяется как «громкоговоритель (акустическая система) с отличающейся направленностью в разных плоскостях, содержащий по крайней мере одну линейную цепочку однотипных громкоговорителей или головок громкоговорителей и предназначенный для озвучения закрытых и открытых пространств».

Таким образом, звуковую колонку можно рассматривать как своего рода акустическую антенну, состоящую из набора источников, выбором числа и расстояния между которыми можно формировать заданную ширину и форму характеристики направленности в плоскости расположения источников.

Теория расчета звуковых колонок была изложена в работах Олсона в 1940 г. и Беранека в 1945 г. Первые речевые колонки были поставлены на производство примерно в это же время в Америке (инженер Rudy Bozak), в Европе французская фирма L-Acoustics впервые использовала звуковые колонки V-DOSC для музыкальных программ.

Звуковые колонки обычно состоят из нескольких одинаковых громкоговорителей (от 3 до 10), расположенных в вертикальной плоскости один над другим в виде прямолинейной колонны (рис. 1). Можно считать, что это – линейная одномерная акустическая антенна.

Принцип формирования характеристики направленности в вертикальной плоскости заключается в следующем: представим звуковую колонку как набор точечных излучателей, на большом расстоянии звуковое давление от n -излучателей можно суммировать арифметически, т.е.

$$p_{\Sigma} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$$

Примечание. Начало см. «Install Pro», 2003, №2, 3 (21, 22)

Характеристика направленности звуковой колонки определяется как:

$$R(\theta) = p_{\theta}/p_0,$$

где p_{θ} – суммарное звуковое давление в точке звукового поля под углом θ к оси.

Если сложить все звуковые давления в направлении под углом θ к оси, то получится следующая формула:

$$p_{\theta} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_N = \frac{p}{N} \sum_{m=1}^N \sin[\omega(t - r/c) - m\Delta\varphi],$$

где $p_1 = p_2 = p_3 = \dots = p$ – звуковое давление от каждого громкоговорителя;

N – число громкоговорителей;

$\Delta\varphi = 2\pi d/\lambda \sin\theta$ – сдвиг фаз между звуковыми волнами, создаваемыми соседними излучателями, находящимися на расстоянии d друг от друга.

Отсюда, характеристика направленности получается:

$$R(\theta) = p_{\theta}/p_0 = \frac{\sin Nx}{N \sin x},$$

где $x = (\pi d/\lambda) \sin\theta$.

Если бы излучатели были точечными источниками и расстояние между ними было очень мало, то можно приближенно считать $Nd \ll L$, тогда:

$$R(\theta) = \sin x_L / x_L,$$

где $x = (\pi L/\lambda) \sin\theta$.

Из этой формулы следует, что звуковые колонки имеют характеристику направленности, значительно заостренную в продольной (вертикальной) плоскости из-за большой величины L/λ . В поперечной плоскости эта характеристика определяется направленностью одного громкоговорителя. Необходимо заметить, что эта формула применима только в дальнем поле (на расстоянии примерно в 8 – 10 раз больше размеров колонки), при использовании одинаковых ненаправленных излучателей с одинаковым уровнем звукового давления.

Форма полярной диаграммы направленности в вертикальной плоскости показана на рис. 2. С увеличением частоты острота лепестка возрастает, изменение коэффициента осевой концентрации $Q(f)$ приведено на рис. 3 для разного числа излучателей 4, 6, 8, 10.

Можно напомнить, что коэффициент осевой концентрации (*directivity factor* – Q) – это отношение квадрата звукового давления, измеренного на оси системы, к ее акустической мощности на этой же частоте:

$$Q(f) = (4\pi^2/pc) (p^2 o(f)/P_A(f)).$$



Рис. 1. Общий вид прямолинейной звуковой колонки

По мере повышения частоты не только обостряется главный лепесток направленности, но и появляется достаточно большое количество боковых лепестков (рис. 4), поэтому в области $\delta/\lambda \sim 1$ коэффициент осевой концентрации падает и именно эта область ограничивает полезный частотный диапазон.

Трехмерная (объемная) диаграмма направленности в вертикальной плоскости для прямолинейной колонки показана на рис. 5. Необходимо обратить внимание, что форма главного лепестка на данной частоте не зависит от поворота в горизонтальной плоскости (если излучение в горизонтальной плоскости ненаправленное, что для определенного соотношения размеров громкоговорителя к длине волны допустимо).

Чтобы расширить полезный частотный диапазон звуковой колонки, необходимо по мере увеличения частоты и соответственно длины волны уменьшать ее эффективную длину. Для этого были предложены различные конструктивные решения: например в работе Клеппера и Стронга были разработаны специальные угловые линзы (поглотители из стекловолокна), которые эффективно начинают работать на высоких частотах, обеспечивая излучение только от центральных громкоговорителей (рис. 6, а). Второй способ состоит в применении низко- и высокочастотных фильтров, с помощью которых низкочастотные секции отключаются на высоких частотах, остаются только высокочастотные секции, длина которых существенно короче (рис. 6, б). Наконец, интересная конструкция показана на рис. 7, где громкоговорители расположены по винтовой линии и в заданной вертикальной плоскости только центральные громкоговорители будут эффективно работать на высоких частотах, в то время как на низких частотах участвовать в излучении будут все громкоговорители.

Наиболее эффективным методом управления формой характеристики направленности является выбор распределения амплитуд и фаз напряжений, подводимых к каждой головке громкоговорителя в звуковой колонке. Примером могут служить звуковые колонки, созданные на фирме Philips, где распределение напряжения соответствует функции Бесселя, при этом удается обеспечить характеристику направленности в вертикальной плоскости такую же, как и в горизонтальной, такое расширение может быть иногда полезным для речевых систем звукоусиления.

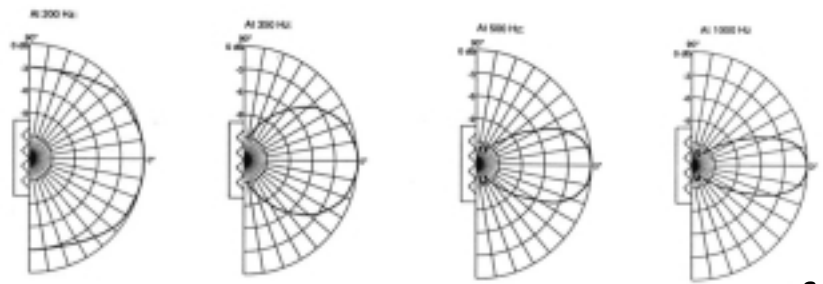
Для регулирования ширины характеристики направленности в горизонтальной плоскости, которая с повышением частоты постепенно сужается, иногда используется принцип построения двойных колонок с поворотом осей под углом 60° (рис. 8), при этом характеристика направленности равна:

$$R(\theta) = (\sin x_L / x_L) (\sin x_b / x_b),$$

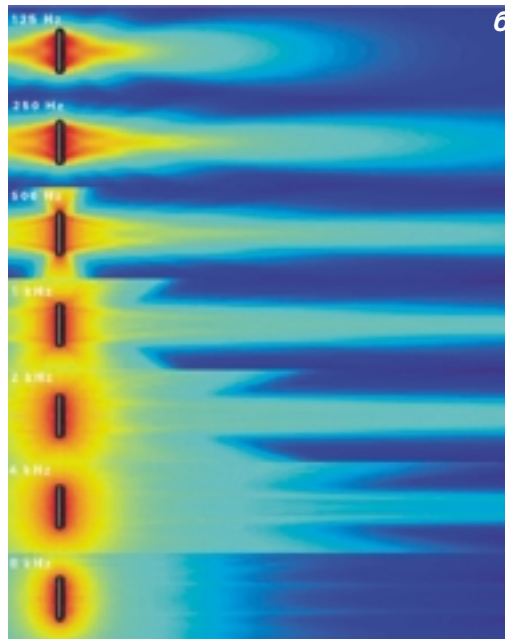
$$\text{где } x_b = (\pi b / \lambda) \sin \theta_b;$$

b – ширина звуковой колонки.

Для регулировки характеристики направленности в области низких частот для прямолинейных звуковых колонок был предложен градиентный принцип (ИРПА, авт. Ю.А. Кондратьев). Идея состоит в том, что в боковых стенках корпуса делаются дополнительные щели, за-



а



б

Рис. 2. Форма полярной диаграммы направленности: а – в вертикальной плоскости на разных частотах (для четырех излучателей); б – главный лепесток диаграммы направленности для 16 излучателей

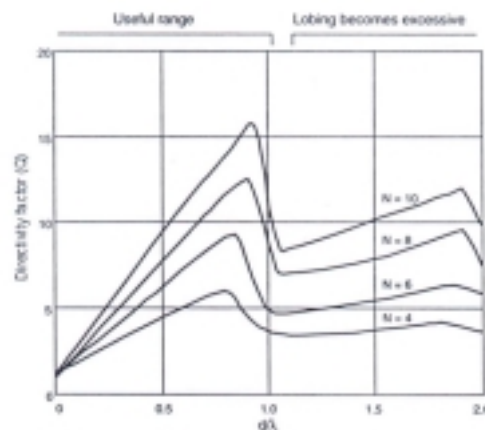


Рис. 3. Изменение коэффициента осевой концентрации с частотой

крытые изнутри акустически резистивным материалом – тканью. Это позволяет использовать заднее излучение от головок громкоговорителей, подбирая акустическое сопротивление, т.е. меняя сдвиг по фазе, можно сформировать в области низких частот кардиоидную характеристику направленности. Соотношение фронт-тыл на всех частотах получается выше 10 дБ. Применение таких колонок полезно в помещениях с большим уровнем шумов, что позволяет отстроиться от шумов с тыльной стороны.

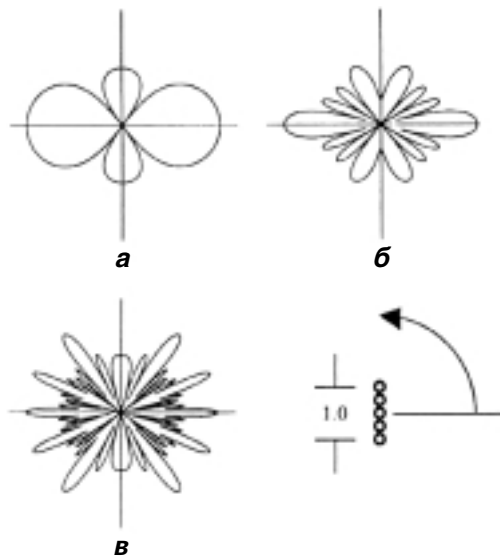


Рис. 4. Форма характеристики направленности в вертикальной плоскости на высоких частотах:
 а – на частоте F ;
 б – на частоте $4F$;
 в – на частоте $8F$

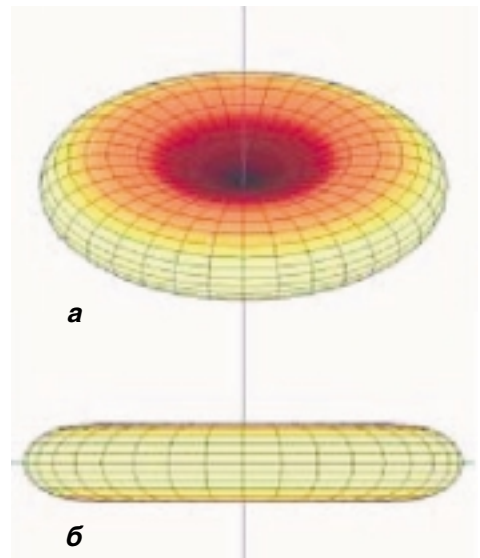


Рис. 5. Объемная форма диаграммы направленности в вертикальной плоскости на частоте 5,4 Гц с углом покрытия $22,5^\circ$:
 а – вид сверху;
 б – вид сбоку

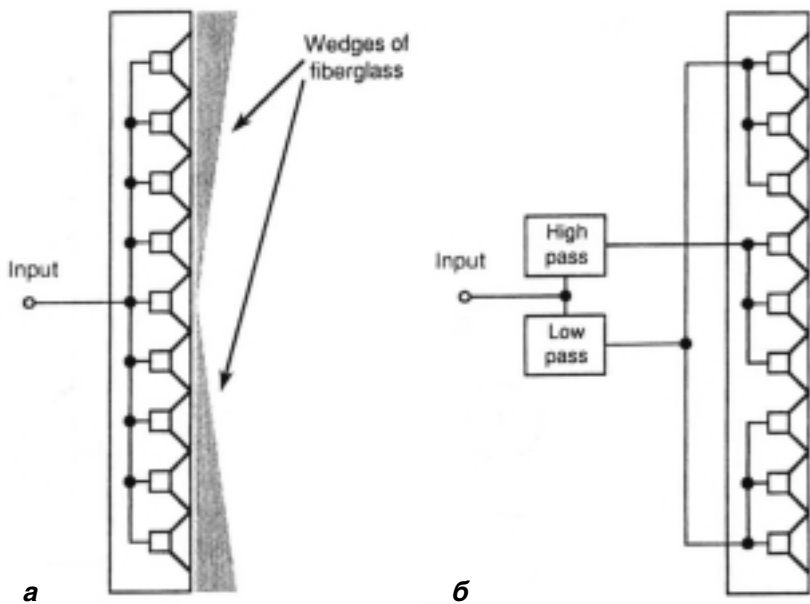


Рис. 6. Способы расширения полезного частотного диапазона звуковой колонки:
 а – поглотитель из стекловолокна на звуковой колонке;
 б – применение электрических фильтров для уменьшения эффективной длины

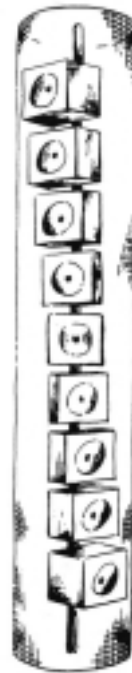


Рис. 7. Схема включения головок для звуковых колонок с расширенной характеристикой направленности



Рис. 8. Вид отечественных звуковых колонок:
 а – 5К3-2Д; б – 25К3-20; в – 50К3-11Д



Рис. 9. Вид криволинейной колонки по технологии VerTec

Преимуществом звуковых колонок, т.е. линейных вытянутых источников звука, является также и то, что, поскольку они имеют разную форму характеристики направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях (форма волны приближается к цилиндрической), зависимость давления от расстояния равна $p \sim 1/\sqrt{r}$, т.е. при удвоении расстояния уровень давления уменьшается только на 3 дБ, в то время как у точечного источника (на низких частотах любой громкоговоритель может считаться точечным источником, так как длина волны большая) уровень давления уменьшается при этом на 6 дБ. Поэтому с помощью звуковых колонок можно обеспечить необходимый уровень громкости на более дальних расстояниях.

Звуковые колонки имеют очень широкую область применения для различных систем звукоусиления и выпускаются в различных модификациях: звуковые колонки малой и средней мощности – для зональных систем озвучения аудиторий, конференц-залов, цехов и т.д.; мощные музыкальные звуковые колонки – для озвучения театральных и выставочных залов, стадионов и площадей и т.д.; мощные звуковые колонки – для

озвучения открытых пространств: улиц, площадей, стадионов и др.

В зависимости от области применения колонки значительно различаются по своей конструкции: для закрытых помещений используются колонки с деревянными и пластмассовыми корпусами, для открытых пространств – с металлическими корпусами, специальной системой жалюзей для защиты от влаги, особыми влагозащитными пропитками диффузоров и др. Для колонок предусматриваются в комплекте различные поворотные устройства, позволяющие установить их на определенном уровне на стене, а также обеспечить нужный угол наклона, направляющий характеристику направленности на требуемую площадь в зрительном зале.

Разработкой и выпуском звуковых колонок занимается достаточно большое количество фирм: Philips, Electro-Voice, Altec Lansing, Cerverin-Vega, RCF и др.

Основные параметры звуковых колонок зависят от назначения. Так, для мощных музыкальных колонок воспроизводимый диапазон частот обычно составляет от 63 – 80 Гц до 18 – 20 кГц, электрическая мощность 100 – 200 Вт; для речевых колонок воспроизводимый диапазон частот от 100 – 125 Гц до 12,5 – 14 кГц, электрическая мощность 4 – 50 Вт.

Отечественная промышленность производит достаточно большое количество звуковых колонок, некоторые из них, выпускаемые в настоящее время на заводе «Динамик», приведены на рис. 8. Значения параметров для них даны в таблице.

Несколько лет назад в производстве звуковых колонок произошла своего рода техническая революция, появился новый вид криволинейных колонок, пионером производства которых была фирма JBL и технология их конструирования получила название VerTec. Пример такой звуковой колонки показан на рис. 9.

Теория расчета криволинейных звуковых колонок (криволинейных антенн) оказалась значительно сложнее, чем прямолинейных колонок, и вызвала большой интерес специалистов. На последнем конгрессе AES в Амстердаме работал даже специальный семинар, посвященный этому вопросу. Наиболее интересные результаты были представлены в докладах D.Keele на конгрессах и в статьях, в том числе в последнем номере журнала JAES (2003, v51, №7/8). В этих и других работах, выполненных на фирме JBL, была создана теория расчета криволинейных колонок и соответствующее программное обеспечение (Vertec Line Array Calculator), обеспечивающее расчет и оптимизацию

Параметры	2КЗ-3Д	5КЗ-2Д	10КЗ-1Д	25КЗ-20	50КЗ-11Д
Номинальная электрическая мощность, Вт	2,0	5	10	25	50
Номинальное входное напряжение, В	30; 120	–	30; 120	30; 120	30; 120
Номинальное электрическое сопротивление, Ом	360 (для 30 В) 5760 (для 120 В)	144 (для 30 В) 2304 (для 120 В)	72 (для 30 В) 1152 (для 120 В)	36 (для 30 В) 576 (для 120 В)	18 (для 30 В) 288 (для 120 В)
Уровень среднего звукового давления, дБ	94	97	100	111	108
Эффективный рабочий диапазон частот, Гц	250 – 12500	250 – 12500	250 – 12500	160 – 12500	63 – 16000
Габаритные размеры, мм	330 x 140 x 80	450 x 140 x 80	152 x 602 x 80	217 x 737 x 150	900 x 342 x 252
Масса, кг	1,7	2,0	3,4	7,9	16

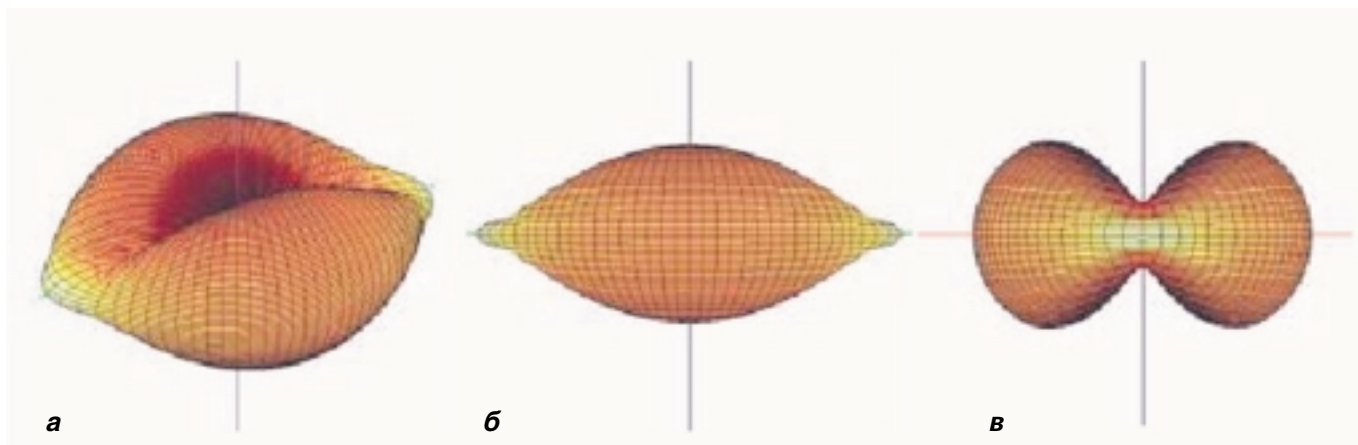


Рис. 10. Вид диаграммы направленности для криволинейной колонки:
а – вид сверху; б – вид с фронта; в – вид сбоку

формы характеристики направленности за счет выбора кривизны колонки, числа, расстояния, конструктивных и акустических характеристик излучателей и законов распределения подводимого напряжения к каждому из них (было показано, что оно должно соответствовать функции Лежандра).

Все это позволило получить параметры звуковых колонок, обеспечивающие практически постоянную ширину характеристики направленности в вертикальной плоскости в очень широком диапазоне частот, очень низкий уровень боковых лепестков, одинаковое распределение давления в зоне ближнего и дальнего полей и др.

Рассчитанная форма характеристик направленности таких колонок дала очень интересные результаты (рис. 10): трехмерный вид характеристики направленности в вертикальной плоскости показывает, что характеристика направленности имеет вид диполя (т.е. колонка излучает в обе стороны), причем ширина характеристики направленности в вертикальной плоскости зависит от угла в горизонтальной плоскости. Если построить зависимость ширины диаграммы направленности от угла в горизонтальной плоскости (рис. 11 – по оси ординат отложены градусы, на которых уровень уменьшается на 6 дБ), то видно, что при угле 90° ширина характеристики направленности резко уменьшается. Таким образом, форма характеристики направленности криволинейных колонок существенно отличается от прямолинейных колонок. Она зависит от кривизны колонки и числа излучателей. Варьирование этими параметрами создает широкие возможности для управления их характеристиками.

Практическая реализация криволинейных мощных звуковых колонок, предложенная фирмами JBL, Martin Audio и др., содержит в качестве излучающих элементов не отдельные громкоговорители, а трехполосные блоки (рис. 12).

Типичным примером такой конструкции может служить блок из криволинейной колонки W8LC (см. рис. 12) фирмы Martin Audio, который включает в себя один низкочастотный громкоговоритель диаметром 300 мм со звуковой катушкой 75 мм, нагруженный на рупор; два среднечастотных громкоговорителя диаметром 165 мм, также нагруженные на рупор, и три высокочастотных

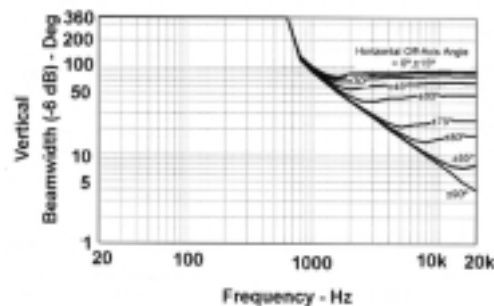


Рис. 11. Зависимость ширины диаграммы от угла в горизонтальной плоскости



Рис. 12. Трехполосный блок

излучателя с рупором. Вид высокочастотных рупоров показан на рис. 13. Частоты раздела 300 Гц и 3 кГц. Общий диапазон частот 60 Гц – 18 кГц, максимальное звуковое давление 129 дБ (пиковое 135 дБ). Угол покрытия в горизонтальной плоскости – 90° (при спаде -6дБ), в вертикальной плоскости – $7,5^\circ$. Корпус имеет форму усеченной трапеции и массу порядка 50 кг.

Из этих блоков с помощью специально разработанной программы (например Vertec Line Array Calculator) создается звуковая колонка в целом: выбирается число элементов, угол между ними, кривизна в вертикальной плоскости (можно задать определенную кривизну в нескольких плоскостях ZX и ZY, причем кривизна эта может быть неоднородная (иметь разные радиусы)). Затем рассчитывается характеристика направленности на разных частотах и площадь покрытия зала. Поскольку из блоков можно набирать звуковые колонки больших



Рис. 13. Высокочастотный рупор



Рис. 14. Общий вид колонок на стадионе

размеров (с числом элементов от 8 – 10 и больше), то это позволяет озвучивать огромные площади стадионов, киноконцертных комплексов и т.д. (рис. 14).

В криволинейных звуковых колонках остаются те же проблемы, т.е. необходимость уменьшать размеры колонки с увеличением частоты. Один из вариантов ее решения принят в образцах колонок Duran Audio Intellivox Series, где используется расположение излучателей по логарифмическому закону, который обеспечивает большую плотность расположения источников для коротких волн и постепенно расширяющееся их распределение для длинных. Фирма JBL предложила вариант так называемых «спиральных колонок», где угол, под которым расположены отдельные акустические блоки друг к другу, меняется сверху вниз: на вершине колонки блоки под углом 0° друг к другу, при смещении вниз углы увеличиваются как 1; 2° и т.д. Форма колонки имеет вид закручивающейся спирали.

Для регулировки длины звуковой колонки с увеличением частоты используются принципы акустической фильтрации (как выше было показано для прямолинейных колонок) и методы регулировки амплитуды излучателей, например в нижней криволинейной части звуковых колонок, обеспечивающих покрытие ближней зоны, подводимое напряжение к ним уменьшается с частотой.

Интересно, что идея создания градиентных колонок нашла в этих конструкциях свое применение: подбирая блоки в колонке, полностью закрытые или частично открытые сзади (с отверстием на задней крышке), можно сформировать кардиоидную характеристику направленности в горизонтальной плоскости, что позволяет так подобрать расположение микрофонов в зале, чтобы они находились в нулевой зоне, и тем самым уменьшить обратную связь. Примером могут служить колонки фирм Meyer Sound и Nexo.

Преимуществом криволинейных звуковых колонок является также возможность их гибкой установки под разными углами к площади зала. Если представить форму характеристики направленности для обычной звуковой колонки в форме эллипса, то можно показать, что площадь озвучения (рис. 15), т.е. площадь сечения это-

го эллипса плоскостью пола, будет зависеть от высоты подвеса колонки, ее угла наклона, ширины главного лепестка направленности. Меняя эти величины, можно увеличивать или уменьшать площадь озвучения, увеличивать длину озвучиваемой зоны и дальность ее расположения и т.д. Возможности варьирования у обычных прямолинейных колонок не очень велики, кроме того, при достаточно большой высоте их подвеса, что обычно обусловлено условиями в зале, под колонкой остается неозвученная зона. Всех этих проблем можно избежать при использовании криволинейных колонок, подбирая их форму, размеры, кривизну и гибкое расположение в зале, можно обеспечить равномерное покрытие любой заданной площади, тем более, что это реализуется в настоящее время с помощью оптимизационных компьютерных программ. Сравнение полярных диаграмм прямолинейных и криволинейных колонок отчетливо видно на рис. 16.

Следует отметить, что в настоящее время для регулирования направления главного лепестка характеристики направленности в современных звуковых колонках используется цифровая обработка звука, т.е. применяются цифровые фильтры, которые осуществляют такое распределение амплитуд и фаз подводимого напряжения, чтобы обеспечить поворот характеристики под заданным углом к поверхности озвучения (beam

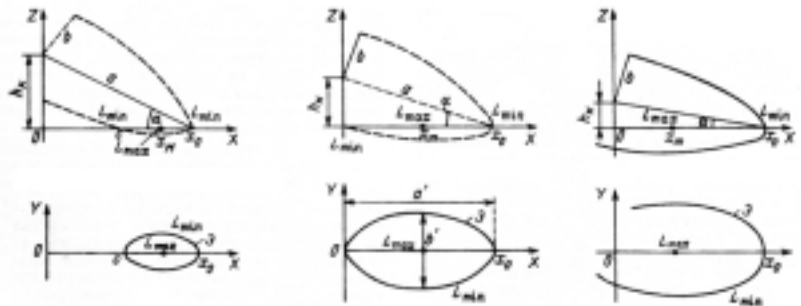


Рис. 15. Изменение площади озвучения от высоты подвеса и угла наклона колонки

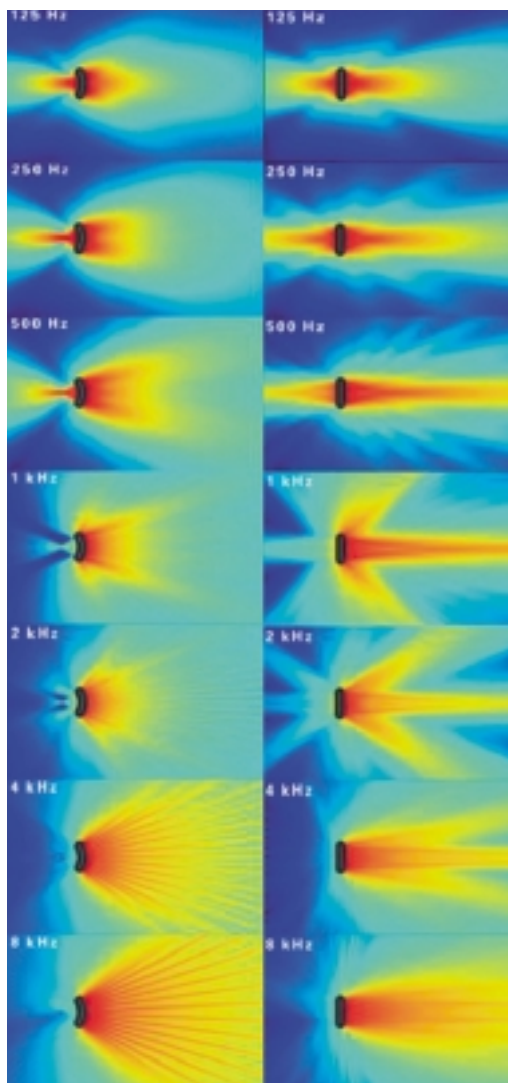


Рис. 16. Сравнение полярных диаграмм криволинейных и прямолинейных звуковых колонок

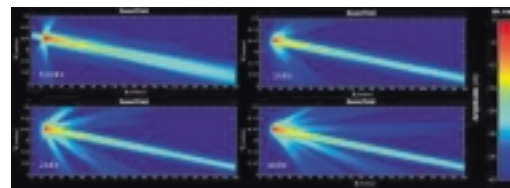


Рис. 17. Поворот главного лепестка характеристики направленности

steering). Пример поворота главного лепестка характеристики направленности под углом 20° на частоте 500 Гц показан на рис. 17. Этот метод хорошо работает до частот примерно 2 кГц. Когда расстояние между громкоговорителями становится больше половины длины волны, появляются боковые лепестки и электронное управление поворотом характеристики направленности (ХП) уже не срабатывает. На низких частотах электронное управление поворотом ХН так же неприменимо, так как для его эффективной работы требуется, чтобы размер колонки был больше длины волны (на частоте 100 Гц длина волны уже 3,4 м).

Однако это направление в проектировании звуковых колонок активно развивается, например в системах Intellivox фирмы Duran Audio используется обработка DSP и усиление для каждого блока громкоговорителей отдельно, что расширяет возможности управления общими характеристиками направленности звуковых колонок.

В настоящее время, кроме фирмы JBL, звуковые колонки такого типа производят Electro Voice, Nexho, L-Acoustics, Martin Audio, Meyer Sound, Duran Audio, Adamson, Bose и др.

Таким образом, звуковые колонки несмотря на достаточно длительную историю их использования, переход на новые технологии, новые принципы конструирования и способы цифрового управления параметрами, находят себе широкие области применения – от небольших речевых аудиторий до огромных стадионов и концертных комплексов.