

Ю. А. КОВАЛГИН
А. В. БОРИСЕНКО
Г. С. ГЕНЗЕЛЬ

АКУСТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ
СТЕРЕОФОНИИ



Ю. А. КОВАЛГИН,
А. В. БОРИСЕНКО,
Г. С. ГЕНЗЕЛЬ

АКУСТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ
СТЕРЕОФОНИИ



Москва «Связь» 1978

32.87
К56
УДК 681.84.087.7

Ковалгин Ю. А. и др.
К56 Акустические основы стереофонии/Ковалгин
Ю. А., Борисенко А. В., Гензель Г. С.— М.: Связь,
1978.— 336 с., ил.

В пер.: 1 р. 30 к.

В книге рассматриваются сущность стереофонического эффекта, создаваемого при воспроизведении вещательных сигналов в малых помещениях типа жилой комнаты, особенности проектирования акустических систем с расширенной зоной стереовосприятия и результаты их субъективных испытаний, структурные схемы и возможности квадрофонических систем.

Книга предназначена инженерно-техническим работникам в области электроакустики и радиовещания, психологии и физиологии слуха, а также может быть полезной студентам старших курсов институтов связи.

К $\frac{30403-082}{045(01)-78}$ 37-78

32.87
6Ф2.7

ИБ № 507

**Юрий Алексеевич Ковалгин,
Андрей Владимирович Борисенко,
Георгий Сергеевич Гензель**

АКУСТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТЕРЕОФОНИИ

Редактор *В. А. Лазарева*
Обл. художника *В. Н. Журавского*
Худ. редактор *А. И. Моисеев*
Техн. редактор *К. Г. Маркоч*

Корректор *И. М. Худякова*

Сдано в набор 24/VIII 1977 г. Подп. в печ. 3/II 1978 г.
Т-01240 Формат 84×108/32 Бумага книжно-журнальная. Гарнитура литер.
Печать высокая 17,64 усл.-печ. л. 18,69 уч.-изд. л. Тираж 18 000 экз.
Изд. № 16953 Зак. № 221 Цена 1 руб. 30 коп.
Издательство «Связь», Москва 101000, Чистопрудный бульвар, д. 2

Типография издательства «Связь» Госкомиздата СССР
Москва 101000, ул. Кирова, 40.

© Издательство «Связь», 1978 г.

Предисловие

В принятом XXV съездом КПСС программном документе «Основные направления развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы» в качестве одной из основных мер социального развития и повышения уровня жизни народа предусмотрено «дальнейшее развитие телевидения и радиовещания, более широкое внедрение цветного телевидения и стереофонического радиовещания».

Стереофоническое воспроизведение звука получило большое признание у широкого круга любителей музыки. С каждым годом совершенствуется техническая база стереофонического вещания, улучшаются форма и организация, а также продолжительность стереофонических передач, неизменно растет выпуск бытовой стереофонической аппаратуры различного класса и назначения. В отличие от звукового кино и многоканальных систем звукоусиления в концертных залах, в радиовещании число каналов передачи сигналов ограничено техническими возможностями и к тому же воспроизведение их осуществляется в жилой комнате, резко отличающейся по своим акустическим свойствам от радиовещательной студии.

Успехи в развитии отечественной стереофонии являются результатом достижений большого числа специалистов, работающих в области акустики и радиовещания, психологии и физиологии слуха, электроники.

Первые опыты широкой демонстрации преимуществ трехканального стереофонического звучания в СССР были осуществлены в 1935 г. в Москве, в Доме Союзов под руководством проф. И. Е. Горона. Они произвели сильное впечатление на слушателей и создали необходимые предпосылки для развития этой области техники. В настоящее время проводятся многие теоретические и экспериментальные исследования, позволяющие совершенствовать системы стереозаписи и вещания, разрабатываются нормы на параметры стереоканалов.

Основы теории и методы реализации многоканальных стереофонических систем для целей звукового кино и звукоусиления в концертных залах разработаны В. В. Фурдуевым.

Глубокое изучение принципов полярной модуляции и возможности ее применения позволили Л. М. Кононовичу реализовать модуляторы и передатчики, используемые в настоящее время в стереофоническом вещании. Под его руководством разработаны также высокочастотные тракты комплекса отечественной аппаратуры для квадрафонического радиовещания.

Значительный вклад в развитие теории и практики стереофонии внесли работы, выполненные Б. А. Адаменко, Б. Г. Белкиным, И. Г. Дрейзенем, П. М. Жмуриным, А. П. Ефимовым, В. С. Маньковским, П. Г. Тагером.

В СССР за последнее десятилетие накоплен значительный опыт в области стереофонии, однако опубликованной литературы недостаточно, несмотря на то, что потребность в ней специалистов, занимающихся разработкой и эксплуатацией этого нового вида аппаратуры, огромна.

В настоящее время в опубликованной литературе достаточно подробно изложены вопросы, связанные с особенностями построения и эксплуатации высокочастотного тракта стереофонического радиовещания, с разработкой норм на параметры стереоканалов и с изложением методов звукорежиссерской обработки материала при создании стереофонических программ.

Психофизиологические же особенности слухового восприятия стереофонического звучания, воспроизводимого в жилом помещении радиослушателя, сущность получаемого в этих условиях стереофонического эффекта, особенности разработки акустических систем для стереофонии и методы оценки их качества, возможности квадрафонических систем обсуждались лишь в ряде журнальных статей, малодоступных широкому кругу читателей. Кроме того, даже специалистам порой трудно разобраться в этих публикациях: отдельные авторы пользуются совершенно разной терминологией, приводимые ими результаты порой принципиально расходятся. Все это несомненно затрудняет использование этих материалов при разработке новых более совершенных образцов стереофонического оборудования.

Предлагаемая книга имеет своей целью восполнить этот пробел. В ней нашли отражение не только результаты более чем десятилетних исследований авторов, посвященных рассмотрению акустических основ стереофонии, но также систематизированы и проанализированы

сведения разрозненных публикаций, имеющихся в этой области техники.

Многие результаты получены авторами методом субъективно-статистических экспертиз. При этом для тех разновидностей экспертиз, где нет специального пояснения, общее число экспертопоказаний выбрано исходя из условия получения доверительного интервала $\pm 0,05$ при достоверности не менее 0,95. Методика проведения экспертиз и применяемая при этом аппаратура изложены отдельно для каждого частного случая.

Авторы стремились к тому, чтобы изложенный в книге материал оказался полезен не только для исследователей, занимающихся изучением проблем стереофонии и пространственного слуха, но также для специалистов, обеспечивающих разработку и эксплуатацию стереофонического оборудования как студийного, так и бытового назначения.

Авторы выражают глубокую признательность Б. Я. Меерзону за тщательный просмотр рукописи и ценные замечания, способствовавшие улучшению книги.

Отзывы о книге просим направлять в издательство «Связь»: 101000, Москва, Чистопрудный бульвар, 2.

Авторы

Г л а в а 1

Восприятие стереофонического звучания

1.1. Звуковой образ при естественном слушании

Предположим, что мы находимся в хорошем концертном зале и слушаем звучание симфонического или эстрадного оркестра. Звуки инструментов, расположенных на эстраде по ее ширине и в глубину, доходят до слушателя из разных мест пространства. Далеко не все из них приходят к слушателю по кратчайшим путям от исполнителей, большая их часть поступает к нему со всех возможных направлений после многократного отражения от поверхностей этого помещения. Вся эта совокупность разнородных сигналов, воздействуя на сенсорный аппарат слушателя, после соответствующей обработки в периферических отделах, а затем и в высших нервных центрах слухового анализатора рождает целый комплекс ощущений в виде «живой» объемной звуковой картины, непрерывно изменяющейся как во времени, так и в пространстве. Несмотря на кажущееся единство, всю эту совокупность слуховых ощущений можно разделить на ряд отчетливо выделяемых компонент.

Известно, что слушатели, сидящие в первых рядах концертного зала, отчетливо воспринимают расположение отдельных инструментов по фронту и глубине; на местах, более удаленных от эстрады, отчетливая локализация отдельных инструментов затруднена, здесь слушатели более четко ощущают протяженность оркестра. Пространственное впечатление — важнейшая особенность естественного слушания. Один из виднейших отечественных звукорежиссеров Д. И. Гаклин писал [18], что «совершенно закономерным для современных композиторов являются встречающиеся указания на титульных листах их партитур для оригинальных составов инструментов и исполнителей, как они должны быть размещены на эстраде и сцене. Это веяние времени является не модой, а все развивающейся у художников потребностью призвать к себе на службу и в большей сте-

пени, чем раньше, использовать еще одно средство воздействия на слушателя — раздельность звучания, которое может подчеркнуть конфликтность различных тем, их объединение, сопоставление, противопоставление и т. д.».

Восприятие направлений, локализация источников звука в пространстве возможны благодаря так называемому бинауральному эффекту. При этом явление азимутальной локализации объясняется [5] действием только двух факторов: бинауральными временной (Δt_6) и интенсивностной (ΔL_6) разностями сигналов, воздействующих на левое и правое ухо слушателя. Изменения величин ΔL_6 и Δt_6 , по данным Мертенса [110], в зависимости от азимутального угла φ реального источника звука приведены на рис. 1.1. Эти кривые получены экспериментальным путем в заглушенной камере. Очевидно, что каждому угловому положению реального источника звука соответствуют вполне определенные значения ΔL_6 и Δt_6 . На низких частотах (ниже 500 Гц) направление на источник звука определяется, главным образом, бинауральной временной разностью. В диапазоне средних частот (500—5000 Гц) обе величины (ΔL_6 и Δt_6) приблизительно в равной степени способствуют созданию ощущения направления. На высоких частотах (выше 5000—6000 Гц) эффект азимутальной локализации определяется величиной ΔL_6 . Локализация звуков с частотой ниже 100—150 Гц практически невозможна.

Точность определения направления прихода звука в горизонтальной плоскости составляет 3—4°, в вертикальной же плоскости эта особенность выражена значительно слабее и не превышает, как правило, 10—15°.

Возможность слуховой оценки расстояния до источника звука (глубинная локализация) при естественном слушании базируется на способности органа слуха определять некоторые характеристики звукового поля. Согласно [49], определение расстояния l производится по низкочастотным переходным процессам благодаря способности органа слуха регистрировать не только звуковое давление, но и колебательную скорость частиц воздуха. При этом определение этого расстояния становится возможным только в непосредственной близости от источника, так как в дальней зоне звуковое давление и колебательная скорость связаны линейной зависимостью. Однако определение расстояния до источника возможно и в том случае, когда в сигнале отсутствуют

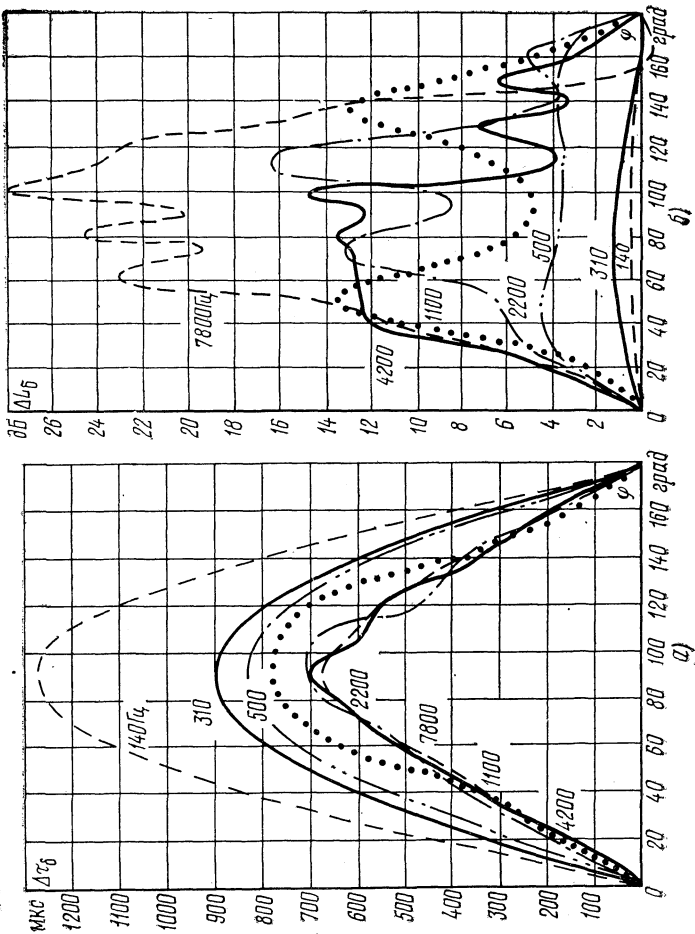


Рис. 1.1. Зависимость бинауральных временных (а) и интенсивностных (б) разностей сигналов от азимутального положения реального источника звука

низкочастотные составляющие. Например, слушатель уверенно определяет расстояние до громкоговорителя, если последний излучает только средние и верхние частоты. Интересно, что, в отличие от азимутальной, глубинная локализация возможна и при моноуральном слушании, но бинауральное восприятие существенно повышает точность и облегчает слуховую оценку расстояния. Согласно гипотезе [96], орган слуха, имея два разнесенных приемника звука, способен, подсознательно вычисляя величины $\Delta\tau_6$ и $I_{cp}/\Delta I$, определять расстояние до звучащего объекта

$$l = 2c \Delta\tau_6 \frac{I_{cp}}{\Delta I}, \quad (1.1)$$

где I_{cp} — среднее значение интенсивностей сигналов, воздействующих на левое и правое ухо слушателя; ΔI — бинауральная разность интенсивностей; c — скорость звука. Теоретический анализ выражения (1.1) показывает, что при $l > 10$ м необходимо предъявлять очень жесткие требования по разрешающей способности временных интервалов и приращений интенсивности, значительно превышающие возможности человека. Однако при значениях l порядка единиц метров необходимая разрешающая способность находится в пределах, доступных человеческому уху. При этом погрешность при определении расстояния путем выполнения этих вычислений может составлять порядка 50%. Этот способ, по-видимому, играет существенную роль при определении расстояния до звучащего объекта, находящегося в условиях открытого пространства или заглушенной камеры.

В закрытых помещениях, где наряду с прямым звуком на слушателя воздействует значительное число отраженных, наиболее важным фактором, обуславливающим глубинную локализацию, становится реверберация. При изменении расстояния l до звучащего объекта слушатель воспринимает прямые и отраженные звуки в различном соотношении, зависящем от расстояния до него и свойств данного помещения. Используя известное определение акустического отношения, можно записать

$$l = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \frac{\alpha Q_\Sigma}{50(1-\alpha)}}, \quad (1.2)$$

где $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ — отношение плотностей энергий отраженных и прямого звуков, известное под названием акустического

отношения; α — средний коэффициент звукопоглощения; Q_{Σ} — площадь всех поверхностей помещения.

В естественных условиях глубинная локализация не отличается большой точностью, это отмечают все исследователи.

Несмотря на то что оркестр включает в себя большое число инструментов, отличающихся по тембру и структуре звука, орган слуха человека в комплексе с другими анализаторами, прежде всего со зрительным, непрерывно следя за всеми нюансами динамики объемной звуковой картины, воспринимает ее как единое целое, объединяя сигналы отдельных инструментов в ансамбль по общим признакам, например по сходству их огибающих. Наряду с этим, за счет присущей слуховому анализатору избирательной способности слушатель может выделить из воспринимаемого звучания интересующий его инструмент. Это качество восприятия, которое звукорежиссеры и музыканты называют прозрачностью звучания, зависит при естественном слушании от пространственного расположения источников звука, спектральных и временных свойств соответствующих им сигналов и соотношения уровней последних. Прозрачность звучания — одна из важнейших особенностей естественного слушания.

Эти два противоположных по своей природе процесса — объединение составляющих сложного звучания в единое целое и разделение его на компоненты — лежат в основе эстетического восприятия непрерывно изменяющейся во времени и в пространстве звуковой картины, улучшая прозрачность и слитность звучания всей панорамы в целом.

Качество звучания во многом зависит от акустических особенностей помещения, где находятся исполнители. Известно, что звучание ансамбля на открытом воздухе оказывается много беднее и производит гораздо меньшее эстетическое впечатление, чем звучание этого же ансамбля в концертном зале. Отзвуки, воспринимаемые вслед за прямым звуком и отличающиеся от него по форме спектра, уровню, времени запаздывания и направлению прихода, образуют пространственный реверберационный процесс в закрытом помещении. Последний не только стимулирует глубинную локализацию, но и значительно улучшает (по сравнению с прослушиванием на открытом воздухе) тембры звучания отдельных инструментов и голосов, делает их более богатыми и тонь-

ше нюансированными. Кроме того, дискретные отражения более высокого уровня (так называемые энергетические пики реверберационного процесса), воспринимаемые на более или менее слитном реверберационном фоне, наряду со структурой первых отражений, способствуют достаточно точной слуховой оценке объема зала. Особенности временной структуры реверберационного процесса несут впечатление о размерах концертного зала и свойственной ему специфичности звучания — гулкости, теплоты, мягкости, светлости и т. п. Различия же в направлениях прихода каждого из отзвуков способствуют (за счет пространственной избирательности слуха) лучшей «усвояемости» слушателем упомянутых выше акустических характеристик концертного зала [105]. Существенное значение имеет при этом и степень диффузности звукового поля. Все эти факторы создают так называемую «акустическую атмосферу» при восприятии музыки в концертном зале.

Тембр и акустическая атмосфера также являются важнейшими компонентами слухового восприятия при естественном слушании.

1.2. Типы электроакустических систем звукового вещания

Электроакустические системы, применяемые в вещании, предназначены для передачи звука из первичного помещения (концертного зала, радиовещательной студии) во вторичное (обычная жилая комната радиослушателя). Эти системы должны обеспечить: возможно более полную и точную передачу всего комплекса ощущений, свойственных естественному слушанию: пространственного впечатления, прозрачности звучания, естественности тембров инструментов и голосов, музыкального равновесия отдельных элементов сложного звучания, а также акустических свойств студии; создание у слушателя «эффекта присутствия», т. е. иллюзии переноса его в первичное помещение с теми или иными акустическими свойствами; широкие возможности для творческой фантазии звукорежиссера и создание звуковых эффектов, осуществление которых затруднено или даже невозможно в условиях естественного слушания.

Звуковое поле, создаваемое, например, в радиовещательной студии при исполнении речевой или музыкальной программы и характеризующееся обычно изменением

как во времени, так и в пространстве мгновенных значений или уровней звукового давления, назовем первичным. В отличие от этого, звуковое поле, создаваемое искусственными источниками звука — громкоговорителями, в жилой комнате радиослушателя назовем вторичным. Даже при безупречных качественных показателях электроакустического тракта воссоздать во вторичном помещении все акустические особенности первичного

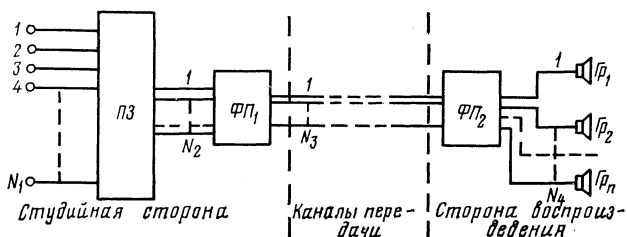


Рис. 1.2. Общая структурная схема электроакустической системы звукопередачи

звукового поля практически невозможно. Это объясняется тем, что расположение и свойства естественных и искусственных источников звука, объемы и формы первичного и вторичного помещений, имеющиеся в них звукопоглощающие материалы существенно различны.

Электроакустическую передачу следует рассматривать не как пассивное отображение первичного звукового поля студии, а как процесс активной творческой переработки (звукорежиссуры) исходной звуковой информации с целью конструирования (при воспроизведении на приемной стороне) нового звукового поля, часто совершенно непохожего на исходное (первичное).

Несмотря на большое разнообразие существующих типов электроакустических систем, применяемых в звуковом вещании, их общая схема построения может быть представлена рис. 1.2, где 1, 2, 3, ..., N_1 —входные каналы для подключения источников сигналов (микрофонов, магнитофонов, ревербераторов и т. д.); ПЗ — пульт звукорежиссера, с помощью которого производится формирование исходных вещательных сигналов (N_2); ФП₁ и ФП₂—функциональные преобразователи, позволяющие сократить число требуемых каналов передачи (N_3) и получить число воспроизводимых в жилом помещении сигналов (N_4), отличающихся от передаваемых, либо из-

Таблица 1.1

Общие сведения, характеризующие структуру электроакустических систем звукового вещания

| Название системы | N_2 | Наличие $\Phi П_1$ | N_3 | Наличие $\Phi П_2$ | N_4 | Условное обозначение структуры системы |
|---|-------|--------------------|-------|--------------------|------------------|--|
| Обычная монофоническая | 1 | Отсутствует | 1 | Отсутствует | 1 | 1-1-1 |
| Монофоническая система объемного звучания | 1 | Отсутствует | 1 | Отсутствует | $N_4 = N > 1$ | 1-1-N |
| Моноамбифоническая | 1 | Отсутствует | 1 | Имеется | $N_4 = N \geq 1$ | 1-1-N* |
| Псевдостереофоническая | 2 | Имеется | 1 | Имеется | 2 | 2*-1-2* |
| Квазистереофоническая | 1 | Отсутствует | 1 | Имеется | 2 | 1-1-2* |
| Обычная стереофоническая | 2 | Отсутствует | 2 | Отсутствует | 2 | 2-2-2 |
| Квазистереоамбифоническая система Т. Корна | 2 | Отсутствует | 2 | Имеется | 3 | 2-2-3* |
| Квазистереоамбифоническая система Л. Кейбса | 2 | Имеется | 2 | Имеется | 4 | 2*-2-4* |
| Стереоамбифоническая система Л. Кейбса | 4 | Имеется | 2 | Имеется | 4 | 4*-2-4* |
| Псевдоквадрафоническая | 2 | Отсутствует | 2 | Имеется | 4 | 2-2-4* |
| Матричная квадрафоническая | 4 | Имеется | 2 | Имеется | 4 | 4*-2-4* |
| Дискретная квадрафоническая | 4 | Отсутствует | 4 | Отсутствует | 4 | 4-4-4 |

менить структуру последних. Обычно выполняются условия $N_1 \gg N_2$, $N_2 \geq N_3$, $N_4 \geq N_3$, весьма часто выполняется условие, когда $N_2 \neq N_3 \neq N_4$.

В дополнение к общей схеме в табл. 1.1 приведены основные сведения, поясняющие структурные особенности построения каждой из известных в настоящее время электроакустических систем звукового вещания. При этом названия последних сохранены такими, как они предложены в ранее опубликованных работах. Знак * в табл. 1.1 означает наличие функционального преобразования.

Заметим, что отличия в названиях систем, имеющих одинаковые условные обозначения структурной формы (например, стереоамбиофоническая и матричная квадрафоническая), объясняются тем, что в них используется, во-первых, разное расположение микрофонов в первичном звуковом поле и громкоговорителей в помещении прослушивания и, во-вторых, неодинаковое функциональное преобразование над сигналами. Названия системам звукопередачи (см. табл. 1.1) даны их авторами, как правило, в соответствии с характером (видом) передаваемой информации.

Электроакустические системы по числу каналов передачи можно разделять на одноканальные, двухканальные и четырехканальные, которые, в свою очередь, подразделяются на отдельные разновидности (см. табл. 1.1, графа 1), отличающиеся характером передаваемой информации. Весьма часто в технической литературе стереоамбиофонические и матричные квадрафонические системы называют квазиквадрафоническими. Кроме того, псевдоквадрафонические, дискретные и матричные квадрафонические системы называют просто квадрафоническими по числу каналов воспроизведения.

1.3. Монофонические и обычные стереофонические системы

Монофоническими называются электроакустические системы, в которых передающая и приемная стороны связаны одним каналом звукопередачи ($N_2 = N_3 = 1$), каково бы ни было число каналов приема (N_1) и воспроизведения (N_4). При этом громкоговорители на выходной стороне излучают один и тот же сигнал.

В таких системах для получения оптимального монофонического сигнала в зависимости от вида программы

и акустических свойств первичного помещения может использоваться либо один, либо (как это чаще всего бывает) значительное число микрофонов. Сигналы с их выходов, отрегулированные по уровню, форме частотной характеристики, временной структуре, динамическому диапазону, суммируются в конечном итоге в один канал. При этом частотная характеристика последнего (вследствие интерференционных явлений, обусловленных сложением сигналов, воспринятых разными микрофонами от одного и того же источника звука) будет иметь неравномерности даже при идеальной частотной характеристике каждого из этих микрофонов.

Воспроизведение монофонического сигнала во вторичном помещении чаще всего осуществляется с помощью одного громкоговорителя, что лишает слушателя многих особенностей, свойственных естественному восприятию в концертном зале. Прежде всего оказывается утраченным ощущение пространственности звуковой картины. Вся панорама оркестра оказывается сжатой в одну точку и воспринимается из единственного направления — громкоговорителя. Прозрачность звучания и естественность передачи тембров инструментов и голосов оказывается также недостаточной. Практически невозможно восприятие акустической обстановки первичного помещения, так как вся воспринятая находящимися здесь микрофонами последовательность отражений приходит к слушателю при воспроизведении также из одного направления — громкоговорителя. Потеря пространственной картины прихода отзвуков затрудняет их восприятие из-за сильного маскирующего действия прямых звуков.

Применение нескольких разнесенных громкоговорителей создает ощущение звучащего объема, устранивая в некоторой степени неприятное ощущение, вызываемое сжатием всего передаваемого ансамбля в одну точку. Конечно, ни о каком разделении в пространстве отдельных инструментов ансамбля не может быть и речи.

В силу изложенных выше причин эстетическое удовольствие, получаемое при монофоническом воспроизведении, значительно уступает естественному слушанию. По образному выражению Д. И. Гаклина [18] монофоническое воспроизведение можно назвать всего лишь «открытым окном в концертный зал».

Наряду с монофоническими существует еще целый ряд одноканальных систем (см. табл. 1.1), использую-

щих то или иное дополнительное функциональное преобразование исходного сигнала для улучшения качества передаваемого звучания. Структурные схемы этих систем и обеспечиваемые ими возможности достаточно подробно описаны в [56]. Заметим только, что использование моноамбиофонических систем позволяет добиться гулкости и объемности звучания, свойственной в какой-то определенной степени концертному залу. Псевдостереофонические системы способны лишь весьма приближенно имитировать передачу пространственной информации по фронту. Они дают «плоское изображение» распределения по фронту отдельных частотных составляющих всей совокупности инструментов ансамбля, а не каждого из них в отдельности. Очень часто при воспроизведении один и тот же музыкальный инструмент слышен то справа, то слева, в зависимости от того, какие звуки он издает — высокие или низкие. Несколько большие возможности существуют у псевдостереосистем и по передаче акустической атмосферы первичного помещения. Действительно, здесь имеются уже два (или несколько) путей прихода первичного реверберационного процесса от громкоговорителей к слушателю. Кроме того, реверберационные продолжения сигналов в каналах воспроизведения отличаются по крайней мере амплитудно-частотными характеристиками. Эти факторы в какой-то мере способствуют восприятию акустической атмосферы первичного помещения.

В квазистереофонических системах [56] претерпевают существенные преобразования уровни и времена прихода отдельных отзвуков, составляющих первичный реверберационный процесс. Эти системы способны в значительно большей степени, чем монофонические, передать акустическую обстановку большого концертного зала, но не дают возможности пространственно разделить отдельные звуковые образы, составляющие ансамбль.

Структурные схемы обычных стереофонических систем приведены на рис. 1.3. Здесь с помощью микрофонных систем осуществляют, ставшее уже традиционным, разделение всей принимаемой информации на «левую» и «правую» (АВ, ХУ, смешанные) либо на «суммарную» и «боковые» (MS). В последнем случае для получения сигналов левого и правого каналов необходимо дополнительное суммарно-разностное (СПП) преобразование сигналов *M* и *S*. Особенности использования и размеще-

ния микрофонных групп в первичном помещении при двухканальной стереофонии будут рассмотрены в гл. 3. Заметим лишь, что здесь соотношения составляющих, связанных с прямыми и отражёнными звуками в каж-

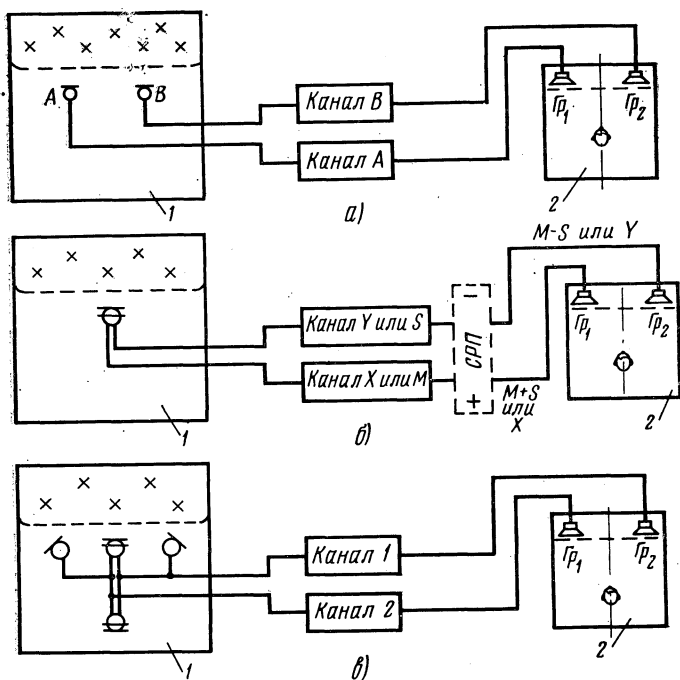


Рис. 1.3. Структурные схемы обычной стереофонической системы звукопередачи:
 а — система АВ; б — система XY (или MS); в — смешанная система

дом из двух каналов, примерно одинаковы. Звуковоспроизведение осуществляется с помощью громкоговорителей левого (Gr_1) и правого (Gr_2) каналов. Они устанавливаются перед слушателем и могут быть выполнены в виде:

разнесенной системы, состоящей из двух отдельных громкоговорителей, устанавливаемых на некотором расстоянии друг от друга;

совмещенной системы, когда громкоговорители левого и правого каналов конструктивно объединены в одном общем корпусе, здесь же обычно располагается и

электрическая часть стереоприемника, магнитофона или электропроигрывателя;

комбинированной системы, в которой низкочастотные головки громкоговорителей размещены вместе с электрической частью (в одном корпусе), а среднечастотные и высокочастотные выполнены в виде отдельных громкоговорителей, имеющих достаточно малые габариты.

Выполненные авторами методом субъективно-статистических экспертиз исследования предпочтительности каждой из этих трех систем воспроизведения показали уверенное предпочтение (для большинства программ) разнесенной системы. Поэтому последняя и использовалась во всех дальнейших исследованиях.

Значительное число работ [6, 19, 20] посвящено изучению особенностей слухового восприятия стереофонических программ, сравнительной оценке стереофонического и монофонического звучаний. Их анализ позволяет прийти к выводу, что в состав стереофонического эффекта входят следующие основные особенности (компоненты): а) пространственное впечатление, когда источники звука оказываются разнесенными как по фронту на линии, соединяющей громкоговорители, так и в глубину от нее, причем местоположения источников в этой области пространства могут быть четко локализованы; б) очень высокая степень прозрачности звучания, благодаря чему легко осуществляются выделение и раздельное восприятие инструментов или их групп на фоне ансамбля; в) правильность передачи тембров инструментов и голосов; г) значительно более лучшее, чем при монофонической передаче, восприятие акустической обстановки первичного помещения.

Очевидно, что весь этот комплекс слуховых ощущений, отличающих стереофоническое звучание от монофонического, есть результат различия сигналов стереопары. Перечислим основные особенности сигналов двухканальной звукопередачи: а) наличие статистической связи для пар сигналов, формирующих отдельные звуковые образы пространственной панорамы; эта величина, оцениваемая значением коэффициента корреляции R , как правило, различна для сигналов, соответствующих отдельным источникам панорамы; б) наличие отличающихся как по величине, так и по знаку разностей по времени поступления ($\Delta\tau$) и по уровню (ΔL) для пар канальных сигналов, формирующих отдельные звуковые образы стереопанорамы; в) определенное (отличное от

монофонического) соотношении уровней сигналов отдельных составляющих элементов сложного звучания, необходимое для достижения музыкального баланса и оптимальной прозрачности; г) различие временных структур реверберационных продолжений левого и правого каналов стереопары.

Связь особенностей слухового восприятия, составляющих стереофонический эффект, с параметрами стереосигнала показана в табл. 1.2. Заметим лишь [105], что стереопередача из заглушенной камеры дает пространственную панораму, совершенно лишенную «глубины». При этом все кажущиеся источники звука воспринимаются на линии базы громкоговорителей. Это доказывает, что при стереопередачах второе измерение (локализация в глубину от линии базы) пространственной панорамы полностью «управляется» реверберационным процессом первичного помещения, в то время как бинауральные временные Δt_6 и интенсивностные ΔL_6 различия сигналов прямых звуков каждого из каналов стереопары способствуют оценке расстояния [см. ф-лу (1.1)] от слушателя до линии базы громкоговорителей Gr_1 и Gr_2 .

Таблица 1.2

Связь особенностей слухового восприятия с параметрами стереосигнала

| Компоненты стереоэффекта | Носители информации |
|--|--|
| Пространственное впечатление: протяженность кажущегося источника звука азимутальная локализация глубинная локализация | Величина коэффициента корреляции R сигналов, формирующих этот источник Величины ΔL и Δt Значения Δt_6 , $I_{cp}/\Delta I$ и величина акустического отношения ($\varepsilon_1/\varepsilon_2$) |
| Прозрачность звучания | Величины ΔL и Δt ; соотношение уровней громкости источников, составляющих стереопанораму; акустический баланс системы воспроизведения |
| Естественность и богатство тембров Акустическая атмосфера | Частотные и временные свойства сигналов стереопары Временные и интенсивностные различия реверберационных продолжений сигналов стереопары |

Пространственное восприятие вследствие присущей органу слуха избирательной способности по направлению (см. гл. 4) уменьшает взаимное маскирующее действие звуковых образов панорамы. При этом не только повышается прозрачность звучания, но и улучшаются также условия для восприятия тембров инструментов и голосов. В этом отношении весьма убедительны результаты работы [134]. В концертном зале в присутствии 130 экспертов играл инструментальный квартет. В

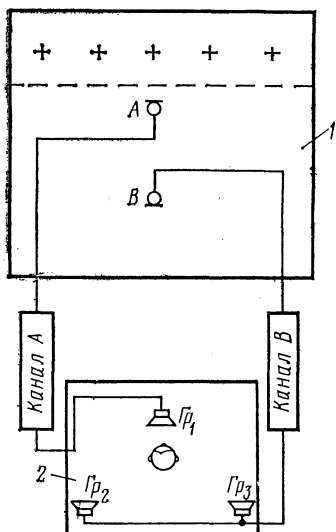


Рис. 1.4. Структурная схема системы Т. Корна:

1 — первичное помещение; 2 — вторичное помещение

определенные (не известные экспертам) моменты времени один из музыкантов начинал создавать видимость исполнения, в то время как его партия воспроизводилась в записи. Важно отметить, что запись была монофонической и воспроизводилась звуковой колонкой, расположенной вблизи данного исполнителя. Задачей экспертов было определить, звучание какого инструмента и в какой момент времени воспроизводилось магнитофоном. В результате экспертизы выяснилось, что слушатели не в состоянии различать «живое» исполнение и воспроизведение фонограммы при сохранении пространственного расположения источника звука неизменным (лишь три эксперта дали правильные ответы).

Представленное на рис. 1.3 использование двух каналов не является единственно возможным. Например, в системе, предложенной в [56], также являющейся по своей структуре двухканальной (см. табл. 1.1), в отличие от обычной стереофонической, канал А служит для передачи преимущественно прямых звуков, канал В — отраженных (рис. 1.4). Это достигается выбором формы характеристик направленности микрофонов и особенностями их расположения в первичном помещении. При одном включенном канале А все инструменты локализируются слушателем в громкоговорителе канала А. При

включении канала *B* слушатели утверждают, что музыкальные инструменты «вышли из громкоговорителя канала *A* и заняли значительное пространство перед ними». Однако, в отличие от обычной стереофонии, они не могли четко указать местоположения отдельных инструментов в пространстве, воспринимая всю их совокупность как единый объемный звуковой образ. Далее этот опыт был расширен. Слушателям вслед за этим звучанием был дан тот же отрывок, но записанный в условиях общепринятого расположения микрофонных групп и громкоговорителей (см. рис. 1.3). При этом была отмечена значительно лучшая передача акустической обстановки первичного помещения системой *T*. Корна.

Результаты этих исследований свидетельствуют о том, что простейшие двухканальные системы, имеющие структуру типа 2-2-2, не способны в равной степени передать все особенности, свойственные слуховому восприятию в концертном зале с хорошей акустикой. Именно это и явилось основной причиной разработки новых, более совершенных квадрафонических систем.

1.4. Предпочтительность стереофонического звучания

В настоящее время единственно возможным методом оценки качества звучания являются субъективно-статистические экспертизы. При этом наиболее распространено сравнительное прослушивание пар вариантов звучания с оценкой их по предпочтительности, т. е. в целом по всем свойствам без подразделения последних.

Напомним, что предпочтительностью называется отношение числа экспертопоказаний за данную систему передачи звука (при сравнении с другой) к общему числу экспертопоказаний [19].

Здесь и ниже назовем предпочтительность, равную 50%, неуверенной (так как при этом предпочтение каждого из двух сравниваемых вариантов равновероятно) и равную 75% — уверенной. Помимо этого, уверенность предпочтения можно охарактеризовать также способностью слушателя опознавать звучание той или иной системы без непосредственного сравнения с другой [105]. По аналогии с вышеизложенным можно ввести термин «уверенная и неуверенная различимость» в зависимости от процента опознаваемости сравниваемых по предпочтительности пар систем. Очевидно, если при сравнении

двух систем слушатель уверенно предпочитает одну из них, но без возможности сравнения неуверенно опознает звучание ранее предпочтенной системы, то, следовательно, их различие хотя и существует, но выражено недостаточно резко. В то время как система, получившая уверенную предпочтительность при уверенной опознаваемости, обладает явно выраженным качественным преимуществом.

Оценим с этих позиций одноканальные и обычные стереофонические системы звукопередачи. Сравнительное прослушивание простейших монофонических систем воспроизведения, имеющих один акустический агрегат, с обычными стереофоническими, выполненное НИИР совместно с кафедрой радиовещания и акустики МЭИС, показало, что лучшие монофонические системы уступают стереофоническим даже при худших качественных показателях последних.

В табл. 1.3 приведены заимствованные из [6] результаты сравнительного прослушивания монофонического, псевдостереофонического и стереофонического звучаний.

Таблица 1.3

Результаты сравнительного прослушивания

| Типы сравниваемых систем | Предпочтительность, % | | Отсутствие заметной разницы, % |
|---|-----------------------|------|--------------------------------|
| | А | Б | |
| Монофоническая (А) — стереофоническая (Б) | 13 | 67 | 20 |
| Монофоническая (А) — псевдостереофоническая (Б) | 7,5 | 32,5 | 60 |
| Стереофоническая (А) — псевдостереофоническая (Б) | 50 | 16 | 34 |

Из табл. 1.3 следует, что качество звучания псевдостереофонических систем передачи звука уступает стереофоническим и незначительно превосходит монофоническое.

Особый интерес представляют результаты сравнительного прослушивания стереофонического и квазистереофонического звучаний (табл. 1.4). Эти данные заимствованы из работы [105] и позволяют оценивать влияние пространственного разделения звуковых образов стереопанорамы на предпочтительность.

Таблица 1.4

Результаты сравнительного прослушивания

| Положение слушателей относительно громкоговорителей | Предпочтительность, % | | Опознавание звучания стереофонической системы, % |
|--|-----------------------|-------------|--|
| | стерео | квазистерео | |
| Асимметричное | 48 | 52 | 50 |
| Симметричное | 64 | 36 | 84 |

При проведении этих опытов экспертам предлагалось прослушать короткие (длительностью 6—10 с) отрывки программ. Каждый отрывок несколько раз воспроизводился поочередно двумя сравниваемыми системами при использовании одних и тех же громкоговорителей. В первой части исследования слушатели отмечали предпочтительность, во второй — опознавали звучание одной из этих систем (без непосредственного сравнения). Расстояние между громкоговорителями составляло 3 м, а удаление слушателя от линии базы — 4,2 м. Воспроизведение осуществлялось в заглушенной камере.

Сравнительное прослушивание стереофонического и квазистереофонического звучаний (см. табл. 1.4) показало следующее.

1. При асимметричном расположении слушателей относительно громкоговорителей (в работе [105] эксперты располагались против левого звуковоспроизводящего агрегата) оба звучания характеризуются неуверенной предпочтительностью и опознаваемостью, т. е. практически неразличимы. Заметим, что при данном расположении слушателей обе системы не способны донести до слушателя информацию о пространственном разделении отдельных музыкальных инструментов воспринимаемого ансамбля.

2. При симметричном расположении слушателей относительно громкоговорителей стереофоническое звучание обладает явно выраженным преимуществом (предпочтительность 64%, опознаваемость 84%). Здесь стереофоническое воспроизведение обеспечивает возможность пространственного разделения отдельных звуковых образов панорамы, по-прежнему не свойственную квазистереофоническому воспроизведению.

Данные этой работы позволяют предположить, что наличие пространственного разделения звуковых образов является определяющим фактором в восприятии стереофонического эффекта. Для подтверждения этого предположения авторами данной книги было исследовано изменение предпочтительности стереофонического звучания по сравнению с монофоническим в зависимости от места расположения слушателя. Фонограммы для проведения экспертиз были подготовлены звукорежиссером в двух вариантах: стереофоническом и монофоническом. Они имели длительность звучания порядка 20 с и представляли собой симфоническую, эстрадную музыку и хоровое пение. Прослушивание сравниваемых образцов осуществлялось в помещении типа жилой комнаты площадью 26 м². Показания слушателей обрабатывались отдельно для каждого места площади прослушивания, что дало возможность построить зоны равной предпочтительности. Величина базы B громкоговорителей составляла 3 м.

При выполнении этих исследований было установлено, что предпочтительность (стереовоспроизведения перед монофоническим) снижается от 90%, если слушатель находится на оси симметрии громкоговорителей, до 60%, когда он расположен напротив одного из громкоговорителей. При этом зоны наивысшей предпочтительности (свыше 85%) совпадают с зонами качественно правильной локализации, где еще возможно уверенное пространственное разделение звуковых образов, составляющих стереопанораму. Предпочтительность стереовоспроизведения сохраняется при боковом смещении слушателя с оси симметрии Gr_1 и Gr_2 до тех пор, пока ансамбль воспринимается пространственно разделенным хотя бы на две группы. И, наконец, когда число воспринимаемых направлений сокращается до одного, предпочтительность стереовоспроизведения исчезает.

Все изложенное доказывает, что основной причиной предпочтительности стереофонического звучания по сравнению с монофоническим является возможность пространственного разделения по направлениям составных элементов звуковой панорамы.

Несомненная предпочтительность стереофонического звучания позволяет характеризовать внедрение двухканальной стереофонии как значительный качественный скачок в развитии техники радиовещания и звукозаписи.

Г л а в а 2

Локализация кажущегося источника звука при двухканальном воспроизведении

2.1. Кажущийся источник звука

Экспериментально установлено, что при бинауральном предъявлении двух коррелированных сигналов в коре головного мозга происходит их «слияние», в результате чего слушатель воспринимает только один сигнал [1, 72]. Подобные процессы «слияния» характерны не только для слуха, но и для других органов чувств—зрения, осязания [67]. «Слияние» звуковых образов наблюдается даже в тех случаях, когда один из предъявляемых сигналов претерпевает существенные искажения. При слушании реального источника звука бинауральные сигналы всегда коррелированы и, если слушатель обращен лицом к источнику звука, полностью тождественны. Слушательский опыт подсказывает и обратное заключение: если бинауральные сигналы тождественны, источник звука должен находиться точно впереди слушателя¹. Именно слушательский опыт в сочетании со свойствами бинаурального слуха объясняет возникновение такой слуховой иллюзии, как кажущийся источник звука.

Представим себе ситуацию, когда слушатель находится на равных расстояниях от двух громкоговорителей, питаемых одним и тем же сигналом. Суммарные сигналы от обоих громкоговорителей, достигая левого и правого уха слушателя, не имеют различий и у последнего возникает ощущение источника звука, расположенного на середине линии, соединяющей оба громкоговорителя. Положение кажущегося источника звука (КИЗ) может быть изменено, если вводить временной сдвиг Δt между излучаемыми сигналами или изменить уровень одного из них — ΔL . Этот опыт демонстрирует возможность создания у слушателя представлений о различных положениях КИЗ с помощью только двух воспроизводящих устройств. Именно это явление и используется

¹ Точнее, в медианной плоскости; дополнительную информацию о положении источника звука (спереди, сверху или сзади) орган слуха получает, анализируя особенности спектра воспринимаемого сигнала (см. гл. 7).

при стереофоническом воспроизведении для создания у слушателей иллюзии пространственной звуковой панорамы.

Кажущийся источник звука, субъективно воспринимаемый в результате воздействия на входы слухового анализатора (уха) слушателя звуковых полей многоканальной звуковоспроизводящей системы, относится к категории психофизиологических явлений. Поэтому изучение особенностей восприятия стереопанорамы затрагивает вопросы не только технической и музыкальной акустики, но также психологии и физиологии слуха. Так, в ряде работ установлено, что при несоответствии углового положения источников одновременно воспринимаемых зрительной и звуковой информации, головной мозг человека производит «коррекцию», согласующую эти два восприятия. При этом основное значение в оценке направления приобретает зрительный образ [45]. Это же явление может привести к противоположным результатам при воспроизведении стереофонических программ без передачи изображения. В этом случае возможна неуверенная локализация центральных КИЗ стереопанорамы вследствие того, что слушатель видит реальные источники звука (громкоговорители) и знает, что звук может излучаться только с этих направлений. Здесь зрительный образ нарушает слуховую иллюзию. Поэтому многие исследователи рекомендуют по возможности маскировать громкоговорители, оформляя их в виде висящих на стене картин, других декоративных предметов или с помощью звукопроницаемых занавесей (портьер) с тем, чтобы расположение громкоговорителей не привлекало внимания слушателей.

Рассмотренные выше примеры иллюстрируют важную роль психологических аспектов восприятия при изучении стереофонических явлений. Именно поэтому многие вопросы в этой области могут быть решены только экспериментально — методом субъективно-статистических экспертиз.

Следует заметить, что слуховой анализатор, определяя положение КИЗ, оказывается не в состоянии определить происхождение различий в бинауральных сигналах. Различия по интенсивности или по времени между сигналами, достигающими ушей слушателя, могут быть обусловлены как свойствами стереосигнала ($\Delta\tau$ и ΔL), так и местом расположения слушателя относительно громкоговорителей (ΔL_{xy} и $\Delta\tau_{xy}$, имея в виду координаты

точки наблюдения). Это обстоятельство приводит к сильно выраженной зависимости воспринимаемого стереоэффекта от места положения слушателя.

Если слушатель находится на равных расстояниях от громкоговорителей, то $\Delta L_{xy}=0$, $\Delta \tau_{xy}=0$ и положение КИЗ зависит, главным образом, от ΔL и $\Delta \tau$ в излучаемых сигналах. Многочисленные эксперименты показывают, что при таком расположении слушателя КИЗ, находившийся при $\Delta L=0$ и $\Delta \tau=0$ на середине линии, соединяющей оба громкоговорителя (линия базы), при увеличении уровня сигнала одного из громкоговорителей на 12—30 дБ локализуется в направлении того же громкоговорителя. Подобный эффект наблюдается при введении временной разности между канальными сигналами $\Delta \tau=0,7 \div 3$ мс. Такой большой разброс в результатах экспериментов объясняется значительным разнообразием условий их проведения и вызывает необходимость проведения дополнительных исследований. При изменении $|\Delta L|$ и $|\Delta \tau|$ от нуля до указанных значений КИЗ перемещается в пределах всей линии базы.

Ввиду того что при двухканальном воспроизведении звука бинауральные сигналы могут иметь различную степень корреляции, при стереофоническом восприятии могут возникать ощущения, невозможные при естественном слушании, например восприятие противофазных сигналов (см. § 2.6). По мере снижения корреляции между канальными сигналами КИЗ локализуется все менее четко, его ширина (протяженность по азимуту) возрастает и при уменьшении коэффициента корреляции $R(\tau)$ до 0,05—0,15 наступает «раздвоение» КИЗ, когда слышны оба громкоговорителя [2].

2.2. Влияние интенсивностной разности при симметричном¹ положении слушателя

Если звуковые давления p_1 и p_2 , создаваемые соответственно левым и правым громкоговорителями в равноудаленной точке помещения, отличаются по интенсивности на величину

$$\Delta L = 20 \lg \frac{p_1}{p_2} \neq 0,$$

¹ Симметричным будем называть расположение слушателя на оси симметрии системы воспроизведения (рис. 2.1, ось Y). Соответственно асимметричным — расположение в стороне от оси Y . Такую терминологию нельзя считать удачной, но она широко распространена в существующей литературе.

то слушатель, находящийся в этой точке, воспринимает КИЗ не в центре базы, а смещенным на величину S в сторону излучателя более громкого сигнала. Зависимость $S=f(\Delta L)$ смещения КИЗ является весьма важной характеристикой стереовосприятия, оказывающей существенное влияние на требования, предъявляемые к отдельным звеньям системы стереофонической передачи звука.

К числу первых исследований в этом направлении относятся работы В. Сноу [131], К. де Бора [68]. Г. Ол-

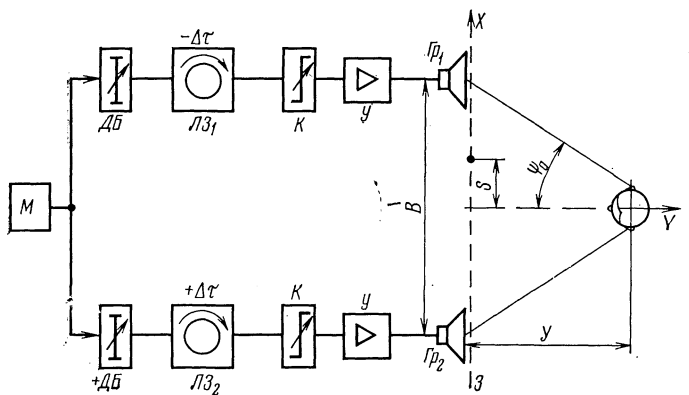


Рис. 2.1. Экспериментальная установка для изучения азимутальной локализации

сона [114] и В. Иордана [97]. Однако эти исследования проводились, как правило, для фиксированного положения слушателя, при одной базе и одном виде испытательного сигнала. Кроме того, все эти и более поздние эксперименты проводились в различных акустических условиях (табл. 2.1). Несмотря на сравнительно большое число публикаций, в которых исследовалась зависимость $S=f(\Delta L)$, их результаты весьма противоречивы и не дают возможности дифференцированной оценки влияния отдельных факторов. Данное обстоятельство заставило повторить подобные исследования, варьируя величину базы громкоговорителей, воспроизводимый сигнал, координаты места нахождения слушателя, помещение прослушивания. Пределы изменения перечисленных параметров в указанных экспериментах выбирались исходя из условий, существующих при воспроизведении стереоэффекта в обычном жилом помеще-

Условия проведения экспериментов (влияние интенсивностной разности)

Таблица 2.1

| Автор | Номер в списке литературы | Ф ₀ , град | B, м | у, м | Воспроизводимый сигнал | Помещение прослушивания | ΔL_m , дБ, при $S_{\text{в}}/S_{\text{б}}/2$ | Число экспертов |
|-------------------|---------------------------|-----------------------|------|----------------------|---|---|--|-----------------|
| К. де Бор | 68 | 26,0 | 3,5 | 3,5 | Речь | — | 15 | — |
| Иордан | 97 | 15,0 | 2,2 | 4,0 | Речь | Помещение 20 м ² | 20 | 4 |
| Ликей | 103 | 50,31 22,17 | 3 | 1,2; 2,4 3,6; 4,8 | Чистые тоны, речь | Открытое пространство | 12—20 | 6—10 |
| Маньковский В. С. | 43 | 26,17 14,7 | 6 | 6,9 12,18 | Импульсы с синусоидальным заполнением | Помещение (зал) $T_{60} = 0,7 \div 0,8$ с | 20 | 66—84 |
| Вендт | 137 | 30,0 | 3,4 | 3,0 | Чистые тоны, шелчки, полосы шума | Заглушенная камера | 10—18 | 8—30* |
| Кацфей Шредер | 99 | 26,0 | 3,5 | 3,5 | Речь, чистый тон | Заглушенная камера | 15 | — |
| Мергенс | 111 | 30,0 | — | — | Импульсы Гаусса | Заглушенная камера | 20—24 | 12 |
| Адаменко Б. А. | 1 | — | 1,8 | 1,5 2,0 | Речь, звучание музыкальных инструментов | Помещение площадью 25 м ² | 15—20 | 15 |

* 40—100 экспертопоказаний на точку.

нии. Этим же объясняется выбор натуральных звучаний в качестве воспроизводимого сигнала.

Целью первой серии экспертиз было изучение стереофонической локализации при действии разности уровней в зависимости от величины базы, места положения слушателя (в пределах оси симметрии системы воспроизведения), а также влияние размеров помещения прослушивания.

Экспертизы проводились в помещении типа жилой комнаты площадью 16 м^2 , а также в помещении больших размеров— 40 м^2 . В качестве воспроизводящей системы использовались два громкоговорителя, акустические оси которых были перпендикулярны линии базы. Систему воспроизведения с таким расположением громкоговорителей в дальнейшем будем называть системой обычного типа, так как такое же расположение излучателей характерно практически для всех существующих стереосистем воспроизведения.

Экспериментальная установка, использованная в данной работе, состояла из одноканального магнитофона M —источника программ (см. рис. 2.1), калиброванных аттенюаторов $ДБ$, имеющих градуировку в децибелах, линейных усилителей $У$ и воспроизводящей системы $Гр_1$ и $Гр_2$ (линии задержки $ЛЗ_1$ и $ЛЗ_2$ и частотные корректоры K , показанные на рис. 2.1, в данном случае были отключены). Громкоговорители воспроизводящей системы были скрыты от слушателей звукопроницаемым занавесом $З$, на котором была нанесена шкала с делениями через 10 см. Перед проведением экспертиз для каждого слушателя регулятором стереобаланса (на рис. 2.1 не показан) устанавливалась «нулевая» разность уровней таким образом, чтобы он мог локализовать КИЗ в направлении центра базы (что соответствует нулевому делению шкалы). С помощью калиброванных аттенюаторов создавались разности уровней 0, 2, 4, 6 дБ и т. д. в случайной последовательности, неизвестной слушателям. В качестве испытательного сигнала во всех экспертизах этой серии использовалась женская речь. Этот вид сигналов, по наблюдениям, характеризуется наиболее уверенной локализацией. Задачей экспертов было определение местоположения кажущегося источника звука относительно шкалы на линии базы.

Рассмотрим влияние величины базы, удаления слушателя и акустических свойств помещения на перемещение КИЗ.

Влияние удаления (y) слушателя от линии базы. В результате проведенных экспериментов установлено, что для относительно малых баз ($B=0,8\div 1,8$ м) характер перемещения КИЗ практически не зависит от положения слушателя на оси симметрии системы воспроизведения, поэтому на рис. 2.2а представлены сред-

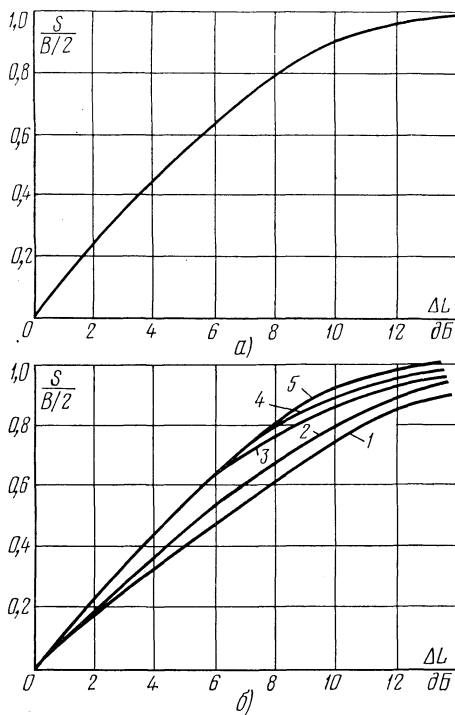


Рис. 2.2. Влияние разности уровней (ΔL) при $\Delta\tau=0$:

а — для баз $B \geq 1,8$ м (усредненная зависимость для разных y); б — для базы 2,8 м: 1 — $y = 1$ м; 2 — $y = 1,5$ м; 3 — $y = 2,5$ м; 4 — $y = 3$ м; 5 — $y = 2$ м

ние результаты, полученные при различных y . По оси абсцисс отложена разность уровней ΔL , по оси ординат — относительное смещение кажущегося источника звука $\frac{s}{B/2}$ (в долях полубазы). Результаты исследований, проведенных при базе 2,8 м (рис. 2.2б), показывают, что при $y > B$ удаление слушателя практически не оказывает влияния на воспринимаемые перемещения КИЗ. При приближении слушателя к системе воспроизведения на расстояние, меньшее, чем длина базы, наблюдается приближение КИЗ к центру базы при той же самой величине разности уровней. Это проявляется

тем в большей степени, чем ближе находится слушатель к системе воспроизведения. Характер изменения наклона кривых $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$, полученных для достаточно большой базы (2,8 м), хорошо согласуется с результатом исследования Ликя [103].

Влияние величины базы. Для того чтобы при различных длинах баз исключить влияние углов ψ_0 (см. рис. 2.1), под которыми видны громкоговорители из точки наблюдения, на формирование бинауральных сигналов, при проведении части экспертиз этой серии соблюдалось условие $y \approx B$ (т. е. $\psi_0 = 27^\circ$). Полученные результаты показали, что увеличение длины базы при

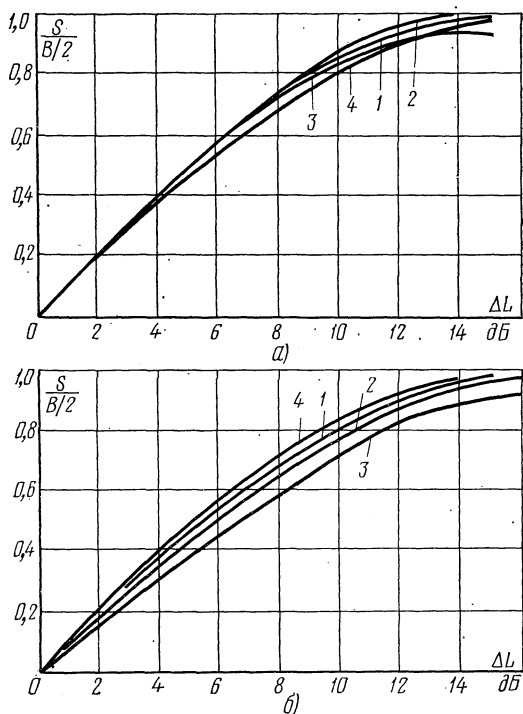


Рис. 2.3. Влияние интенсивностной разности ($x=0$):
 а — для различных баз ($y \approx B$): 1 — $B=0,8$ м; 2 — $B=1,8$ м; 3 — $B=2,4$ м; 4 — $B=2,8$ м; б — для различных условий прослушивания: 1 — помещение площадью 16 м^2 ($B=2,8$ м; $y=2,8$ м); 2 — по данным [68] ($B=3,5$ м; $y=3,5$ м); 3 — открытое пространство [103] ($B=3$ м; $y=2,4$ м); 4 — помещение площадью 40 м^2 ($B=2,8$ м; $y=2,8$ м)

фиксированном значении ΔL приводит к пропорциональному увеличению смещения КИЗ. При этом зависимость относительного смещения КИЗ при изменении ΔL практически не зависит от длины базы (рис. 2.3а). Таким образом, при интенсивной стереофонии изменение длины базы приведет к изменению масштаба пространственной звуковой панорамы.

Влияние акустических свойств помещения. Исследования проводились в двух помещениях площадью 16 и 40 м², стандартное время реверберации которых равнялось соответственно 0,3 и 0,5 с. Сравнение зависимостей $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$, полученных в обоих помещениях, показало, что расхождение соответствующих экспериментальных данных не превышает 5%. В качестве другого примера на рис. 2.3б приведены зависимости перемещения КИЗ от разности уровней для базы 2,8 м и здесь же для сравнения приведены результаты аналогичных исследований де Бора и Ликея, проведенные в различных условиях. Небольшое расхождение результатов позволяет сделать вывод о том, что наличие отраженного звука практически не влияет на азимутальное положение КИЗ. Этот же вывод можно сделать на основании постоянства характера зависимости $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$ для различных расстояний от линии базы до слушателя (а следовательно, и для различных значений акустического отношения). Наличие отраженных звуков (реверберации) в помещении приводит к увеличению протяженности КИЗ (вследствие снижения корреляции между воспринимаемыми сигналами), что снижает точность локализации.

2.3. Влияние временной разности

Для исследования зависимости $\frac{S}{B/2} = f_1(\Delta\tau)$ используется та же установка (см. рис. 2.1), в которой отключаются частотные корректоры, а аттенюаторы устанавливаются в положение, соответствующее значению $\Delta L = 0$ дБ. Эксперименты показывают, что при увеличении $\Delta\tau$ от 0 до $\Delta\tau_m$ КИЗ из центра базы (при симметричном положении слушателя, т. е. при $x=0$) перемещается в положение громкоговорителя, излучающего опережающий сигнал. Однако значения $\Delta\tau_m$ (т. е. $\Delta\tau_{\text{мин}}$ при $S \approx B/2$) отличаются в работах разных авторов (табл. 2.2).

Условий проведения экспериментов (влияние временной разности)

| Автор | Номер в списке литературы | φ_0 , град | В, м | y, м | Воспроизводимый сигнал | Помещение прослушивания | ΔT , мс, при $S_{\text{э}} B/2$ | Число экспертов | | Примечание |
|-----------|---------------------------|--------------------|------|------|------------------------|--|---|-----------------|---|------------|
| | | | | | | | | 2 | 3 | |
| К. де Бор | 68 | 26 | 3,5 | 3,5 | Речь | Не указано | 3 | — | — | — |
| Хаас | 91 | 45 | 3,0 | 1,5 | Речь | Открытое пространство | 1 | 15 | — | — |
| Олсон | 114 | — | 2,7 | 3,0 | | Комната прослушивания площадью 20 м ² | 20 | — | — | — |
| Сноу | 132 | — | — | — | Речь | Не указано | — | 6 | Исследовано сколько значений ΔT | — |
| Ликей | 103 | — | 3,0 | — | Речь | Открытое пространство | 1,2 | 6 | — | — |

Окончание табл. 1.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------|-----|----|-------------------|-----|--|--------------------|----------------------|-------|---|
| Адамен-ко Б. А. | 3 | — | 1,2 1,8 3,0 | 1,5 | Речь, полосы шума, музыкальные фразы | 25 м ² | 1 | 10—35 | — |
| Валлач Ньюман | 136 | — | — | — | Речь | Не указано | 1 | — | Введение Δt обеспечено валось изменением расположения слушателя |
| Каффей Шредер | 99 | 26 | 3,5 | 3,5 | Речь | Заглушенная камера | 3 | — | — |
| Вендт | 138 | 30 | 3,4 | 3,0 | Тоновые импульсы (103, 1030 Гц), щелчки (70—12 000 Гц) | Заглушенная камера | 0,2—1,0 мс 0,7 мс | 10—18 | По 50—80 экспертно-показаний на точку |

Для выяснения связи зависимости $\frac{S}{B/2} = f_1(\Delta\tau)$ с условиями эксперимента была проведена вторая серия экспертиз. Временная задержка обеспечивалась линией задержки типа LC до 4 мс, для больших задержек использовалась двухканальная магнитофонная линия задержки типа АМЗ-17 ($\Delta\tau = \pm 0 \div 150$ мс). Методика проведения экспертиз была такой же, как в предыдущем случае. Слушатель находился на оси симметрии на

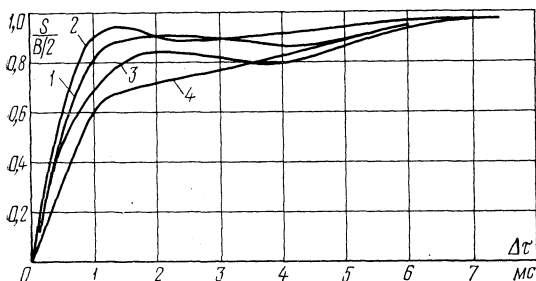


Рис. 2.4. Влияние временной разности (при $x=0$) для сигналов с достаточно однородным спектром мощности:
 $B=1,8$ м; $\Delta L=0$; $x=0$; $y=1,5$ м; 1 — арфа; 2 — рояль; 3 — труба; 4 — кастаньеты

расстоянии $y=1,5$ м от линии базы при $B=1,8$ м. Испытательные сигналы представляли собой законченные музыкальные фразы длительностью 8—10 с и были условно разделены на две группы:

1) сигналы с достаточно однородным спектром мощности, но лежащим в различных участках частотного диапазона;

2) сигналы с резко меняющимися энергетическими соотношениями отдельных частотных составляющих.

Такое разделение сигналов по форме спектра было необходимо для оценки влияния огибающей спектра мощности на особенности азимутальной локализации.

На рис. 2.4 представлены зависимости $\frac{S}{B/2} f_1(\Delta\tau)$ для сигналов первой группы (с однородным спектром мощности). Для них характерно следующее: при изменении $\Delta\tau$ в пределах от 0 до 0,8—1,2 мс наблюдается быстрое перемещение КИЗ до величины порядка $0,8 \frac{B}{2}$; при даль-

нейшем увеличении $\Delta\tau$ до величины, соответствующей «раздвоению» КИЗ, последний перемещается от $0,8 \frac{B}{2}$ до $\frac{B}{2}$. Для сигналов второй группы линейное перемещение КИЗ наблюдается только на начальном участке кривой $\frac{S}{B/2} = f_1(\Delta\tau)$ рис. 2.5. При изменении $\Delta\tau$ в пределах от 0,5—1 до 5—6 мс кривые имеют ярко вы-

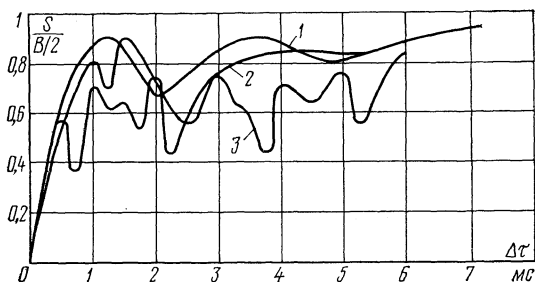


Рис. 2.5. Влияние временной разности (при $x=0$) для сигналов с неравномерным распределением мощности по частоте:

$B=1,8$ м; $\Delta L=0$; $x=0$; $y=1,5$ м; 1 — женская речь; 2 — флейта; 3 — скрипка

раженный индивидуальный характер, причем наблюдается неоднократное приближение КИЗ к центру базы при монотонном росте $\Delta\tau$.

Можно предположить, что изменение величины смещения КИЗ в этом случае связано с поведением функции, содержащей информацию об относительных количествах энергии различных частотных составляющих этих сигналов. Простейшей функцией подобного рода является функция взаимной корреляции канальных сигналов. Для подтверждения этой гипотезы на рис. 2.6 в качестве примера приведены нормированная функция автокорреляции речевого сигнала, полученная экспериментально при времени усреднения 4 с, и более сложная функциональная зависимость вида

$$C(\Delta\tau) = 1 - \frac{|R(\Delta\tau)|}{R_0}$$

(кривая 3). Функция $C(\Delta\tau)$, названная структурной функцией, включает в качестве составного параметра корреляционную функцию и потому также отражает на-

личие флуктуаций в распределении энергии по частоте испытательного сигнала. На этом же рисунке (кривая 1) приведена зависимость азимутальной локализации от временной разности $\Delta\tau$ при воспроизведении этого же сигнала. Нетрудно видеть, что флуктуации в перемещении КИЗ отображаются поведением функции $C(\Delta\tau)$

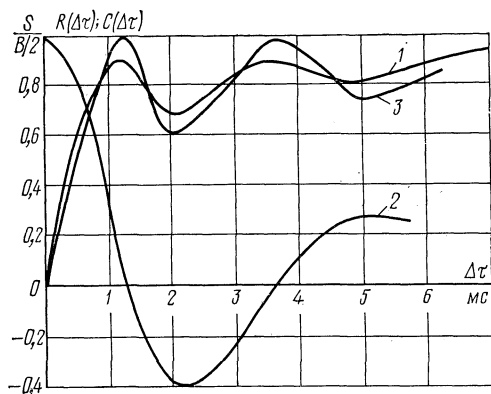


Рис. 2.6. Перемещение КИЗ при изменении $\Delta\tau$ (1), нормированная функция автокорреляции речевого сигнала (2) и его структурная функция (3) при $B=1,8$ м, $\Delta L=0$, $x=0$ и $y=1,5$ м

для воспроизводимого сигнала. Отметим, что при увеличении $\Delta\tau$ снижается корреляция между излучаемыми сигналами, что приводит к ухудшению четкости локализации. Поэтому в экспериментах подобного рода наблюдается довольно большой разброс показаний экспертов.

На всех приведенных графиках (см. рис. 2.2—2.5) даны только половины кривых, так как последние симметричны относительно начала координат.

Объяснение характера временной зависимости локализации следует искать в физиологии слухового анализатора. В одной из своих работ Бекеша [67] высказал гипотезу о «подавлении» задержанного сигнала при бинауральном восприятии прямого и отраженного сигналов. Действительно, сопоставляя графики рис. 2.2 и 2.4, можно убедиться, что задержка в одном из каналов приводит к такому же результату, как и ослабление сигнала в этом же канале. Мнения ряда исследователей [3, 105, 106, 136] сходятся в предположении, что в слуховом анализаторе человека имеется «механизм локализации», который позволяет производить селекцию прямых и запаздывающих звуков. Благодаря этому «ме-

ханизму локализации» возможна слуховая ориентация на действующий источник звука даже в условиях сильной реверберации.

2.4. Особенности азимутальной локализации КИЗ при асимметричном положении слушателя

Симметричное расположение слушателя относительно громкоговорителей каналов является частным случаем, удобным для большинства исследований в стереофонии, но маловероятным в условиях реального прослушивания стереопередач. Большинство слушательских мест в помещении прослушивания расположено вне оси симметрии, поэтому необходимо знать особенности восприятия именно в этих условиях. В большинстве работ, посвященных этому вопросу, исследовались отдельные точки помещения прослушивания [43, 103], что не дало возможности проследить влияние каждой из координат места положения слушателя. Кроме того, имеющиеся в литературе сведения не дают возможности дифференцированной оценки влияния длины базы и акустических условий при каком-либо определенном типе испытательного сигнала. Поэтому авторами была проведена серия экспертиз, целью которой была количественная оценка перечисленных факторов при асимметричном положении слушателя.

Проведенные исследования имели целью не только изучение влияния ΔL в асимметричных условиях (временная разность приводит к аналогичным результатам при большей трудоемкости экспертиз), но и изучение локализационных особенностей стереофонической системы обычного типа в условиях жилого помещения. Этим и объясняется выбор помещений прослушивания и системы воспроизведения. Для уменьшения влияния возможной асимметрии звукового поля в помещении экспертопоказания, полученные для двух симметричных точек: $+x, y$ и $-x, y$, усреднялись.

Зависимость положения кажущегося источника звука от разности уровней, создаваемых излучателями стереофонической системы, представлена в виде семейства кривых на рис. 2.7. По оси абсцисс отложена разность уровней излучаемых сигналов в децибелах, по оси ординат — относительное смещение кажущегося источника (в долях полубазы). Параметром этого семейст-

ва кривых является y —расстояние от слушателя до линии базы при постоянном расстоянии от оси симметрии ($x=0,5$ м). Как видно из приведенного рисунка, при $\Delta L=0$ кажущийся источник локализуется в направлении ближайшего громкоговорителя, т. е. $S=(0,7 \div \div 1,0) \frac{B}{2}$. Заметное перемещение кажущегося источника звука наблюдается только при достижении определенной величины ΔL , при которой действие ΔL_{xy} и

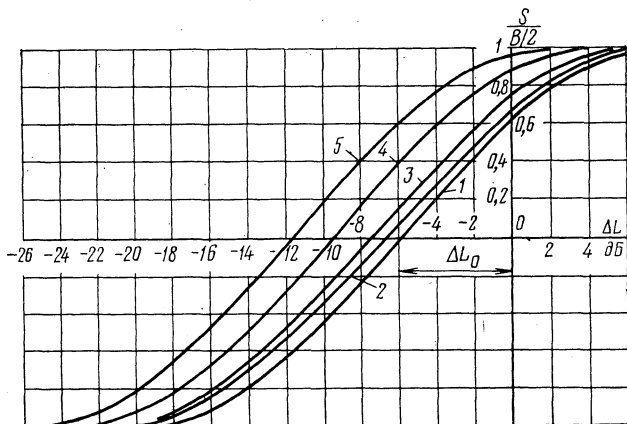


Рис. 2.7. Влияние интенсивностной разности ΔL при $x=0,5$ м; $B=1,8$ м:
1 — $y=3$ м; 2 — $y=2,5$ м; 3 — $y=2$ м; 4 — $y=1,5$ м; 5 — $y=1$ м

$\Delta \tau_{xy}$ на слуховой анализатор окажется компенсированным введенной разностью уровней. При малом удалении слушателя от базы ($y=1$ м, $x=0,5$ м) дополнительные составляющие ΔL_{xy} и $\Delta \tau_{xy}$ достигают значительных величин и для нейтрализации их влияния на положение кажущегося источника потребуется ввести разность уровней порядка 10 дБ.

При увеличении y ($x=\text{const}$) уменьшаются разность расстояний до излучателей и связанные с ней величины ΔL_{xy} и $\Delta \tau_{xy}$, поэтому компенсация их влияния происходит уже при значении $\Delta L=2 \div 3$ дБ (для $y=3$ м). При рассмотрении рис. 2.7 легко заметить, что с увеличением y кривая, отображающая зависимость $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$, не изменяется по форме, но сме-

щается по оси абсцисс влево. Указанное обстоятельство позволяет характеризовать каждую из рассматриваемых кривых величиной ΔL_0 , дБ, необходимой для возвращения КИЗ в центр базы (графически это точка пересечения каждой из кривых с осью абсцисс). Смещение кривых на рис. 2.7 с увеличением удаления слушателя от базы происходит непропорционально величине y . Последнее наглядно показано на рис. 2.8а. Характер этой зависимости становится ясным при сопоставлении ее с рис. 2.8б, где представлены расчетные зависимости, показывающие изменение $\Delta\tau_{xy}$ при изменении величины y . Временная разность, обусловленная разностью хода, связана с величиной базы и координатами точки наблюдения следующим образом:

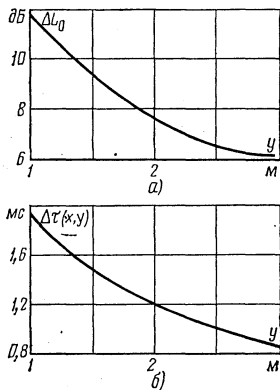


Рис. 2.8. Влияние удаления слушателя (y) (при $x=0,5$ м; $B=1,8$ м): сверху — экспериментальная зависимость $\Delta L_0(y)$, внизу — временная разность $\Delta\tau_{xy}$ в тех же условиях

$$\Delta\tau_{xy} = \frac{l_1 - l_2}{c} = \frac{1}{c} \left[\sqrt{y^2 + \left(\frac{B}{2} + x\right)^2} - \sqrt{y^2 + \left(\frac{B}{2} - x\right)^2} \right]. \quad (2.1)$$

Зависимость локализации кажущегося источника звука от интенсивностной разности при боковом перемещении слушателя определялась при длине базы 1,8 м. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.9. Для сравнения на этом же рисунке приведена аналогичная зависимость δ для значения $x=0$, т. е. для симметричного положения слушателя. При боковом смещении слушателя характер кривых также не меняется, меняется лишь их положение на оси абсцисс. Поэтому, как и в предыдущем случае, их можно характеризовать величиной ΔL_0 . Зависимость этой величины от бокового смещения слушателя представлена на рис. 2.10а. Характер этой зависимости также определяется наличием временной разности, зависящей от координат точки наблюдения, т. е. $\Delta\tau_{xy}$.

Интенсивностная разность ΔL_{xy} играет значительно меньшую роль, чем временная, однако пренебрегать этой величиной нельзя (особенно при малых y и больших x).

Для выяснения влияния величины базы на локализацию кажущегося источника описанные выше экспе-

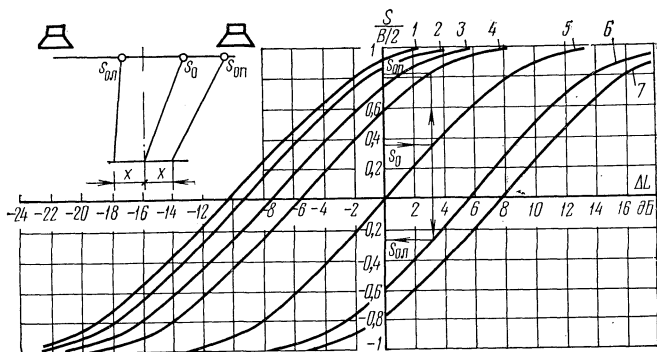


Рис. 2.9. Влияние бокового смещения слушателя при интенсивностной стереофонии ($B=2,8$ м; $y=2$ м):

1 — $x=1,5$ м; 2 — $x=1$ м; 3 — $x=0,5$ м; 4 — $x=0,25$ м; 5 — $x=0$; 6 — $x=-0,25$ м; 7 — $x=-0,5$ м

рименты проводились при четырех различных базах: 0,8, 1,8, 2,4 и 2,8 м. В этом случае кривые, характеризующие зависимости $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$, построенные для одной и той же точки наблюдения, как и в предыдущих случаях, отличаются только положением на оси ΔL . Зависимость ΔL_0 в функции длины базы представлена на рис. 2.10б.

Проведение этой серии экспертиз в двух помещениях площадью 16 и 40 м² позволило получить сведения о влиянии размеров помещения на локализацию. Сравнение зависимостей $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$, построенных для указанных двух помещений прослушивания, показало, что расхождение находится в пределах доверительных интервалов. Следовательно, можно считать, что размеры помещения прослушивания (в пределах, соответствующих жилым помещениям) не оказывают заметного влияния на локализацию.

При проведении экспертиз было замечено, что все эксперты уверенно локализуют кажущийся источник

звука, когда последний находится вблизи краев базы; момент перехода его через центр базы характеризуется наибольшим разбросом экспертопоказаний. Этот вывод хорошо согласуется с результатами, полученными в [43].

Графические зависимости, полученные в результате проведенных экспертиз, дают возможность определять пространственные искажения при различных ус-

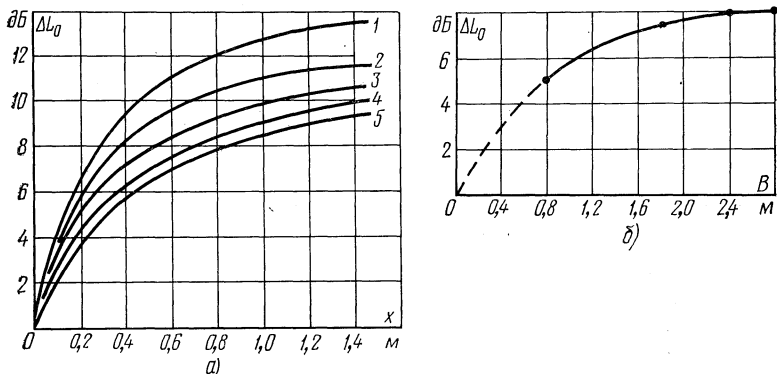


Рис. 2.10. Влияние бокового смещения слушателя:

a — при различных y ($B=2,8$ м): 1 — $y=1$ м; 2 — $y=1,5$ м; 3 — $y=2$ м; 4 — $y=2,5$ м; 5 — $y=3$ м; *б* — при разных базах: $x=0,5$ м; $y=2$ м

ловиях восприятия (x , y , B) для произвольного расположения кажущегося источника звука в стереопанораме. Пусть, например, слушатель, находящийся на оси симметрии, воспринимает один из кажущихся источников справа от центра базы — S_0 на рис. 2.9. Требуется определить, как изменится положение этого же источника при смещении слушателя на 0,5 м влево или вправо от оси симметрии. Имея соответствующие зависимости для данной величины базы и данных координат точек наблюдения, путем простейших построений, ход которых виден из рис. 2.9, определим новые положения кажущегося источника $S_{ол}$ и $S_{оп}$, соответствующие заданным координатам точек наблюдения.

По результатам проведенных экспертиз можно сделать следующие выводы.

1. При действии разности уровней ΔL (а также при действии временной разности $\Delta \tau$) положение кажущегося источника звука является функцией местополо-

жения слушателя. Поэтому при асимметричном расположении слушатель не получит правильного представления о пространственном положении источников звука в стереопанораме. Возможны случаи, когда один и тот же источник будет услышан слева для близко сидящего слушателя и справа для слушателя, находящегося дальше от базы, но на том же расстоянии от оси симметрии. В случае перемещения слушателя по оси симметрии расположение кажущихся источников практически не меняется.

2. Величины базы и координаты места положения слушателей влияют на положение кривой $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$

на оси абсцисс, однако форма этой кривой во всех случаях остается неизменной. Так как уровень отраженных звуков в точке расположения слушателя зависит от тех же факторов (B , x , y и размеров помещения прослушивания), можно считать доказанным, что стереофоническая локализация определяется только прямыми звуками от громкоговорителей.

3. Искажения пространственной панорамы, вызванные асимметричным расположением слушателя, могут быть полностью устранены для данной точки наблюдения, если увеличить уровень сигнала удаленного излучателя на определенную величину ΔL_d , зависящую от взаимного расположения слушателя и излучателей стереосистемы (т. е. x , y , B). При этом взаимное расположение отдельных кажущихся образов в стереопанораме не должно нарушиться, что следует из постоянства формы зависимости $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$. Этот вывод дает возможность создания стереофонической системы со стабилизированной пространственной панорамой.

4. Из постоянства формы кривых $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$ при различных координатах расположения слушателя, а следовательно, и различных значениях ΔL_{xy} и $\Delta \tau_{xy}$ следует, что оба фактора азимутальной локализации — временная и интенсивностная разности — действуют взаимно независимо.

2.5. Коэффициент эквивалентности

По влиянию на положение КИЗ временная и интенсивностная разности являются эквивалентными факторами, так как определенные величины $\Delta L'$ и $\Delta \tau'$ могут выз-

вать одно и то же смещение S кажущегося источника. Соотношение между этими величинами назовем коэффициентом эквивалентности K , дБ/мс:

$$K = \Delta L' / \Delta \tau'. \quad (2.2)$$

Сопоставление временной и интенсивностной зависимостей азимутальной локализации $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$ и

$\frac{S}{B/2} = f_1(\Delta \tau)$, полученных для одних и тех же условий (см., например, рис. 2.2а и 2.5, кривая 1), показывает, что коэффициент эквивалентности K —величина практически постоянная—порядка 10 дБ/мс для большей части кажущихся источников (рис. 2.11б, кривая 1). Однако это значение коэффициента эквивалентности справедливо только для симметричного положения слушателя, при асимметричном положении величина K значительно меньше (см. рис. 2.11б, кривая 2).

Последняя зависимость получена тем же способом, т. е. сопоставлением соответствующих зависимостей азимутальной локализации от ΔL и $\Delta \tau$ для определенного положения слушателя вне оси симметрии ($B=1,8$ м, $x=0,5$ м, $y=2$ м).

Для расчетов результирующей интенсивностной разности [см. выражение (2.4)] необходимо знать закон изменения коэффициента эквивалентности при изменении координат слушателя и излучателей. Определение этого закона методом, описанным выше, требует

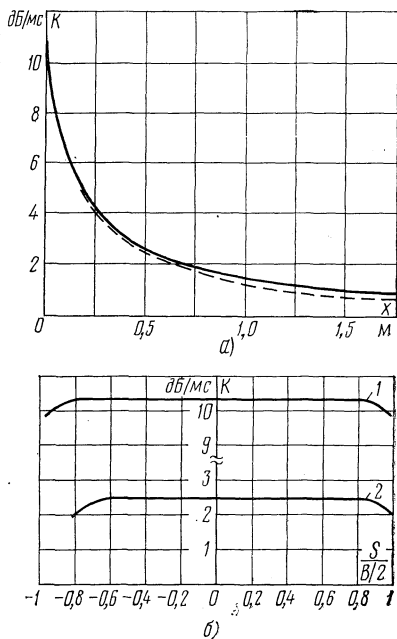


Рис. 2.11. Коэффициент эквивалентности в функции:

а — бокового смещения слушателя [пунктирная линия — аппроксимация выражением (2.3)]; б — положения КИЗ на линии базы при симметричном (1) и асимметричном (2) положениях слушателя ($x=0,5$ м; $y=2$ м; $B=1,8$ м)

очень большого числа экспертиз, так как для каждого положения слушателя требовалось бы находить зависимости $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$ и $\frac{S}{B/2} = f_1(\Delta \tau)$. Однако независимость коэффициента эквивалентности от места положения кажущегося источника на линии базы (см. рис. 2.11б) дает возможность ограничиться в каждом случае определением K для какого-либо одного положения кажущегося источника, например центрального.

Для определения $K(x, y, B)$ было проведено несколько серий субъективно-статистических экспертиз, в которых использовалась установка рис. 2.1. Слушатели, располагавшиеся в различных точках помещения, сами должны были установить величину задержки $\Delta \tau'$ (при $\Delta L = 0$), а затем величину интенсивностной разности $\Delta L'$ (при $\Delta \tau = 0$) таким образом, чтобы кажущийся источник сместился в центр базы. Для исключения влияния характеристик направленности излучателей их акустические оси во всех экспертизах были ориентированы на слушателя. При симметричном положении слушателя определялись величины ΔL и $\Delta \tau$, вызывающие смещение центрального источника на $0,75 \frac{B}{2}$ от центра базы. Такие экспертизы были проведены для трех различных баз и различных координат мест расположения слушателей, что позволило определить влияние этих величин на коэффициент эквивалентности согласно (2.2).

Для каждого случая было получено по 14 экспертопоказаний; в соответствии с их дисперсией доверительный интервал для полученной закономерности (см. рис. 2.11а) составил $\pm 0,05$ при достоверности 0,99.

Как показали результаты обработки экспертиз, характерной особенностью коэффициента эквивалентности является его независимость от величин базы B и удаления слушателя y от линии базы. Экспериментально полученная зависимость (см. рис. 2.11а) с достаточной точностью может быть аппроксимирована выражением

$$K(x, y, B) = K_x = [5,5 (|x| + 1) e^{-9,2|x|} + 4,8] e^{-1,3|x|}, \quad (2.3)$$

где x выражено в метрах.

Выражение (2.3) справедливо при $y \geq 1$ м, так как при $y < 1$ м оказалось невозможным «вернуть» кажущийся источник в центр базы, изменяя с помощью ЛЗ величину $\Delta\tau$ (особенно при больших B и x).

Все эти результаты получены при воспроизведении речевого сигнала (женская речь); выборочные экспертизы с другими программами (звучания музыкальных инструментов) дали такие же результаты, но с большим разбросом экспертопоказаний.

Найденные значения K_x справедливы не только для центрального, но и для большинства других источников пространственной панорамы. Так, например, на рис. 2.11б показана зависимость величины K_x в функции места положения кажущегося источника на линии базы. Из приведенных кривых следует, что коэффициент эквивалентности является величиной постоянной для средней части пространственной панорамы; для источников, удаленных от центра базы более чем на $0,7 \frac{B}{2}$, величина K_x несколько снижается. Последнее обстоятельство не может вызвать каких-либо осложнений, так как крайние источники пространственной панорамы почти не подвержены пространственным искажениям из-за особенностей их формирования (большие величины ΔL или $\Delta\tau$) и расчет изменения азимутального положения этих источников не представляет практического интереса.

Учитывая независимость и эквивалентность действия ΔL и $\Delta\tau$ на положение КИЗ, можно рассчитать величину смещения кажущегося источника при смешанной стереофонии ($\Delta L \neq 0$, $\Delta\tau \neq 0$) или асимметричном положении слушателя. Для этого, воспользовавшись коэффициентом эквивалентности, для симметричного положения слушателя можно пересчитать временную разность в эквивалентную интенсивностную (или наоборот):

$$\Delta L_{\text{экр}} = \Delta L + K \Delta\tau. \quad (2.4)$$

При асимметричном положении слушателя необходимо учесть величины ΔL_{xy} и $\Delta\tau_{xy}$, связанные с координатами места положения слушателя. Величина ΔL_{xy} , кроме того, зависит от характеристик направленности громкоговорителей:

$$\Delta L_{xy} = 20 \lg \frac{p_{\text{л}}}{p_{\text{п}}} = 20 \lg \frac{p_1 l_2 \mathcal{D}_1(\psi_1)}{p_2 l_1 \mathcal{D}_2(\psi_2)} = 20 \lg \frac{p_1}{p_2} + 20 \lg \frac{l_2}{l_1} +$$

$$+ 20 \lg \frac{\mathcal{D}_1(\psi_1)}{\mathcal{D}_2(\psi_2)} = \Delta L + \Delta L'_{xy} + 20 \lg \mathcal{D}_1(\psi_1) - 20 \lg \mathcal{D}_2(\psi_2).$$

Здесь $p_{\text{л}}$ и $p_{\text{п}}$ —звуковые давления от левого и правого громкоговорителей, достигающие ушей слушателя; $\mathcal{D}_1(\psi)$ и $\mathcal{D}_2(\psi)$ —характеристики направленности громкоговорителей; ψ_1 и ψ_2 —направления на громкоговорители из точки наблюдения; $\Delta L'_{xy}$ —интенсивностная разность, обусловленная различием расстояний до громкоговорителей.

В общем случае

$$\Delta L_{\text{экв}} = \Delta L + \Delta L_{xy} + K_x (\Delta \tau + \Delta \tau_{xy}), \quad (2.4a)$$

где величина $\Delta L_{\text{экв}}$ выражена в децибелах.

Определив с помощью (2.4a) величину $\Delta L_{\text{экв}}$, по кривой $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$, полученной для симметричного положения слушателя (например, рис. 2.2a), можно найти смещение КИЗ для данного случая.

2.6. Особенности стереофонической локализации при противофазном возбуждении громкоговорителей

Синфазность излучаемых канальных сигналов принято считать необходимым условием стереофонического воспроизведения. Однако в ряде практических случаев это условие в той или иной мере нарушается. Так, например, при работе стереофонического регулятора на пульте звукорежиссера (см. рис. 3.9) возможно появление канальных сигналов, имеющих сдвиг фаз 180° . Подобные явления возможны и в системе АВ для сигналов в определенной полосе частот, если разность расстояний между источником звука и обоими микрофонами составляет нечетное число полуволн. Кроме того, указанный случай возможен при стереовоспроизведении—при асимметричном положении слушателя.

Интерес к изучению особенностей локализации при противофазном возбуждении излучателей стимулируется еще и тем, что в настоящее время существует большое число патентов на стереофонические системы, в которых используется противофазное излучение.

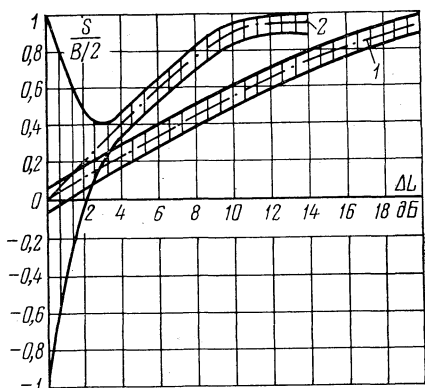
Из практики известно, что определение правильной фазировки громкоговорителей при воспроизведении реальной стереофонической программы вызывает затруднения у большинства слушателей. В то же время при воспроизведении монопрограммы в тех же условиях изменение фазировки замечают даже неопытные слушатели. Различия, которые возникают при этом, в основном касаются локализации. Кроме того, наблюдается некоторое уменьшение громкости на нижних частотах (особенно при малых базах). Интересно отметить, что даже при бинауральном воздействии двух противофазных сигналов слушатель не отметит какого-либо снижения громкости, не говоря о полном подавлении, существующем при электрическом или акустическом сложении этих же сигналов.

Для количественной оценки локализации при различной фазировке излучателей было проведено несколько серий субъективно-статистических экспериментов.

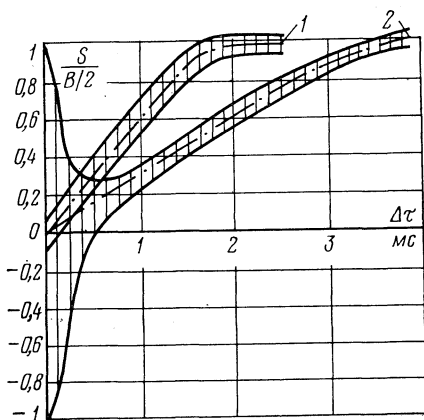
Экспериментальная установка практически не отличалась от описанной выше (см. рис. 2.1). В качестве испытательной программы использовались законченные речевые и музыкальные фразы длительностью 10—12 с. С помощью тумблера на выходе одного из каналов экспериментатор мог менять фазировку стереосистемы. Задачей экспертов было определить местоположение кажущегося источника звука и его протяженность. Пусть слушатель, находящийся на оси симметрии воспроизводящей системы, воспринимает одиночный кажущийся источник звука точно в центре базы. Если при этом изменить фазировку одного из громкоговорителей, то, как показали эксперименты, слушатель не может определить местоположение кажущегося источника звука — появляется ощущение, что звук исходит из всех направлений в пределах базы¹.

Подобные ощущения несвойственны естественному слушанию, поэтому в таких случаях эксперты обычно испытывают неуверенность, некоторые отмечают «давление на уши», вызывающее неприятные ощущения. Следует подчеркнуть, что все эти явления, свойственные противофазной работе излучателей, очень критичны к временной и интенсивностной разностям: при малейшем смещении слушателя с оси симметрии или введении ΔL (или $\Delta \tau$) в стереосигнал эти явления практически исчезают. Это явление широко применялось в данных экспериментах для точной установки стереобаланса.

¹ Существование кажущегося образа за пределами базы [59] здесь не подтвердилось, однако многие слушатели отмечали, что в этих условиях кажущийся образ не имеет четких границ.



а)



б)

Рис. 2.12. Азимутальное положение и ширина КИЗ при действии интенсивностной (а) и временной (б) разностей:

1 — излучатели в фазе; 2 — в противофазе; штрих-пунктирной линией отмечено положение центра КИЗ

Перечислим основные результаты проведенных экспертиз.

1. При синфазной работе излучателей слушатель уверенно локализует КИЗ в середине базы, если в стереосигнале отсутствуют временная и интенсивностная разности. При изменении фазировки одного из излучателей кажущийся источник звука не локализуется, протяженность кажущегося звукового образа равна длине базы.

2. При увеличении интенсивностной разности до 2—3 дБ ширина кажущегося звукового образа значительно уменьшается и центр его смещается в сторону излучателя большего уровня. На рис. 2.12а

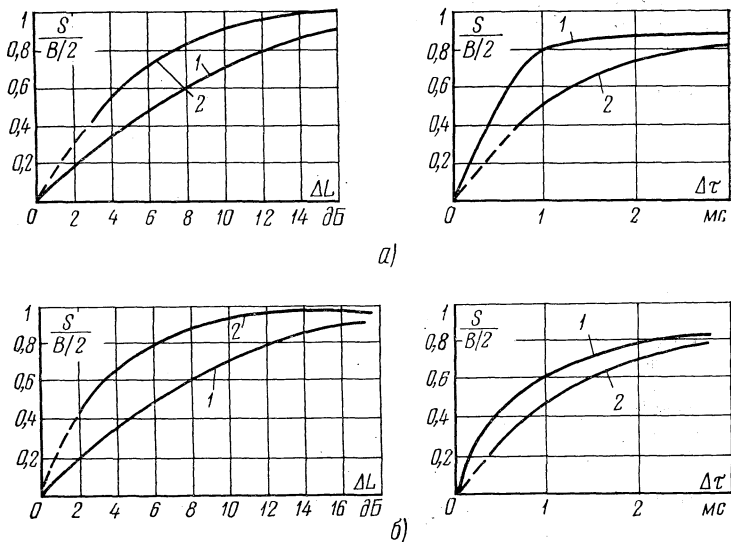


Рис. 2.13. Азимутальная локализация КИЗ для звучания арфы (а) и трубы (б):

1 — излучатели в фазе; 2 — в противофазе

показана зависимость положения и протяженности кажущегося источника звука в функции разности уровней ΔL . Как видно из этого рисунка, при любом значении $\Delta L < 15$ дБ КИЗ расположен дальше от центра базы, чем при синфазной работе излучателей.

3. При увеличении временного сдвига между сигналами обоих каналов $\Delta \tau$ от 0 до 0,5 мс протяженность кажущегося звукового образа уменьшается в несколько раз и его центр смещается в сторону излучателя опережающего сигнала (рис. 2.12б).

При увеличении интенсивностной разности $\Delta L > 4$ дБ или временной $\Delta \tau > 0,5$ мс ширина кажущегося звукового образа практически не меняется при изменении фазировки. При этом, по мнению большинства экспертов, кажущийся источник звука локализуется достаточно четко.

4. Местоположение боковых КИЗ в значительной мере зависит от способа их формирования. Так, кажущиеся источники, сформированные с помощью временной разности, располагаются ближе к

центру базы при противофазной работе излучателей, а кажущиеся источники, полученные с помощью интенсивностной разности, расположены дальше от центра базы при той же фазировке. Эти особенности локализации, по-видимому, объясняют тот факт, что определение фазировки при отсутствии центрального образа стереопанорамы затруднительно (так как боковые источники стереопанорамы могут формироваться при совместном действии как ΔL , так Δt).

5. Так как временная разность при противофазном излучении вызывает меньшее смещение кажущегося источника, пространственные искажения, вызываемые временной разностью Δt_{xy} при асимметричном положении слушателя, в этом случае будут значительно меньше, чем при обычной фазировке. Следовательно, противофазное излучение в какой-то мере может быть использовано для расширения зоны стереозффекта.

6. Сопоставляя графики рис. 2.12а и б, нетрудно убедиться, что коэффициент эквивалентности K имеет значительно меньшую величину при противофазной работе излучателей.

7. Аналогичные эксперименты, проведенные при воспроизведении звучания трубы (рис. 2.13а) и арфы (рис. 2.13б), отображают те же закономерности, что и для речевых сигналов.

8. Оценка локализации КИЗ при противофазном излучении в некоторых случаях может быть сделана аналитическими методами — например, с помощью функции локализации [см. § 2.6 или выражения (2.12)].

2.7. Частотная зависимость локализации

В отличие от центрального источника стереопанорамы, который при правильной установке стереобаланса всегда локализуется в центре базы, положение каждого из боковых источников является функцией частоты [137, 138]. Таким образом, при стереофонической передаче звучания ряда источников чистых тонов положение соответствующих кажущихся источников при воспроизведении будет зависеть не только от пространственного положения первичных источников, но и от частоты, причем зависимость эта, как следует из [137], неоднозначна. Если в этом же случае источники сигналов излучают радиоимпульсы, то, как показали эксперименты, локализация кажущихся источников не зависит от частоты заполнения. Проведя дополнительные эксперименты на более сложных сигналах, Ликей, Сайерс и Черри [104] доказали, что локализация сложных звучаний определяется формой огибающей сигнала, а не его заполнением.

Опыт прослушивания натуральных звучаний, передаваемых по двум стереоканалам, показывает, что в этом случае частотная зависимость положения кажущихся источников звука выражена слабее, а неоднозначность практически отсутствует¹. Более того, кривые смещения имеют относительно устойчивый характер для весьма разнородных сигналов вещательной передачи. Исходя из этого, можно предположить, что не все области частотного спектра сигнала иг-

¹ Если не считать случай чисто временной стереофонии, когда для некоторых звучаний такая неоднозначность возможна (см., например, рис. 2.5, кривая 1).

рают одинаковую роль в процессе слухового пеленгования источников звука. Экспериментальные исследования показали, что как верхние, так и нижние частоты звукового диапазона не оказывают заметного влияния на локализацию. Следует отметить, что эти граничные частоты в значительной степени различаются у разных авторов, что, по-видимому, является следствием различия воспроизводимых программ.

Значительный интерес представляет работа Шиссора и Якубовского [124], в которой определено влияние на локализацию фазового сдвига между стереосигналами. Из результатов этой работы следует, что наиболее сильно влияние фазовой (временной) разности проявляется в относительно узком диапазоне частот 200—500 Гц; в диапазонах ниже 50 и выше 1000 Гц разность фаз даже 180° не влияет на локализацию. Такие результаты были получены для речи и симфонической музыки. Интересно отметить, что эта область частот (200—500 Гц) соответствует максимальным значениям диаграмм распределения интенсивностей естественных источников звука [49, 99].

Задачей авторов было уточнить области частотного спектра одиночного источника звука, которые определяют его субъективную локализацию для двух случаев:

1) при восприятии идентичных по спектру сигналов (что наблюдается на оси симметрии системы воспроизведения);

2) при введении частотозависимостей интенсивностной разности. Этот вопрос вызван необходимостью учитывать различный спектральный состав сигналов, воспринимаемых при асимметричном положении слушателя вследствие частотной зависимости характеристик направленности излучателей.

Было замечено, что при определенной величине временной задержки $\Delta\tau_0$ слушатель, находящийся на оси симметрии системы воспроизведения, не мог локализовать кажущийся источник звука. При этом возникали те же ощущения, что и при противофазной работе излучателей. И действительно, изменение фазировки в этих условиях приводило к появлению четкого кажущегося образа в центре базы. Таким образом, введение определенной временной задержки приводит к таким же изменениям локализации, которые имеют место при изменении фазировки излучателей. Это явление может быть объяснено только в том случае, если признать, что некоторая область частотного спектра в районе частоты ω_0 для которой $\Delta\omega\Delta\tau_0 \approx \pi$, является определяющей в субъективной локализации данного звучания.

Целью экспертиз было определение для каждой из программ тех значений $\Delta\tau_0$, при которых кажущийся источник локализовался наименее уверенно. Методика проведения экспертиз и экспериментальная установка не отличались от описанных выше. После обработки результатов экспертиз были получены значения $\Delta\tau_0$, при которых слушатели не могли определить положение кажущегося источника. Для речевого сигнала $\Delta\tau_0$ составило 1,9 мс. Область частот, для которой составляющие канальных сигналов сдвинуты по фазе на угол, близкий к 180° , определяется величиной

$$f_0 = \frac{1}{2\Delta\tau_0} = \frac{1}{2 \cdot 1,9 \cdot 10^{-3}} = 265 \text{ Гц.}$$

Известно, что именно в этой области находится энергетический максимум спектра женской речи. Для других исследованных звучаний частоты, наиболее сильно влияющие на азимутальную локализацию, даны в табл. 2.3.

Частоты, влияющие на азимутальную локализацию

| Тип звучания | Женская речь | Скрипка | Арфа | Труба | Флейта |
|--------------|--------------|---------|------|-------|--------|
| f_0 , Гц | 265 | 500 | 340 | 250 | 415 |

Полученные данные подтверждают существующие мнения о том, что азимутальная локализация при стереофоническом воспроизведении определяется областью средних частот.

Для оценки локализационных искажений в условиях асимметричного положения слушателя, для изучения влияния частотозависимых характеристик направленности излучателей на локализацию, а также при разработке новых стереофонических систем воспроизведения необходимо знать реакцию слухового анализатора на частотозависимую интенсивностную разность между излучаемыми стереосигналами. Рассмотрим подробнее, как образуется эта разность при асимметричном положении слушателя.

Для узкого диапазона частот Δf интенсивности стереосигналов, приходящих в точку A_x (см. рис. 3.12):

$$I_{\text{л}} \sim p_1^2 \frac{\mathcal{D}_1^2(\Psi_1, f)}{l_1^2} K_{\text{л}}^2(f) \omega(f) \Delta f;$$

$$I_{\text{п}} \sim p_2^2 \frac{\mathcal{D}_2^2(\Psi_2, f)}{l_2^2} K_{\text{п}}^2(f) \omega(f) \Delta f,$$

где $\mathcal{D}_1(\Psi, f)$ и $\mathcal{D}_2(\Psi, f)$ — значения факторов направленности соответственно левого и правого излучателей на частоте f ; $\omega(f)$ — значение спектральной плотности мощности воспроизводимого сигнала для частоты f , расположенной внутри интервала Δf ; $K_{\text{л}}(f)$ и $K_{\text{п}}(f)$ — частотные характеристики стереоканалов по звуковому давлению; p_1 и p_2 — звуковые давления, создаваемые соответственно левым и правым излучателями на расстоянии l_m в направлении акустической оси. Общая интенсивностная разность для точки A_x (см. рис. 3.12) во всей полосе частот определится выражением

$$\Delta L_{\Sigma} = 10 \lg \frac{I_{\text{л}}}{I_{\text{п}}} = 10 \lg \frac{\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^2 \int_0^{\infty} \mathcal{D}_1^2(\Psi_1, f) K_{\text{л}}^2(f) \omega(f) df}{\left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 \int_0^{\infty} \mathcal{D}_2^2(\Psi_2, f) K_{\text{п}}^2(f) \omega(f) df}. \quad (2.5)$$

Преобразуем выражение (2.5):

$$\Delta L_{\Sigma} = \Delta L + \Delta L'_{xy} + \Delta L(f), \quad (2.6)$$

где

$$\Delta L(f) = 10 \lg \frac{\int_0^{\infty} \mathcal{D}_1^2(\psi_1, f) K_{\pi}^2(f) \omega(f) df}{\int_0^{\infty} \mathcal{D}_2^2(\psi_2, f) K_{\pi}^2(f) \omega(f) df}. \quad (2.7)$$

Первое слагаемое выражения (2.6) характеризует заданное положение кажущегося источника в стереопанораме (при $x=0$), второе — местоположение слушателя, а третье — $\Delta L(f)$ — интенсивностную разность, обусловленную частотной зависимостью характеристик направленности. Обычно $K_{\pi}(f) = K_{\pi}(f)$ в широком диапазоне частот; в этом случае выражение (2.7) принимает следующий вид:

$$\Delta L(f) = 10 \lg \frac{\int_0^{\infty} \mathcal{D}_1^2(\psi_1, f) \omega(f) df}{\int_0^{\infty} \mathcal{D}_2^2(\psi_2, f) \omega(f) df}. \quad (2.8)$$

Как видно из выражения (2.6), $\Delta L(f)$ зависит как от спектральных свойств воспроизводимого сигнала, так и от различия факторов направленности. Это выражение обращается в нуль для симметричного положения слушателя, так как $\mathcal{D}_1(\psi_1, f) = \mathcal{D}_2(\psi_2, f)$, а также при отсутствии направленности излучателей. Следовательно, в большинстве практических случаев это выражение не равно нулю.

Так как частотная зависимость характеристик направленности реальных излучателей имеет нерегулярный характер и сильно зависит от конкретного оформления излучателя, его размеров и т. п., влияние этого фактора на локализацию лучше исследовать искусственным путем — с помощью полосовых фильтров с регулируемой частотной характеристикой в одном из каналов (например, $K_{\pi}(f) = \text{var}$ при $K_{\pi}(f) = \text{const}$). Для того чтобы устранить влияние реальных характеристик направленности, во всех экспериментах акустические оси излучателей были ориентированы на слушателей, т. е.

$$\mathcal{D}_1(\psi_1, f) = \mathcal{D}_2(\psi_2, f) = 1.$$

Для этого случая

$$\Delta L(f) = 10 \lg \frac{\int_0^{\infty} \omega(f) K_{\pi}^2(f) df}{\int_0^{\infty} \omega(f) K_{\pi}^2(f) df}. \quad (2.9)$$

Благодаря формальному сходству выражений (2.8) и (2.9) изменением $K_{\pi}(f)$ можно имитировать частотную зависимость характеристик направленности. Зная спектр мощности излучаемого сигнала, с помощью выражения (2.9) нетрудно определить $\Delta L(f)$. Однако эта величина не дает возможности предсказать изменения в по-

ложении и протяженности кажущегося источника, так как для этого надо еще знать реакцию слухового анализатора на спектральное различие воспринимаемых сигналов. Поэтому окончательно решить поставленную задачу можно только путем субъективно-статистических экспертиз. Целью этих экспертиз является:

а) определение влияния частотозависимого разбаланса усиления в стереоканалах на положение кажущегося источника звука;

б) влияние спектрального различия стереосигналов при интенсивностной компенсации пространственных искажений;

в) влияние спектрального различия стереосигналов на остроту локализации.

Установка для проведения экспертиз соответствовала рис. 2.1 при отключенных задержках LZ_1 и LZ_2 . Сигнал от монофонического магнитофона после аттенуаторов (которые использовались для регулировки стереобаланса) поступал на два частотных корректора. Эти корректоры представляли собой набор активных полосовых фильтров с регуляторами уровня в каждой из частотных полос. Для компенсации фазовых сдвигов в усилителе частотного корректора во второй канал было включено аналогичное устройство, коэффициент передачи которого на всех полосах частот составлял 0 дБ.

Во всех экспертизах длина базы воспроизводящей системы составляла 2,4 м. Эксперты находились на расстоянии 2 м от линии базы, и их задачей были определение местоположения кажущегося источника и отметка в своих анкетах замеченных изменений в локализации.

Первая серия экспертиз — определение влияния спектрального различия стереосигналов на локализацию при осевом положении слушателя — проводилась при воспроизведении одного вида сигнала (женская речь). Экспериментатор с помощью регуляторов частотного корректора устанавливал разность уровней ± 10 дБ последовательно в каждой из частотных полос, при этом эксперт записывал в анкете местоположение кажущегося образа. На рис. 2.14 представлена найденная частотная зависимость положения кажущегося источника; верхняя часть графика соответствует последовательному увеличению уровня сигнала в каждой из частотных полос на +10 дБ, а нижняя — уменьшению на -10 дБ. Из рис. 2.14 видно, что наиболее значительное влияние на локализацию оказывает полоса частот 300—1000 Гц ($f_0 \approx 550$ Гц). В данном случае это объясняется тем, что изменение усиления в этой полосе частот приводит к значительному изменению громкостей излучаемых сигналов вследствие того, что наибольшая часть энергии спектра речевого сигнала приходится на эту полосу частот. При введении интенсивностной разности ± 10 дБ только в одной из частотных полос кажущийся источник локализуется несколько менее четко, чем при воспроизведении идентичных по спектру сигналов.

Вторая серия экспертиз проводилась при асимметричном положении слушателя. Результаты этой серии представляют наибольший интерес с точки зрения особенностей компенсации пространственных искажений. С помощью аттенуаторов перед началом экспертиз для каждого эксперта выбиралась разность уровней ($\Delta L \approx 10$ дБ на всех частотах) таким образом, чтобы кажущийся источник локализовался в центре базы. Это соответствует полной компенсации пространственных искажений. В остальном методика проведения экспертиз была такой же, как и в предыдущем случае.

Результаты обработки экспертопоказаний представлены на рис. 2.14б. Из сопоставления рис. 2.14а и б видно, что частотозависимая

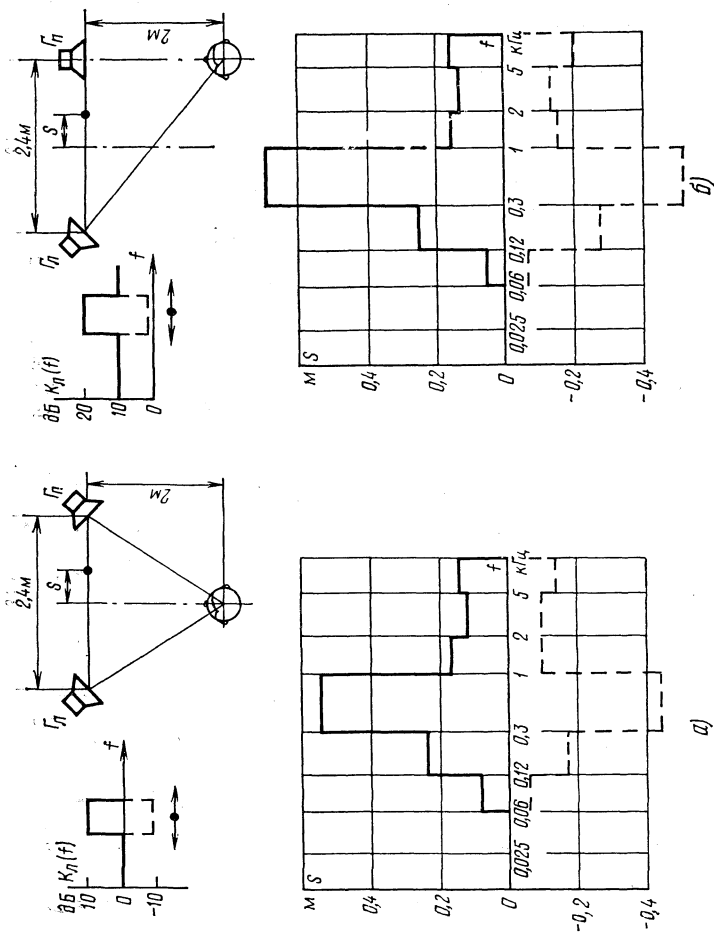


Рис. 2.14. Частотная зависимость азимутальной локализации при симметричном (а) и асимметричном (б) положении слушателя для речевого сигнала

разность уровней приводит к одинаковым результатам как при симметричном, так и при асимметричном положениях слушателя. Таким образом, основные закономерности стереофонической локализации, найденные для осевого положения слушателя, остаются справедливыми и для асимметричного положения, несмотря на существенное различие в условиях бинауральной маскировки.

Целью третьей серии экспертиз было определение допустимого искажения частотной характеристики одного из каналов с точки зрения остроты локализации. Эксперты располагались в тех же условиях, как и в предыдущем случае. Перед началом экспертиз ре-

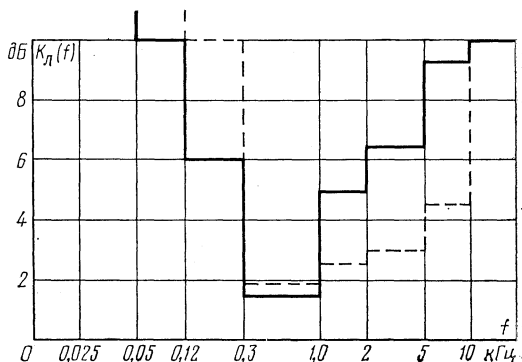


Рис. 2.15. Допустимый разбаланс стереоканалов по уровню в функции частоты:

— для речи;
 - - - для симфонической музыки

гуляторы усиления всех полос частотного корректора были установлены в положение $\Delta L = 10$ дБ с тем, чтобы центральный кажущийся источник локализовался в центре базы для эксперта, находящегося перед одним из излучателей. Эксперт должен был уменьшать ΔL последовательно в каждой из частотных полос до тех пор, пока он не заметит, что ширина КИЗ начинает увеличиваться (нечеткая локализация).

Как видно из рис. 2.15, допустимое искажение частотной характеристики (для одного из стереоканалов) зависит от передаваемой программы — для музыкальных программ разность уровней на высоких частотах более критична, чем для речевых. Это, по-видимому, связано с особенностями спектра воспроизводимого сигнала.

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Различие частотных характеристик стереоканалов (имитирующее частотную зависимость направленности излучателей) наиболее сильно влияет на положение кажущегося источника на тех частотах, где энергия спектра максимальна.

2. Частотозависимая интенсивностная разность зависит как от характеристик направленности, так и от формы спектра мощности воспроизводимого сигнала, причем подобное же влияние могут оказывать неравномерности сквозной частотной характеристики обоих каналов (даже если они идентичны).

3. Введение интенсивностной разности в диапазоне высоких частот (2—5 кГц и выше) не вызывает заметного перемещения КИЗ звука [при $\Delta L(f) < 10$ дБ]. Поэтому с точки зрения локализации в этом диапазоне частот допустимо некоторое отличие характеристик

направленности излучателей от характеристик направленности в диапазоне средних частот.

4. Наиболее четкая локализация при любом положении слушателя наблюдается в том случае, когда частотозависимый разбаланс отсутствует [$\Delta L(f) = 0$].

5. При значительном увеличении $\Delta L(f)$ за счет высоких частот (2—5 кГц) четкость локализации снижается, при $\Delta L(f) > 10$ дБ возможно появление отдельного кажущегося источника, образованного высокочастотной частью сигнала. При этом положение основного кажущегося источника остается неизменным. Поэтому с точки зрения остроты локализации интенсивный разбаланс на высоких частотах (относительно средних частот) нежелателен. Вследствие этого при проектировании стереофонических систем следует стремиться к тому, чтобы и на высоких частотах характеристики направленности излучателей были возможно ближе к среднечастотным.

2.8. Влияние реверберационного процесса первичного помещения на локализацию КИЗ

Изучение особенностей структур реверберационных процессов реальных первичных помещений [28, 44] показывает, что все же значительная часть отзвуков (даже на дискретном участке реверберационного процесса) воздействует на микрофоны стереосистемы через временные интервалы, меньшие тех, которые необходимы для их отдельного восприятия. Совокупность отзвуков, следующих вслед за прямым звуком через сравнительно небольшие временные сдвиги, воспринимается слушателем слитно с прямым звуком и образует единый кажущийся звуковой образ.

Попытаемся оценить путем проведения соответствующих экспертиз влияние, оказываемое этими отзвуками на изменение азимутальной локализации КИЗ. Причем величины временных сдвигов для повторений и соотношения уровней прямого и отраженного звуков в канальных сигналах выберем таким образом, чтобы не только охватить все возможные для реальных помещений случаи, но и выявить также реакцию человека для ряда крайних, необычных ситуаций, быть может не встречающихся в условиях естественного слушания. Ограничим рассмотрение случаем интенсивной стереофонии, так как влияние реверберационного процесса на изменение азимутальной локализации КИЗ здесь должно быть наибольшим. Это объясняется тем, что повторения, соответствующие отзвукам первичного помещения и составляющие реверберационный процесс канальных сигналов, отличаются в этом

случае только по уровню ($\Delta L_i \neq 0$), времена же запаздывания (τ_i) их в каждом из двух каналов всегда одинаковы, поэтому для каждой соответствующей пары повторений временной сдвиг равен 0, т. е. $\Delta \tau_i = 0$. Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 2.16. С выхода монофонического магни-

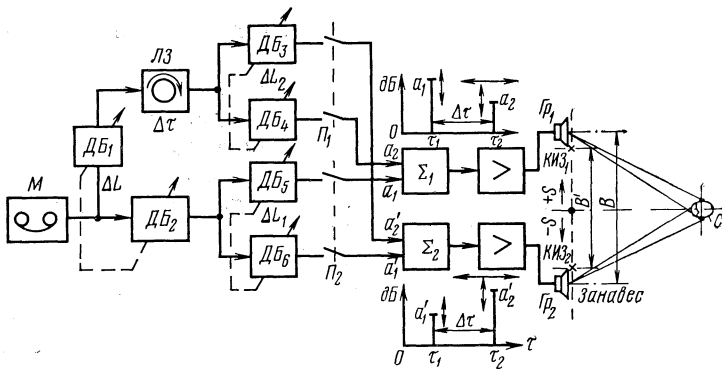


Рис. 2.16. Структурная схема экспериментальной установки

тофона M испытательный сигнал подается на аттенюатор $ДБ_2$ и далее на два аттенюатора: $ДБ_5$ и $ДБ_6$. Различие затуханий, вносимых этими аттенюаторами, создает разность уровней для основной пары сигналов, воспроизводимых громкоговорителями $Гр_1$ и $Гр_2$. В зависимости от величины и знака ΔL_1 КИЗ₁ локализуется слушателем C (расположенным на оси симметрии системы воспроизведения) в той или иной точке на линии базы громкоговорителей. Очевидно, что КИЗ₁ может рассматриваться как результат воздействия на стереомикрофон сигнала прямого звука. Второй кажущийся источник звука КИЗ₂ (имитирующее запаздывающее отражение) формируется с помощью линии задержки $ЛЗ$, вносящей любые величины $\Delta \tau < 150$ мс, и двух аттенюаторов: $ДБ_3$ и $ДБ_4$, обуславливающих значение ΔL_2 . Уровень КИЗ₂ регулируется аттенюатором $ДБ_1$. При поочередном замыкании контакта Π_1 или Π_2 слушатель соответственно будет воспринимать КИЗ₁ или КИЗ₂, местоположения которого на линии базы $Гр_1$ и $Гр_2$ зависят от значения ΔL_1 или ΔL_2 . Очевидно, что при $\Delta L_1 = -\Delta L_2$ положения КИЗ₁ и КИЗ₂ будут симметричными относительно середины базы

так, как это показано на рис. 2.16. При $\Delta L_1 = \Delta L_2$ место локализации КИЗ₁ и КИЗ₂ будет одинаковым. Сумматоры Σ_1 и Σ_2 позволяют смешивать основной и запаздывающий сигналы при одновременном замыкании P_1 и P_2 . При этом временные структуры воспроизводимых Gp_1 и Gp_2 сигналов приведены на рис. 2.16. Различие затуханий, вносимых аттенюаторами $ДБ_1$ и $ДБ_2$, определяет разность уровней ΔL основного и запаздывающего сигналов.

Таким образом, применяемая установка позволяла изменять время запаздывания Δt второго сигнала, разность уровней ΔL основного и запаздывающего сигналов и место локализации формируемых ими звуковых образов КИЗ₁ и КИЗ₂ (путем введения интенсивностных разностей ΔL_1 и ΔL_2).

Испытательным сигналом явился повторяющийся отрывок дикторского текста (женская речь). Значения ΔL_1 и ΔL_2 отличались по знаку и составляли 8 дБ, что соответствовало смещению каждого из этих КИЗ от центра базы на величину, равную приблизительно $0,8 \frac{B}{2}$. Величины Δt и ΔL вводились в случайной последовательности, не известной слушателям. При этом величина $\Delta L > 0$, если уровень сигнала отзвука превышает уровень прямого звука, и $\Delta L < 0$, если уровень отзвука меньше уровня прямого звука. При равных уровнях обоих сигналов $\Delta L = 0$ дБ.

Величина B составляла 2,4 м. Слушатели располагались на оси симметрии Gp_1 и Gp_2 на расстоянии от линии базы $y = B$. Они должны были в каждом отдельном опыте оценить число раздельно воспринимаемых КИЗ, протяженность и местоположение каждого из них на линии базы Gp_1 и Gp_2 .

Результаты исследований свидетельствуют о том, что всю совокупность значений Δt в соответствии с ощущениями экспертов можно условно разделить на четыре области.

1. При $\Delta t \leq 3 \div 4$ мс оба сигнала создают единый КИЗ, положение которого на линии базы громкоговорителей определяется величинами ΔL и Δt . Протяженность КИЗ не меняется и составляет 10—20 см. Такое восприятие назовем устойчивым слиянием основного и запаздывающего сигналов.

2. При $3 \div 4 < \Delta t < 10 \div 15$ мс локализация единого КИЗ затрудняется. Звучание приобретает гулкость и

объемность. По мере увеличения Δt начинает меняться также протяженность КИЗ. Последняя становится наибольшей при положении КИЗ посередине базы. Тем не менее в этой области временных сдвигов образование единого КИЗ возможно еще при любых значениях ΔL . Ее можно назвать областью затрудненного слияния сигналов прямого звука и отзвука.

3. При $10 \div 15 < \Delta t < 100 \div 120$ мс слияние основного сигнала и его отзвука в единый КИЗ возможно

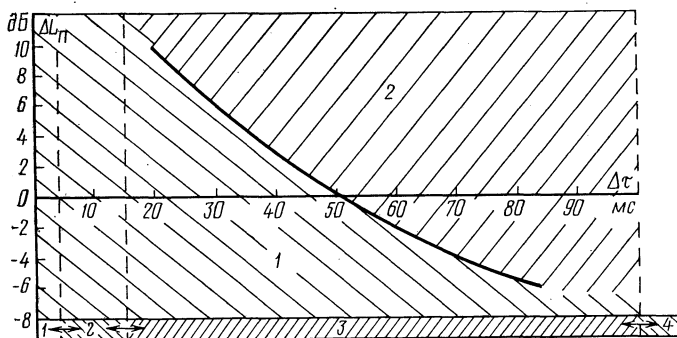


Рис. 2.17. Зависимость порогового значения интенсивностной разности, вызывающей «раздвоение» единого КИЗ, от величины временного сдвига между основным сигналом и его повторением:

1 — область слитного и 2 — область раздельного восприятия прямого звука и отзвука

только при разности уровней, не превышающей порогового значения $\Delta L_{\text{п}}$, величина которого зависит от $\Delta \tau$. Эта зависимость графически представлена на рис. 2.17. Область ниже кривой соответствует величинам ΔL и $\Delta \tau$, при которых возможно слитное восприятие основного сигнала и его отзвука. При приближении величины ΔL к значению $\Delta L_{\text{п}}$ протяженность КИЗ возрастает и при $\Delta L = \Delta L_{\text{п}}$ становится равной расстоянию между местами локализации КИЗ₁ и КИЗ₂ при поочередном замыкании кнопок P_1 и P_2 (см. рис. 2.16), как это было изложено при описании экспериментальной установки. Это расстояние обозначим через B' и назовем кажущейся базой. Область выше кривой рис. 2.17 соответствует раздельному восприятию КИЗ₁ и КИЗ₂, т. е. распаду единого КИЗ на два, обусловленных основным

звук и отзвуком. Этот временной интервал может быть назван областью неустойчивого слияния сигналов прямого звука и отзвука.

4. При $\Delta\tau > 100 \div 120$ мс слияние основного сигнала и его отзвука невозможно при любой разности их уровней, если хотя бы один из них соответствует превышению порога слышимости звука, излучаемого громкоговорителями.

Приведем еще ряд основных зависимостей, полученных при выполнении этих исследований. Следует

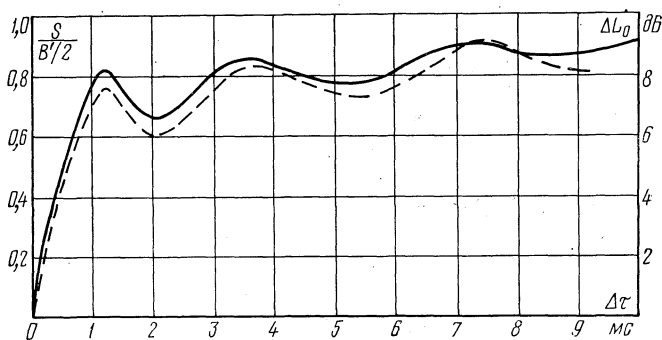


Рис. 2.18. Зависимости относительного смещения и разности уровней (ΔL_0), необходимой для возвращения КИЗ в центр базы громкоговорителей, от временного сдвига между основным сигналом и его повторением

сразу отметить, что до тех пор, пока еще возможно уверенное образование единого КИЗ, эти зависимости не только качественно, но и количественно мало отличаются от аналогичных кривых, полученных в тех же экспериментальных условиях, но при воспроизведении Gp_1 и Gp_2 изоморфных сигналов (см. § 2.2—2.4).

На рис. 2.18 сплошной линией показана относительная величина смещения $\frac{S}{B^{1/2}}$ единого КИЗ в зависимости от $\Delta\tau$. Наличие флуктуаций в перемещении КИЗ определяется неоднородным распределением энергии по частоте для речевого испытательного сигнала, а также различиями в локализации синфазных и противофазных сигналов.

На том же рисунке пунктирной кривой показана зависимость от $\Delta\tau$ разности уровней ΔL_0 отзвука и основного сигнала (прямого звука), необходимой для

восприятия единого КИЗ посередине базы громкоговорителей.

На рис. 2.19 показаны зависимости $\frac{S}{B'/2}$ от ΔL для нескольких постоянных значений $\Delta\tau$. Наличие только разности уровней двух кажущихся источников звука КИЗ₁ и КИЗ₂ при $\Delta\tau=0$ приводит к смещению

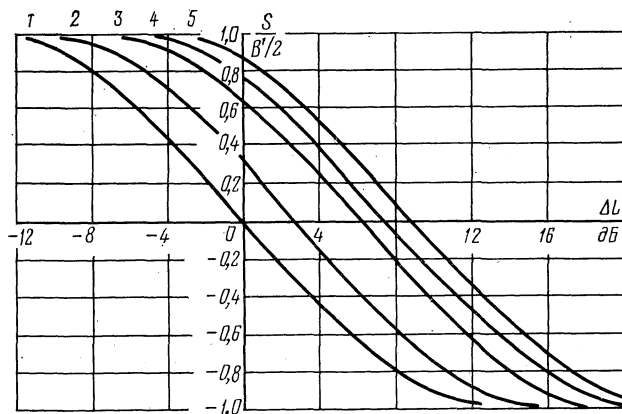


Рис. 2.19. Влияние соотношения уровней между сигналами прямого звука и отзвука на локализацию единого КИЗ:

1 — $\Delta\tau=0$ мс; 2 — $\Delta\tau=0,4$ мс; 3 — $\Delta\tau=2$ мс; 4 — $\Delta\tau=1,2$ мс;
5 — $\Delta\tau=9,3$ мс

единого КИЗ совершенно аналогично показанному на рис. 2.2. Только вместо фактической базы громкоговорителей в данном случае учитывается величина кажущейся базы B' . При увеличении $\Delta\tau$ до величины, при которой еще возможно восприятие единого КИЗ, получаемые результаты аналогичны результатам, показанным на рис. 2.9 при излучении изоморфных сигналов, но смещении слушателя с оси симметрии системы воспроизведения.

Очевидно, что для вещательных сигналов других типов описанные выше количественные соотношения будут несомненно иными, однако качественно картина остается неизменной.

В заключение отметим, что в реальных условиях (концертный зал, радиовещательная студия) время запаздывания первого отзвука превышает (как правило,

в несколько раз) значение 1,2 мс, а его уровень всегда меньше уровня прямого звука [28]. Поэтому азимутальная локализация любого КИЗ пространственной панорамы при стереовоспроизведении определяется только соотношениями уровней и времен запаздывания сигналов, соответствующих прямым звукам, поступающим от исполнителя в точку расположения микрофонов по кратчайшему пути. Наличие естественной реверберации в первичном помещении может лишь в очень незначительной степени изменить протяженность звуковых образов.

2.9. Возможности аналитического определения положения кажущегося источника звука

Изучение отдельных аспектов стереофонической локализации в большинстве случаев проводится с помощью субъективно-статистических экспертиз. Учитывая высокую трудоемкость этих экспертиз и необходимость получения значительного количества экспертопоказаний для обеспечения требуемой достоверности результатов, аналитические методы расчета представляются весьма перспективными.

Непосредственный анализ стереофонических явлений по физическим характеристикам воздействующего сигнала не всегда возможен, так как при этом следует учитывать психофизические характеристики слухового анализатора. Теории, объясняющие азимутальную локализацию при стереопередачах, основаны на следующих допущениях.

1. Информация об угловом положении кажущегося источника содержится в прямом звуке.

2. При субъективном определении направления на кажущийся источник звука используется тот же механизм слухового анализатора, который делает возможной бинауральную локализацию реального источника.

Расчет положения КИЗ, как правило, производится в следующей последовательности.

1. Определяются различия бинауральных сигналов при слушании реального источника звука в функции азимутального положения последнего.

2. Рассчитываются различия бинауральных сигналов, образующихся при сложении сигналов от излучателей стереофонической системы воспроизведения.

3. Зная реакцию слухового анализатора на различия бинауральных сигналов для реального источника звука (см. п. 1), находят угловое положение кажущегося источника по найденным различиям бинауральных сигналов при стереофоническом слушании (см. п. 2).

До настоящего времени нельзя считать окончательно решенным вопрос о том, какое различие в бинауральных сигналах является определяющим для слухового анализатора. В соответствии с этим каждая теория, объясняющая направленное восприятие при стереопередаче, строится в предположении, что решающим фактором является один из параметров воспринимаемого сигнала. Наиболее широко распространено мнение, что таким параметром является вре-

меньяя разность (или разность фаз) между бинауральными сигналами.

Бинауральные сигналы, создаваемые одним реальным источником звука, зависят от азимутального положения последнего относительно медианной плоскости головы слушателя. Временная и интенсивностная разности бинауральных сигналов в зависимости от азимута действующего источника звука и частоты сигнала приводятся в работах многих исследователей [99], [111], [137]. Если ограничиться только областью нижних частот (меньших 300 Гц), то действием бинауральной интенсивностной разности можно пренебречь (см. рис. 1.1), а временной бинауральный сдвиг $\Delta\tau_0$ можно с удовлетворительной точностью определить из выражения

$$\Delta\tau_0 = \tau_1 - \tau_2 = \frac{D'}{c} \sin \psi_0,$$

где $D' \approx 16,3$ см — ауральное расстояние; ψ_0 — азимут действующего источника звука.

При подключении второго синфазного источника звука (частный случай стереофонического воспроизведения) бинауральные сигналы изменяются, что приводит к изменению временной разности между ними. Расчет [137] показывает, что бинауральные сигналы при интенсивностной стереофонии равны по величине, но отличаются по времени, причем временной сдвиг между ними зависит от соотношения звуковых давлений, создаваемых левым и правым излучателями. В [73] получено выражение, связывающее эти величины для низкочастотных сигналов произвольной формы:

$$\tau_L - \tau_P = \frac{p_L - p_P}{p_L + p_P} (\tau_1 - \tau_2),$$

где $\tau_1 - \tau_2$ — бинауральный временной сдвиг, обусловленный дифракцией сигналов, приходящих от одного из излучателей; p_L и p_P — значения звуковых давлений, создаваемых в точке приема соответственно левым и правым излучателями. Для рассматриваемого случая (слушатель на оси симметрии системы) $20 \lg \frac{p_L}{p_P} = \Delta L$; $\tau_L - \tau_P$ — результирующая бинауральная временная разность. Замена $\tau_1 - \tau_2$ на $\frac{D'}{c} \sin \psi_0$, а $\tau_L - \tau_P$ на $\frac{D'}{c} \sin \psi_K$ приводит к так называемому «закону синусов»:

$$\frac{\sin \psi_K}{\sin \psi_0} = \frac{p_L - p_P}{p_L + p_P}, \quad (2.10)$$

где ψ_K — азимут кажущегося источника звука.

«Закон синусов» может применяться только для низкочастотных сигналов произвольной формы.

Учитывая ограниченность применения «закона синусов», Ликей [103] предложил формулу для расчета положения кажущегося источника, справедливую для всего диапазона частот:

$$\sin \psi_K = \frac{\frac{\rho_1^2}{\rho_2^2} (p_L^4 - p_P^4) \sin \psi_0}{\left[p_L^2 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} p_P \right)^2 \right] \left[p_P^2 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} p_L \right)^2 \right]}, \quad (2.11)$$

где ρ_1/ρ_2 — отношение звуковых давлений бинауральных сигналов, создаваемых реальным источником звука с азимутальным углом ψ_0 , соответствующим расположению левого излучателя воспроизводящей системы; $20 \lg \rho_1/\rho_2 = \Delta L_6$ (см. рис. 1.11).

В области низких частот (меньших 300 Гц) отношение $\rho_1/\rho_2 \approx 1$ (см. рис. 1.16), для этого случая выражение (2.11) превращается в выражение (2.10) «закона синусов». Оба эти выражения непригодны в случае временной стереофонии.

Несколько необычная гипотеза направленного восприятия предложена в работе [107]. Согласно этой гипотезе направление на источник звука (реальный или кажущийся) совпадает с направлением распространения фронта звуковой волны в точке наблюдения. Благодаря такому подходу удалось избежать анализа бинауральных сигналов, связанных с дифракционными явлениями. Этот метод применим только для синусоидальных сигналов, что не дает возможности для определения положения КИЗ при действии временной разности.

Энергетическая теория локализации, предложенная в [110], дает возможность рассчитать положение КИЗ для сигналов со значительной концентрацией энергии по времени и спектру:

$$t_0 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t f(t) f^*(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} f(t) f^*(t) dt}; \quad f_0 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f G(f) G^*(f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} G(f) G^*(f) df},$$

где t_0 — среднее положение сигнала на оси времени (групповое время); f_0 — средняя частота спектра сигнала; $f(t)$ — действующий сигнал; $G(f)$ — преобразование Фурье для функции $f(t)$. Энергетический метод расчета основан на том предположении, что основной характеристикой бинауральных сигналов, с помощью которой слуховой анализатор определяет направление на звучащий объект, является бинауральная разность групповых времен; $t_{\text{л}} - t_{\text{п}}$. При определении бинауральных сигналов принимаются во внимание интенсивности и временные соотношения, обусловленные дифракцией (см. рис. 1.1). Зная величину $t_{\text{л}} - t_{\text{п}}$ для конкретного случая, по той же зависимости (см. рис. 1.1а) находят азимутальный угол $\psi_{\text{л}}$ для КИЗ. Результаты расчетов стереофонической локализации при интенсивностной стереофонии, проведенных по энергетическому методу, хорошо согласуются с результатами экспериментов. Для этого случая

$$t_{\text{л}} - t_{\text{п}} = \frac{\frac{\rho_1}{\rho_2} (\tau_1 - \tau_2) \left(\frac{\rho_{\text{л}}^2}{\rho_{\text{п}}^2} - 1 \right) \left[\frac{\rho_1}{\rho^2} \left(\frac{\rho_{\text{л}}^2}{\rho_{\text{п}}^2} + 1 \right) + \rightarrow \right.}{\left[\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^2 \left(\frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{п}}} \right)^2 + 1 + 2m' \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{п}}} \right] \left[\left(\frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{п}}} \right)^2 + \rightarrow \right.} + m' \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{п}}} \left. \left(\frac{\rho_1^2}{\rho_2^2} + 1 \right) \right]}{\rightarrow + \left(\frac{\rho_1}{\rho^2} \right)^2 + 2m' \frac{\rho_1}{\rho^2} \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{п}}}} \quad (2.12a)$$

где $\tau_1 - \tau_2$ — бинауральная временная разность; ρ_1/ρ_2 — отношение звуковых давлений, создаваемое на левом и правом ухе слушателя реальным источником звука, расположенным под углом ψ_0 (см.

рис. 1.1б); $m' = \cos 2\pi f_0 (\Delta\tau + \tau_1 - \tau_2) \exp[-\frac{\mu_1}{2} (\Delta\tau + \tau_1 - \tau_2)^2]$ — множитель, зависящий от вида действующего сигнала; в данном случае это импульсы Гаусса:

$$f(t) = \exp[-\mu_1^2 (t - t_0)^2] \exp[-i 2\pi f_0 (t - t_0)],$$

где $\mu_1 = f_0 \sqrt{2\pi}$ — коэффициент, учитывающий ширину полосы частот; ρ_l и ρ_n — амплитуды излучаемых сигналов в точке наблюдения.

При действии только временной разности $\Delta\tau$ бинауральная разность групповых времен для импульсов Гаусса определяется выражением

$$t_l - t_n = \frac{\left(\frac{\rho_1^2}{\rho_2^2} - 1\right) \left\{ \Delta\tau \left(\frac{\rho_1^2}{\rho_2^2} + 1\right) + \frac{\rho_1}{\rho_2} [(\Delta\tau + \tau_2 - \tau_1) m' + \rightarrow \right.}{\left. \left(\frac{\rho_1^2}{\rho_2^2} + 1 + 2m' \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \left(\frac{\rho_1^2}{\rho_2^2} + 1 + 2m'' \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \right.} \\ \left. \rightarrow + (\Delta\tau + \tau_1 - \tau_2) m'' \right\}}$$

(2.126)

где $m'' = \cos 2\pi f_0 (\Delta\tau + \tau_2 - \tau_1) \exp[-\frac{\mu_1^2}{2} (\Delta\tau + \tau_2 - \tau_1)^2]$.

Для нижних частот это выражение мало отличается от нуля при любых значениях $\Delta\tau$, так как при этом $\rho_1/\rho_2 \approx 1$. Для более высоких частот значения $t_l - t_n$, как показали проведенные здесь расчеты, превышают значения бинауральных задержек $\tau_1 - \tau_2$, свойственных принятому расположению громкоговорителей. Иными словами, следуя энергетической теории, можно предполагать возможность смещения кажущихся источников за пределы базы, что на практике не подтверждается. В то же время известно, что с помощью временного сдвига между канальными сигналами можно достаточно эффективно управлять локализацией как на низких, так и на высоких частотах, причем предельные положения КИЗ всегда ограничены базой воспроизводящей системы. Последнее означает, что при всех значениях временной разности $\Delta\tau$ результаты расчета по ф-ле (2.126) должны удовлетворять условию $t_l - t_n \leq \tau_1 - \tau_2$, где $\tau_1 - \tau_2$ — бинауральная задержка сигналов от излучателя опережающего сигнала.

Энергетический метод расчета не обеспечивает выполнения этого условия, и потому в существующем виде этот метод, как и рассмотренные выше, не пригоден для расчетов, связанных с азимутальной локализацией при временной стереофонии.

2.10. Корреляционный метод расчета азимутальной локализации

Предположим, что громкоговоритель $Гр_1$ излучает сигнал $af(t)$. Мгновенные значения сигнала, излучаемого громкоговорителем $Гр_2$, отличаются в q раз, а во времени запаздывают на величину $\Delta\tau$. Такой сигнал можно записать в виде $aqf(t-\Delta\tau)$. На рис. 2.20 расстояния

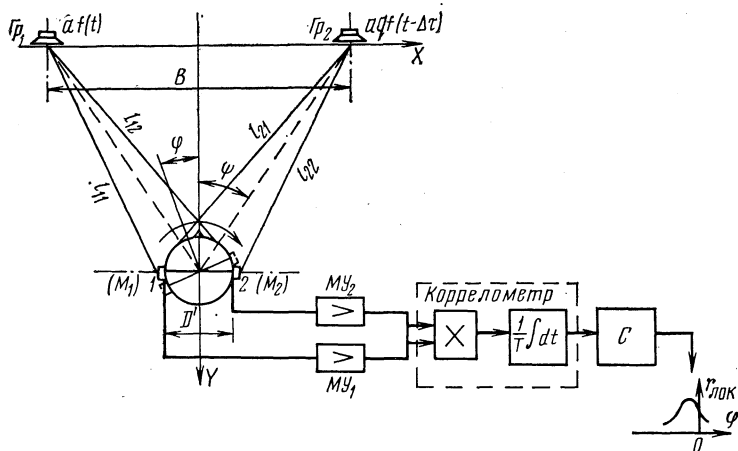


Рис. 2.20. К определению функции локализации

от громкоговорителей до левого (1) и правого (2) уха слушателя обозначены l_{11} ; l_{12} ; l_{21} и l_{22} . Если c — скорость звука, то сигналы, излучаемые громкоговорителем $Гр_1$, будут восприняты левым и правым ухом слушателя через промежутки времени соответственно:

$$\tau_{11} = l_{11}/c \text{ и } \tau_{12} = l_{12}/c. \quad (2.13)$$

Так как сигнал громкоговорителя $Гр_2$ запаздывает на $\Delta\tau$, то аналогичные сигналы достигают левого и правого уха слушателя с задержками соответственно:

$$\Delta\tau + \tau_{21} = \Delta\tau + l_{21}/c \text{ и } \Delta\tau + \tau_{22} = \Delta\tau + l_{22}/c. \quad [(2.13a)]$$

Суммарный сигнал, воспринятый левым (см. рис. 2.20) ухом 1 (без учета потерь в воздухе и маскирующего действия головы слушателя),

$$y_1(t) = af_1(t - \tau_{11}) + aqf(t - \Delta\tau - \tau_{21}), \quad (2.14)$$

а правым ухом 2

$$y_2(t) = af(t - \tau_{12}) + aqf(t - \Delta\tau - \tau_{22}). \quad (2.15)$$

Определим функцию взаимной корреляции сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$, которая, как известно, является их произведением, усредненным за некоторый промежуток времени T :

$$r_{вз} = \overline{y_1(t) y_2(t)} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} y_1(t) y_2(t) dt. \quad (2.16)$$

Подставляя в (2.16) выражения (2.14) и (2.15) и учитывая после перемножения, что интеграл суммы равен сумме интегралов, получим

$$r_{вз} = \overline{a^2 f(t - \tau_{11}) f(t - \tau_{12})} + \overline{a^2 q f(t - \tau_{11}) f(t - \Delta\tau - \tau_{22})} + \overline{a^2 q f_1(t - \tau_{12}) f(t - \Delta\tau - \tau_{21})} + \overline{a^2 q^2 f(t - \Delta\tau - \tau_{21}) f(t - \Delta\tau - \tau_{22})}. \quad (2.17)$$

Выполняя подстановку

$$t - \tau_{11} = t_1; \quad t - \tau_{21} - \Delta\tau = t_2; \quad t = t_1 + \tau_{11}; \quad t = t_2 + \tau_{21} + \Delta\tau \quad (2.18)$$

и вводя обозначения

$$\Delta\tau_{12,11} = \tau_{12} - \tau_{11}; \quad \Delta\tau_{21,12} = \tau_{21} - \tau_{12}; \quad \Delta\tau_{11,22} = \tau_{11} - \tau_{22}; \\ \Delta\tau_{21,22} = \tau_{21} - \tau_{22}, \quad (2.19)$$

окончательно найдем, что

$$r_{вз} = \overline{a^2 f(t_1) f[t_1 - (\tau_{12} - \tau_{11})]} + \overline{a^2 q f(t_1) f[t_1 - (\tau_{11} - \tau_{22} - \Delta\tau)]} + \overline{a^2 q f(t_2) f[t_2 - (\tau_{21} - \tau_{12} + \Delta\tau)]} + \overline{a^2 q^2 f(t_2) f[t_2 - (\tau_{21} - \tau_{22})]} = r_1(\Delta\tau_{12,11}) + r_2(\Delta\tau_{11,22} - \Delta\tau) + r_3(\Delta\tau_{21,12} + \Delta\tau) + r(\Delta\tau_{21,22}) = r_{лок}. \quad (2.20)$$

Из (2.20) следует, что функция взаимной корреляции сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ равна сумме четырех корреляционных функций, причем порядковые номера индексов при r соответствуют первому, второму, третьему и четвертому слагаемым выражения (2.20).

Заметим, что первое слагаемое представляет функцию, характеризующую воздействие левого громкоговорителя Γp_1 на левое и правое ухо слушателя, а четвертое — то же, но правого громкоговорителя Γp_2 ; второе сла-

гаемое — громкоговорителя $Гр_1$ на левое ухо, а $Гр_2$ — на правое; третье слагаемое — перекрестное воздействие, т. е. $Гр_1$ на правое ухо и $Гр_2$ — на левое.

Поставим на место слушателя искусственную голову с микрофонами M_1 и M_2 , заменяющими уши. Сигналы, воспринятые левым и правым микрофонами, после усиления микрофонными усилителями $МУ_1$ и $МУ_2$ подадим на левый и правый входы коррелометра, который, как известно, содержит перемножитель сигналов (\times) и интегратор ($\frac{1}{T} \int dt$). К выходу коррелометра подключен стрелочный прибор (индикатор) или самописец C , фиксирующий измеренные значения на диаграммной ленте. Напряжение на входе этих устройств соответствует значению функции взаимной корреляции (2.20). Если искусственная голова с микрофонами имеет возможность поворачиваться вокруг вертикальной оси, то получим прибор, известный в литературе как корреляционный пеленгатор (см. рис. 2.20).

Из теории корреляционного пеленгования следует, что наибольшая величина функции корреляции сигналов, воздействующих на левый и правый входы поворотного устройства, при наличии одиночного реального источника звука получается при равенстве расстояний от источника до обоих входов, когда временное различие воздействующих сигналов равно нулю.

В ряде работ [1, 2, 3] было показано, что корреляционный пеленгатор, структурная схема которого приведена на рис. 2.20, может быть использован для измерения направления на КИЗ при двухканальной стереофонии, если входное поворотное устройство расположено на оси симметрии громкоговорителей $Гр_1$ и $Гр_2$, а излучаемые ими сигналы отличаются только по уровню ($\Delta L \neq 0$ или $q \neq 1$, а $\Delta \tau = 0$).

Функция взаимной корреляции $r_{вз}$ сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$, регистрируемая с помощью индикатора или самописца, как функция угла поворота входного устройства в пределах $\pm 90^\circ$ от оси симметрии Y , была названа Б. А. Адаменко функцией локализации $r_{лок}$ (2.20).

При повороте «головы» будут изменяться величины l_{11} , l_{12} , l_{21} и l_{22} (рис. 2.20), а следовательно, и соответствующие задержки $\Delta \tau_{12,11}$, $\Delta \tau_{11,22}$, $\Delta \tau_{21,12}$ и $\Delta \tau_{21,22}$. Это, в свою очередь, вызовет изменение функций, составляющих $r_{лок}$ (2.20). Поворачивая искусственную

голову с микрофонами, можно определить местоположение КИЗ на линии базы громкоговорителей, так как последнее совпадает с угловым положением максимального значения функции локализации (2.20). Заметим, что функцию $r_1(\Delta\tau_{12,11})$ можно измерить отдельно

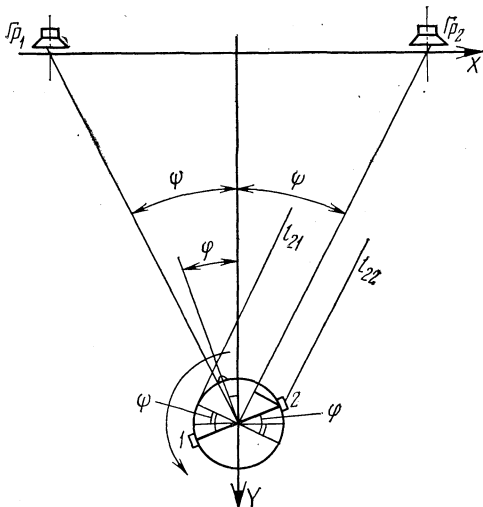


Рис. 2.21. К определению функции локализации

от всей суммы (2.20), выключив правый громкоговоритель Γp_2 , а функцию $r_4(\Delta\tau_{21,22})$ — выключив левый громкоговоритель Γp_1 .

Функцию локализации (2.20) можно достаточно просто вычислить теоретически, если излучаемые громкоговорителями Γp_1 и Γp_2 сигналы $af(t)$ и $aqf(t - \Delta\tau')$ представляют собой равноамплитудный шум в полосе частот от ω_1 до ω_2 . При этом функция взаимной корреляции этих сигналов

$$r(\Delta\tau') = \frac{a^2 q \Delta\omega}{2} \frac{\sin \frac{\Delta\omega \Delta\tau'}{2}}{\frac{\Delta\omega \Delta\tau'}{2}} \cos(\omega_0 \Delta\tau'), \quad (2.21)$$

где $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ — полоса круговых частот; $\omega_0 = (\omega_1 + \omega_2)/2$ — средняя круговая частота излучаемого сигнала. Расчетные выражения для определения составляю-

щих $r_1(\Delta\tau_{12,11})$, $r_2(\Delta\tau_{11,22} - \Delta\tau)$, $r_3(\Delta\tau_{21,12} + \Delta\tau)$ и $r_4(\Delta\tau_{21,22})$ функции локализации $r_{\text{лок}}$ аналогичны выражению (2.21). Разница состоит лишь в том, что для каждой из них существуют свое максимальное значение

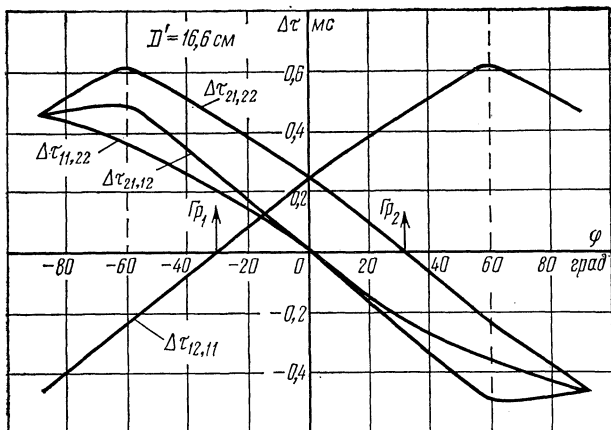


Рис. 2.22. Зависимость бинауральных временных сдвигов $\Delta\tau_{12,11}$; $\Delta\tau_{21,22}$; $\Delta\tau_{11,22}$ и $\Delta\tau_{21,12}$ от угла поворота «искусственной головы», аппроксимированной шаром

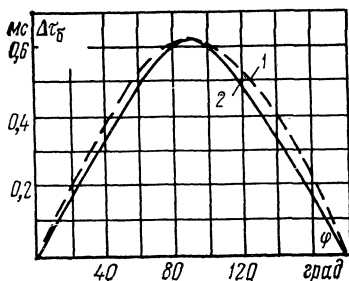
ние, определяемое амплитудами исходных сигналов и равное $a^2\Delta\omega/2$ для $r_1(\Delta\tau_{12,11})$, $a^2q^2\Delta\omega/2$ для $r_4(\Delta\tau_{21,22})$, $a^2q\Delta\omega/2$ для $r_2(\Delta\tau_{11,22} - \Delta\tau)$ и $r_3(\Delta\tau_{21,12} + \Delta\tau)$, и свой временной сдвиг $\Delta\tau'$ (2.21), указанный для этих функций в круглых скобках.

Расчетные формулы для вычисления значений временных сдвигов $\Delta\tau_{12,11}$, $\Delta\tau_{11,22}$, $\Delta\tau_{21,12}$ и $\Delta\tau_{21,22}$, возникающих при повороте искусственной головы, могут быть легко получены из геометрических построений, смысл которых поясняется на рис. 2.21. Здесь для получения более простых формул искусственная голова заменена шаром и принято во внимание, что размер базы микрофонов $D' \ll B$. Полученные в результате этого функциональные зависимости $\Delta\tau_{12,11}$, $\Delta\tau_{11,22}$, $\Delta\tau_{21,12}$ и $\Delta\tau_{21,22}$ от угла поворота φ (см. рис. 2.21) входного устройства пеленгатора представлены графически на рис. 2.22. Диаметр шара D' выбран равным 16,6 см для обеспечения наилучшего совпадения теоретических результатов с данными экспериментальных работ, посвященных определению бинауральных временных сдвигов

при различных положениях головы слушателя по отношению к реальному источнику звука (рис. 2.23). Кроме того, на рис. 2.22 поворот входного устройства в сторону левого громкоговорителя $Гр_1$ характеризуется отрицательными величинами φ , а в сторону правого $Гр_2$ — положительными.

Допустим, что входное поворотное устройство корреляционного пеленгатора установлено на оси симметрии громкоговорителей на расстоянии $y \approx B$ ($\psi = 30^\circ$) и

Рис. 2.23. Зависимость бинаурального временного сдвига ($\Delta\tau_b$) от угла прихода звука: 1 — данные эксперимента; 2 — результаты расчета при $D=16,6$ см



излучаемые сигналы характеризуются условиями: $\Delta L=0$ ($q=1$), $\Delta\tau=0$. Вполне понятно, что максимум $r_1(\Delta\tau_{12,11})$ получается при повороте входного устройства корреляционного пеленгатора в направлении на $Гр_1$ (так как при этом $\Delta\tau_{12,11}$ станет равным нулю), а максимум $r_4(\Delta\tau_{21,22})$ — при повороте на $Гр_2$ ($\Delta\tau_{21,22}=0$). Очевидно (см. рис. 2.20), что максимальные значения этих функций всегда совпадают с направлениями на громкоговорители. В отличие от этого, максимальные значения функций r_2 ($\Delta\tau_{11,22}$) и r_3 ($\Delta\tau_{21,12}$) при $\Delta\tau=0$ и симметричном положении входного устройства корреляционного пеленгатора ($y \neq 0$, $x=0$) совпадают с направлением на центр базы громкоговорителей, ибо при этом $\Delta\tau_{11,22}$ и $\Delta\tau_{21,12}$ становятся равными нулю. Функции $r_2(\Delta\tau_{11,22})$ и $r_3(\Delta\tau_{21,12})$ оказываются не только наложенными друг на друга, но и одинаковыми по величине ($\Delta L=0$). Кроме того, все четыре слагаемые функции локализации (2.20) при $\Delta L=0$ имеют одинаковые максимальные значения, если не учитывать частотозависимого затухания звуковой волны в воздухе с расстоянием и маскирующего действия головы слушателя.

Пусть громкоговорители $Гр_1$ и $Гр_2$ излучают равноамплитудный шум в полосе частот от $f_1 = 100$ Гц до

$f_2=1000$ Гц, тогда изменение функции локализации в зависимости от угла φ носит монотонно нарастающий и монотонно убывающий характер с одним максимумом. Положение последнего совпадает с направлением

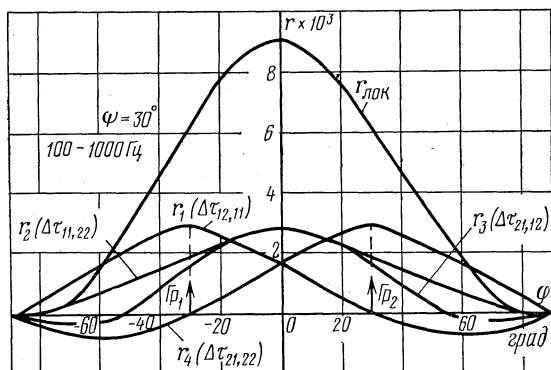


Рис. 2.24. Функция локализации и ее составляющие при воспроизведении тождественных сигналов ($\Delta L=0$; $\Delta \tau=0$)

на КИЗ, в данном случае на центр базы громкоговорителей ($\Delta L=0$, $\Delta \tau=0$ и $y \approx B$, а $x=0$).

Результаты вычислений функции локализации и ее составляющих $r_1(\Delta \tau_{12,11})$, $r_2(\Delta \tau_{11,22})$, $r_3(\Delta \tau_{21,12})$ и $r_4(\Delta \tau_{21,22})$ с помощью выражений (2.21) для рассмотренного выше частотного случая представлены на рис. 2.24.

Введение интенсивностной разности ($\Delta L \neq 0$, $q > 1$) не вызывает изменения угловых положений максимальных значений функций $r_1(\Delta \tau_{12,11})$, $r_2(\Delta \tau_{11,22})$, $r_3(\Delta \tau_{21,12})$ и $r_4(\Delta \tau_{21,22})$. Однако величина максимума каждой из них меняется в соответствии с выражением (2.21), так как уровень правого громкоговорителя становится больше, чем левого. Последнее как раз и является причиной изменения углового положения максимального значения функции локализации ($r_{\text{лок}}$), которая является суммой этих составляющих. И в этом случае (чисто интенсивностная стереофония — $\Delta L \neq 0$, $\Delta \tau=0$ и $x=0$) положение максимального значения функции локализации совпадает с направлением на КИЗ. На рис. 2.25 приведены результаты вычислений как функции $r_{\text{лок}}$, так и ее составляющих, если $\Delta L=$

$=8$ дБ, $\Delta\tau=0$, $x=0$, $\psi=30^\circ$. Нетрудно видеть, что максимум $r_{\text{лок}}$ получается при $\varphi=20^\circ$. При известном значении угла φ на КИЗ, величинах B и y нетрудно

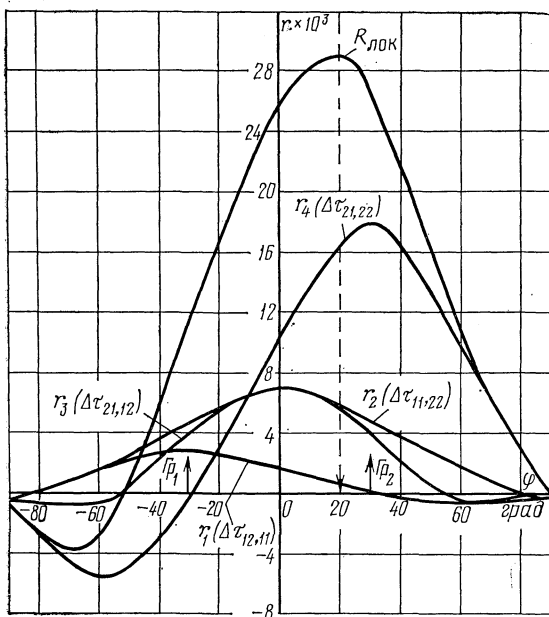


Рис. 2.25. Функция локализации и ее составляющие при интенсивной стереофонии

вычислить смещение S КИЗ от центра базы и далее отношение $\frac{S}{B/2}$. Расчеты показывают, что величины относительных смещений КИЗ при всех возможных значениях ΔL не зависят от размеров базы громкоговорителей, если $y \geq B$. Эти теоретические результаты хорошо согласуются с данными эксперимента. На рис. 2.26 приведена теоретически вычисленная зависимость $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$, полученная для полосы равноамплитудного шума от 100 до 1000 Гц и величин $y \approx B$; $x=0$; $B=2,8$ м. Здесь же точками показаны местоположения КИЗ, найденные путем проведения экспертизы.

До сих пор предполагалось, что громкоговорители Gr_1 и Gr_2 излучают синфазные сигналы. Посмотрим,

как изменится форма функции локализации при противофазном питании излучателей сигналами, одинаковыми по уровню и времени запаздывания ($\Delta L=0$,

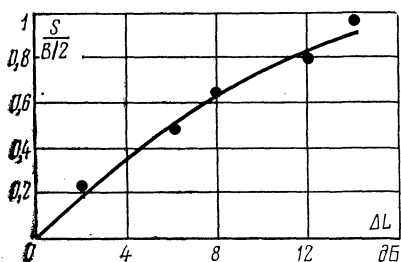


Рис. 2.26. Теоретические и экспериментальные результаты относительного смещения КИЗ под действием интенсивностной разности

$\Delta\tau=0$, входное поворотное устройство корреляционно-го пеленгатора установлено на оси симметрии системы воспроизведения). Результаты вычислений представлены на рис. 2.27 (кривая 1), и здесь же для большей наглядности приведена функция локализации для слу-

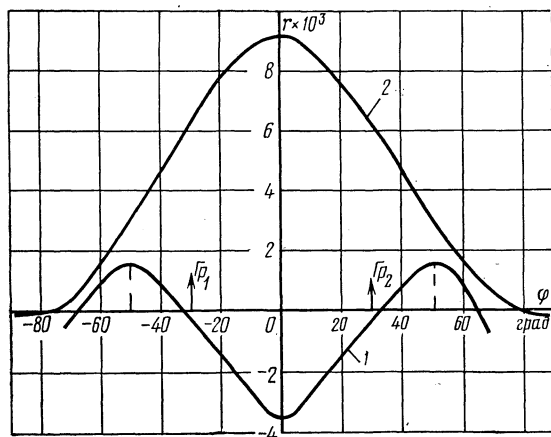


Рис. 2.27. Функции локализации при синфазном (2) и противофазном (1) питании громкоговорителей

чая синфазной работы (кривая 2) этих же громкоговорителей. Как и ранее, расчеты выполнены для полосы белого шума 100—1000 Гц. Изменение формы функции локализации (появление двух максимумов в направлениях левее и правее громкоговорителей и минимума в

направлении на центр базы) полностью соответствует условиям восприятия при противофазном излучении, когда $\Delta L=0$ и $\Delta\tau=0$. Слушатель ощущает размытое по всей базе и частично за ее пределами звучание КИЗ с наибольшим провалом по громкости в центре базы громкоговорителей. При введении $\Delta L > 4$ дБ функция локализации уже имеет один максимум. Причем при одном и том же значении ΔL максимум функции локализа-

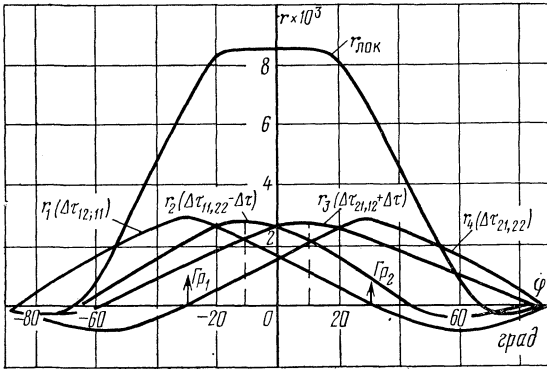


Рис. 2.28. Уплотнение функции локализации при временной стереофонии ($\Delta\tau \neq 0$; $\Delta L = 0$; $\psi = 30^\circ$; 100—1000 Гц)

ции при противофазном питании излучателей звука смещается на большее число градусов, чем при синфазном. Эта особенность также согласуется с результатами, полученными при проведении субъективных экспертиз.

Теперь перейдем к случаю чисто временной стереофонии ($\Delta L = 0$, $\Delta\tau \neq 0$, входное поворотное устройство корреляционного пеленгатора установлено в точке с координатами: $x=0$, $y \approx B$, $\psi = 30^\circ$). Расчеты показывают, что введение $\Delta\tau$ изменяет угловое положение максимумов слагаемых $r_2(\Delta\tau_{11,22} - \Delta\tau)$ и $r_3(\Delta\tau_{21,12} + \Delta\tau)$. Максимумы этих функций смещаются в разные стороны от значения $\varphi = 0$ (рис. 2.28). При этом функция локализации $r_{лок}$ (см. рис. 2.28) уплотняется, ее максимум не изменяет своего углового положения, но становится весьма неопределенным, в то время как слушатель уверенно локализует КИЗ и отмечает его смещение в сторону громкоговорителя, излучающего опережающий сигнал. Не обеспечивается также получение

правильных результатов при асимметричном положении входного поворотного устройства пеленгатора вследствие появляющегося при этом временного сдвига $\Delta\tau_{x,y}$. Последний обусловлен различием расстояний до громкоговорителей Gr_1 и Gr_2 от точки измерения.

Для преодоления этих трудностей необходима предварительная коррекция входных сигналов, выполняемая так же, как об этом свидетельствуют результаты новейших исследований [1, 40, 50], и в слуховой системе человека. Разница во времени $\Delta\tau$ заменяется эквивалентной разностью уровней $\Delta L_{\text{экв}} = K_x \Delta\tau$ с использованием уже введенного ранее коэффициента эквивалентности K_x . Вполне понятно, что если эта коррекция будет осуществляться для сигналов, воспринятых микрофонами M_1 и M_2 (см. рис. 2.20), то количественные соотношения между величинами $\Delta L_{\text{экв}}$ и $\Delta\tau$ будут иными по сравнению с тем, что имело бы место, если бы она производилась для сигналов, подводимых к Gr_1 и Gr_2 . Такая коррекция должна выполняться отдельно для каждой пары сигналов, формирующих КИЗ стереопанорамы.

Введение величины $\Delta\tau_{\text{опт}}$, компенсирующей временной сдвиг $\Delta\tau$ сигналов, «возвращает» функции $r_2(\Delta\tau_{11,22} - \Delta\tau)$ и $r_3(\Delta\tau_{21,12} + \Delta\tau)$ в свое первоначальное положение (см. рис. 2.24), когда максимальные значения последних совпадают с направлением на центр базы. Ослабление же запаздывающего сигнала по интенсивности приводит случай временной стереофонии к чисто интенсивностной. Поэтому после выполнения операции коррекции становятся справедливыми все рассуждения, относящиеся к интенсивностной стереофонии.

И еще одно обстоятельство вызывает необходимость изменения структурной схемы корреляционного пеленгатора, приведенной на рис. 2.20. Оказывается, что при достаточно высокой средней частоте ($f_0 > > 1000$ Гц) полосы шума, каждое из слагаемых $r_{\text{доп}}$, вычисленное с помощью выражения (2.21), становится многозначным за счет быстрого изменения сомножителя $\cos(\omega_0 \Delta\tau')$. Функция локализации при этом также становится многозначной, ее главный максимум вследствие интерференционного сложения составляющих $r_1(\Delta\tau_{12,11})$, $r_2(\Delta\tau_{11,22})$, $r_3(\Delta\tau_{21,12})$ и $r_4(\Delta\tau_{21,22})$ в общем случае ($\Delta L \neq 0$) уже не совпадает с направлением на кажущийся источник звука. Это обстоятельство пояс-

нено графически на рис. 2.29. Здесь $\Delta L=0$ дБ ($q=1$), $x=0$, $\Delta\tau=0$, $y \approx B$, испытательный сигнал — равноамплитудный шум в полосе частот от 4000 до 6000 Гц.

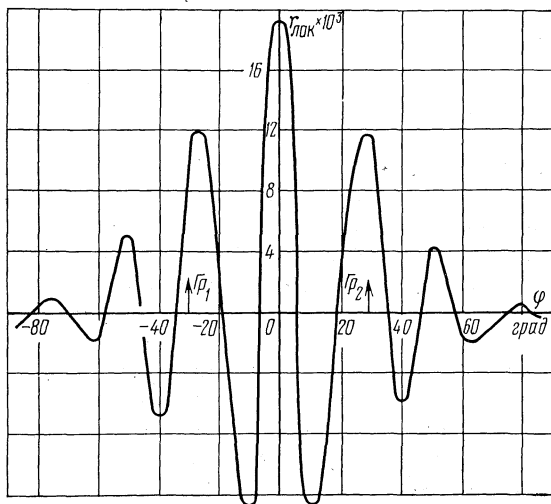


Рис. 2.29. Пример многозначности функции локализации

Для устранения этого затруднения уместно вспомнить следующее: механизм локализации, являясь инерционным элементом органа слуха (время адаптации слуха на изменение направления составляет величину порядка 150 мс), реагирует не на мгновенные значения вещательного сигнала, а на его огибающую, которая получается путем выпрямления (линейный детектор) и усреднения (RC -фильтр) последних. Напомним, что длительность слуховой памяти составляет величину порядка 30—50 мс. Если допустить, что в слуховой системе происходит выделение огибающей исходного сигнала, то выражение (2.21) для расчета слагаемых функции локализации (2.20) для области верхних частот (когда нижняя граничная частота полосы шума превышает 1000—1500 Гц, как это следует из [10]) преобразуется к виду

$$r'(\Delta\tau') = a^2 q \Delta\omega \left| \frac{\sin(\Delta\omega\Delta\tau')}{\Delta\omega\Delta\tau'} \right|. \quad (2.22)$$

Из (2.20) и (2.22) следует, что в этом случае положение КИЗ на линии базы громкоговорителей при одинаковой полосе частот ($\Delta\omega$) не зависит от средней частоты ω_0 сигнала. Очевидно, что частотная зависимость локализации в этом случае должна объясняться в основном частотозависимым маскирующим действием головы слушателя.

Сопоставление теоретических результатов и данных экспертиз показывает, что учет всех изложенных выше дополнений приводит к тому, что функция локализации имеет один четкий максимум для всех значений ω_0 . При этом ее угловое положение при любых условиях проведения эксперимента всегда совпадает с направлением на кажущийся источник звука.

Структурные схемы корреляционного пеленгатора, учитывающие все эти дополнения, показаны на рис. 2.30. Они содержат: «искусственную голову» с микрофонами M_1 и M_2 , микрофонные усилители MU_1 и MU_2 , устройства, аналогичные электрической части измерителя уровней: двухполупериодные выпрямители (B_1 и B_2) и сглаживающие фильтры (Φ_1 и Φ_2), собственно коррелометр (KA), содержащий перемножитель (\times) и интегратор ($\frac{1}{T} \int dt$), и регистрирующий прибор (самописец — C или стрелочный индикатор — I). Кроме того, необходимой частью корреляционного пеленгатора является блок предварительной коррекции сигналов (BKC). С его помощью при $\Delta\tau \neq 0$ или асимметричном положении входного поворотного устройства относительно Gr_1 и Gr_2 перед началом измерений осуществляется предварительная коррекция сигналов (либо до громкоговорителей, как это показано на рис. 2.30а, либо после микрофонов — рис. 2.30б).

При проведении измерений заглушенной камеры не требуется. Это несомненное достоинство данного метода. Кроме того, применение корреляционного пеленгатора сокращает объем вычислений по сравнению с изложенным ранее графо-аналитическим методом (см. § 2.5).

Проведенные авторами опыты применения корреляционного пеленгатора (см. рис. 2.30) показывают, что совпадение результатов субъективных и объективных испытаний на частотах ниже 1000 Гц достигается и без применения искусственной головы. Здесь достаточно оба микрофона установить на штативе. При этом увели-

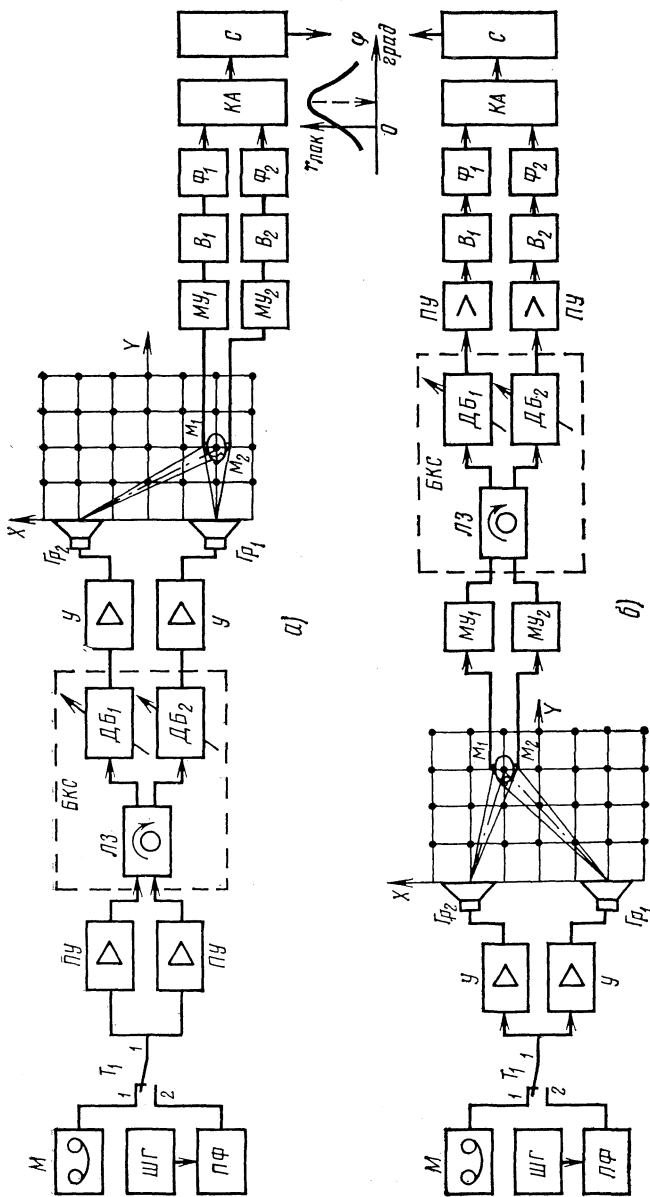


Рис. 2.30. Структурные схемы измерителей направления на КИЗ при двухканальной стереофонии

чение базы микрофонов (расстояния между ними) обостряет «резонансный» характер изменения величины $\Gamma_{\text{лок}}$ в зависимости от φ и, следовательно, повышает точность измерений.

Г л а в а 3

Пространственная звуковая панорама

3.1. Стереосигнал и пространственная панорама при воспроизведении

Не затрагивая художественно-эстетических аспектов проблемы¹, рассмотрим возможности получения стереофонического сигнала, при воспроизведении которого через двухканальную акустическую систему у слушателя возникает иллюзия пространственной звуковой панорамы.

В гл. 2 была рассмотрена возможность искусственно изменять положение одиночного КИЗ на линии базы громкоговорителей за счет введения различия канальных сигналов по уровню (ΔL) или по времени прихода ($\Delta \tau$). Отмечалось, что для слитного восприятия единого КИЗ необходимо наличие корреляционной связи между парой излучаемых сигналов. При полной корреляции канальных сигналов слушатель воспринимает «точечный» КИЗ. При неполной корреляции сигналов образуется единый, но более широкий КИЗ. В ряде случаев возможно создавать кажущийся источник, ширина которого занимает практически всю базу громкоговорителей (например, при фазовых сдвигах между канальными сигналами порядка 90 — 180°). При воспроизведении двух некоррелированных сигналов звук локализуется в двух направлениях — на громкоговорители независимо от величины ΔL и $\Delta \tau$.

Таким образом, управляя степенью корреляции пары сигналов, формирующих КИЗ, можно изменять его ширину (т. е. протяженность по линии базы). В простейшем случае это достигается задерживанием на 5 — 50 мс одного из канальных сигналов (при меньших задержках КИЗ достаточно четко локализуется в направлении излучателя опережающего сигнала, при боль-

¹ Эти аспекты подробно рассмотрены в работах [18], [22] и [23].

ших — наблюдается «раздвоение», т. е. кажущиеся источники слышны в направлениях на громкоговорители).

До сих пор говорилось об одиночных КИЗ, но все сказанное справедливо и для множества КИЗ при условии, что их звучания не коррелированы (в противном случае две или более пар коррелированных сигнала

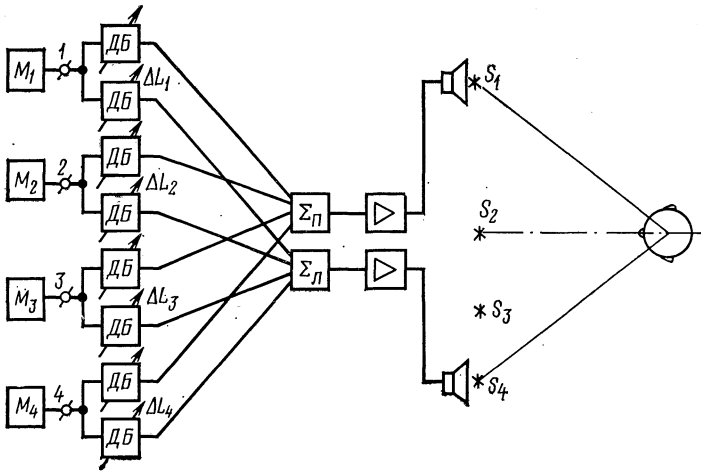


Рис. 3.1. Функциональная схема установки для синтеза пространственной звуковой панорамы

лов образуют один общий КИЗ). Иными словами, положение любого КИЗ на линии базы зависит от величин Δt и ΔL , соответствующих данному звучанию, и не зависит от наличия других КИЗ.

Для наглядности покажем, как можно искусственно создать целый ряд КИЗ, локализуемых в пространстве между двумя громкоговорителями. Пусть имеется ряд источников сигналов (например, несколько монофонических магнитофонов $M_1—M_4$, рис. 3.1), соединенных через несколько пар аттенюаторов ($ДБ$) с сумматорами канальных сигналов (Σ_P и Σ_L). Далее пара канальных сигналов поступает на громкоговорители системы воспроизведения через усилители мощности. Сигнал магнитофона M_1 , пройдя через два аттенюатора, «расщепляется» на два сигнала, отличающихся только

по уровню, например на $+20$ дБ (т. е. $\Delta L_1 = +20$ дБ). В этом случае слушатель (см. рис. 3.1) локализует КИЗ S_1 в направлении на правый громкоговоритель. Далее, пусть сигнал от M_2 проходит через свою пару аттенюаторов без ослабления (или с равным ослаблением). Это означает, что $\Delta L_2 = 0$, КИЗ S_2 будет локализоваться в центре базы.

Сигнал источника M_3 , пройдя через свою пару аттенюаторов, превращается в два канальных сигнала, отличающихся по уровню, допустим, на -6 дБ знак «минус» означает, что уровень сигнала в левом канале преобладает). При $\Delta L_3 = -6$ дБ КИЗ S_3 будет локализоваться на расстоянии четверти базы влево от ее центра. Аналогично для сигнала от источника M_4 при $\Delta L_4 = -20$ дБ КИЗ S_4 будет локализоваться в левом громкоговорителе.

Несмотря на то что каждый из громкоговорителей излучает смесь всех четырех сигналов, слуховой анализатор человека выделяет пары коррелированных сигналов и в зависимости от величины и знака ΔL создает ощущение направления на КИЗ.

Информацию о положении КИЗ на линии базы можно вводить и другим способом — при помощи временной разности $\Delta\tau$. При этом любое распределение кажущихся источников в пределах базы громкоговорителей может быть получено без аттенюаторов ($\Delta L = 0$), при условии замены их линиями задержки ($|\Delta\tau| \leq 1$ мс), а также и при совместном действии аттенюаторов и линий задержки ($\Delta L \neq 0$, $\Delta\tau \neq 0$).

В данном опыте все источники (M_1 — M_4) были некоррелированы. Если нарушить это условие, например питать входы 1 и 4 от одного источника, то при $\Delta L_1 = +20$ дБ и $\Delta L_4 = -20$ дБ канальные сигналы после сумматоров окажутся идентичными (случай $\Delta L = 0$) и слушатель локализует общий КИЗ в центре базы (в положении S_2 на рис. 3.1).

Следовательно, условием слитного восприятия КИЗ при двухканальном воспроизведении является корреляционная связь между канальными сигналами, а условием раздельного (независимого) восприятия нескольких КИЗ является отсутствие корреляции между соответствующими звучаниями.

Итак, были рассмотрены возможности распределения КИЗ по азимуту. Распределять их по «глубине», т. е. по кажущемуся расстоянию до слушателя, можно

с помощью реверберации, регулируя соотношение уровней прямого и отраженного звуков.

Совокупность кажущихся источников, различающихся по положению в пространстве, будет называться пространственной звуковой панорамой (или стереопанорамой).

Следует подчеркнуть, что стереопанораму образуют не только первичные КИЗ (образованные прямыми звуками студии), но и источники более высоких порядков, образованные рядом дискретных отражений от поверхностей студии. Непосредственная локализация КИЗ второго и более высоких порядков затруднительна из-за относительно малого уровня соответствующих канальных сигналов и слуховой маскировки запаздывающих повторений, однако азимутальное положение этих источников по отношению к первичным КИЗ оказывает существенное влияние на восприятие реверберационного процесса (см. гл. 5).

Сведения о предельных положениях одиночного КИЗ (см. § 2.2—2.4) дают возможность определить границы стереопанорамы. По азимуту она ограничена положением громкоговорителей¹, т. е. угловая ширина стереопанорамы не превышает угловой ширины базы для данной точки расположения слушателя. Ближней границей стереопанорамы является линия базы². Дальняя граница стереопанорамы менее определена, что связано со слуховой оценкой удаленности звучащего объекта. Как известно, такая оценка (т. е. глубинная локализация) характеризуется весьма большой погрешностью, особенно при большой удаленности звучащих объектов (см. гл. 1). При малом уровне или отсутствии реверберации кажущиеся источники локализуются непосредственно на линии базы.

3.2. Источники стереофонических сигналов

Общие сведения. Итак, выяснена возможность создания «синтетической» стереопанорамы из ряда некоррелированных сигналов, тем или иным образом обрабо-

¹ Смещение КИЗ за пределы базы возможно в некоторых специальных случаях [59], [75], однако этот эффект очень неустойчив и не все слушатели его замечают.

² Точнее, дуга, проведенная относительно точки наблюдения радиусом, равным расстоянию до громкоговорителя.

танных. Рассмотрим источники стереофонических сигналов — микрофонные системы стереофонии — с точки зрения передачи пространственной информации.

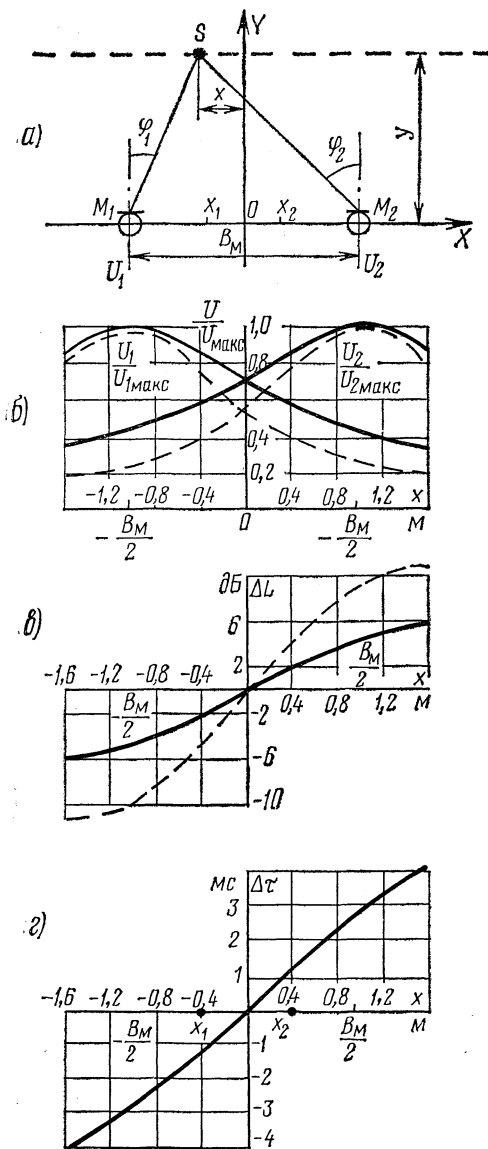


Рис. 3.2. Микрофонная система AB (а) и ее характеристики при $y=1,5$ м; $B_M=2$ м; б — относительное изменение напряжений на выходе микрофонов; в — интенсивностная разность; г — временная разность

Помимо преобразования акустического сигнала в электрический, назначением стереомикрофонов является еще кодирование информации об азимуте звучащего объекта (информация о расстоянии до источника звука, как и в монофонии, заключена в соотношении уровней прямого звука и реверберации).

Система АВ состоит из двух одинаковых микрофонов — M_1 и M_2 (рис. 3.2а), причем их акустические оси не обязательно параллельны, как это показано на рисунке. Пусть точечный источник звука S перемещается по прямой линии (см. рис. 3.2а, пунктир), параллельной линии микрофонов. Рассматривая напряжения на выходе микрофонов, можно оценить связь положений кажущегося источника при воспроизведении с положением реального звука относительно микрофонов.

Звуковые давления, создаваемые источником у микрофонов M_1 и M_2 , создадут на их выходах напряжения:

$$U_1 = E \frac{p_0}{r_1} \mathcal{D}_1(\varphi_1); \quad U_2 = E \frac{p_0}{r_2} \mathcal{D}_2(\varphi_2),$$

где E — осевая чувствительность микрофонов; r_1, r_2 — расстояния до источника звука; p_0 — эффективное значение звукового давления, создаваемого источником на расстоянии 1 м от его центра; $\mathcal{D}_1(\varphi_1)$ и $\mathcal{D}_2(\varphi_2)$ — характеристики направленности микрофонов по звуковому давлению.

Интенсивностная разность сигналов на выходе микрофонов

$$\Delta L = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} = 20 \lg \frac{r_1}{r_2} + 20 \lg \mathcal{D}_2(\varphi_2) - 20 \lg \mathcal{D}_1(\varphi_1).$$

Для ненаправленного микрофона $\mathcal{D}(\varphi) = 1$ и $\Delta L = 20 \lg \frac{r_1}{r_2}$. Считая, что середина микрофонной базы (B_M) совпадает с началом координат, выразим ΔL через координаты источника S :

$$\Delta L = 10 \lg \frac{y^2 + \left(\frac{B_M}{2} + x\right)^2}{y^2 + \left(\frac{B_M}{2} - x\right)^2}.$$

Сигнал U_2 запаздывает относительно U_1 на $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau = \frac{r_1 - r_2}{c} = \frac{1}{c} \left[\sqrt{\left(\frac{B_M}{2} + x\right)^2 + y^2} - \sqrt{\left(\frac{B_M}{2} - x\right)^2 + y^2} \right].$$

При перемещении реального источника звука S параллельно линии базы микрофонов сигналы на их выходах различаются как по уровню (ΔL), так и по времени ($\Delta\tau$).

Если сигналы U_1 и U_2 (после усиления) подать на громкоговорители, то слушатель будет воспринимать звучание перемещающегося КИЗ в пределах базы громкоговорителей. Однако характер этого перемещения, как будет показано ниже, не соответствует перемещению реального источника звука, даже если базы микрофонов и громкоговорителей совпадают. На рис. 3.2б, в, г показано, как изменяются относительные значения напряжений на выходе микрофонов ΔL и $\Delta\tau$ при перемещении источника параллельно линии базы микрофонов (при $y=1,5$ м, $B_M=2$ м) для двух вариантов характеристик направленности микрофонов. Пунктирные кривые—для характеристик направленности в виде «восьмерки», т. е. $\mathcal{D}(\varphi)=\cos\varphi$, а сплошные—для ненаправленных микрофонов, т. е. $\mathcal{D}(\varphi)=1$.

Для ненаправленных микрофонов величина $|\Delta L|=5$ дБ, что явно недостаточно для перемещения КИЗ в пределах всей базы (величина ΔL должна быть равна приблизительно $\pm 16 \div 20$ дБ). Однако изменение $\Delta\tau$ при том же перемещении источника оказывается равным ± 4 мс, т. е. значительно больше тех значений $\Delta\tau$, которые необходимы для перемещения КИЗ в пределах всей базы громкоговорителей ($|\Delta\tau_{\max}| \leq 1$ мс).

Малые величины ΔL и большие $\Delta\tau$ в системе АВ дают возможность пренебречь влиянием первых по сравнению со вторыми и рассматривать локализацию КИЗ при воспроизведении на основании графика рис. 3.2г (по этой же причине систему АВ часто называют системой временной стерефонии). Однако такое допущение не всегда возможно—например, применение направленных микрофонов может обеспечить весьма большие значения ΔL .

Вновь рассмотрим рис. 3.2а. Пока источник S движется слева направо до $x_1 \approx -0,3$ м, абсолютное значение $\Delta\tau$ остается больше 1 мс и КИЗ при воспроизведении локализуется в левом громкоговорителе. При дальнейшем смещении источника S от x_1 до x_2 значение $\Delta\tau$ меняется в пределах ± 1 мс, что согласно рис. 2.4, 2.5 приведет при воспроизведении к перемещению КИЗ в пределах всей базы громкоговорителей. При дальнейшем смещении реального источника S ($x \geq x_2$) положение КИЗ не меняется, он локализуется в правом громкоговорителе.

Следовательно, система АВ не обеспечивает правильной передачи информации об азимуте источника звука. Качественно правильная передача этой информации возможна лишь для небольшого числа источников, расположенных в пределах от x_1 до x_2 (на расстоянии y от линии микрофонов). Все остальные источники локализуются либо в правом громкоговорителе, либо в левом; кроме того, система не обеспечивает правильной передачи скорости движения звучащего объекта: при равномерном движении первичного источника звука слева направо (вдоль пунктирной линии на рис. 3.2а) кажущийся источник при воспроизведении вначале будет оставаться неподвижным в левом громкоговорителе, затем скачком перейдет в правый громкоговоритель (в соответствии с изменением $\Delta\tau$).

Конечно, отмеченные недостатки системы АВ могут быть в какой-то мере устранены путем увеличения расстояния до исполнителей (y) или уменьшения базы микрофонов (B_m). Однако это может вызвать дополнительные трудности — в частности, первый способ повлечет за собой снижение уровня прямого звука, второй — наличие в стереосигнале практически только временных (фазовых) различий (так как интенсивности канальных сигналов почти совпадают), что ухудшает совместимость. Кроме того, в последнем случае ($B_m < 1$ м) появляются трудности в передаче звучания большого ансамбля, так как крайние его источники будут сильно удалены от микрофонов (по отношению к центральным) и это приведет к нарушению музыкального баланса (преувеличенная громкость центральных источников).

При больших базах микрофонов ($B_m > 2$ м), кроме отмеченных выше недостатков, наблюдается другой вариант нарушения музыкального баланса — преувели-

ченная громкость боковых источников ансамбля и ослабление звучания центральных (так называемый «провал середины»), что связано с увеличением расстояния от центра ансамбля до микрофонов. Помимо нарушения музыкального баланса, наблюдается также изменение «глубины» расположения КИЗ, так как центральные источники ансамбля передаются с большей реверберацией.

Таким образом, параметры системы АВ (B_m , y , форма характеристик направленности микрофонов и их ориентация) существенно влияют на получаемую стереопанораму, однако оптимальный выбор этих параметров — задача очень трудная и ее решение зависит от особенностей ансамбля, жанра и характера исполняемого произведения, акустики студии и т. д. По мнению ведущих звукорежиссеров система АВ (при ее оптимальном использовании) способна обеспечить наилучшее качество стереопрограмм [23], [58]. Однако в существующей практике записи одиночная система АВ практически не используется.

Система ХУ состоит из двух направленных микрофонов, расположенных на общей вертикальной оси так, что их акустические оси образуют некоторый угол δ_0 в горизонтальной плоскости.

Пусть реальный источник звука S перемещается вдоль пунктирной прямой, проходящей на расстоянии y от микрофонов (рис. 3.3а). Напряжения на выходах микрофонов:

$$U_1 = E \frac{P_0}{r} \mathcal{D}_1(\varphi + \delta_0/2); \quad U_2 = E \frac{P_0}{r} \mathcal{D}_2(\varphi - \delta_0/2).$$

Рассмотрим два варианта характеристик направленности микрофонов — «восьмерку» и кардиоиду.

А. Для микрофонов с диаграммой направленности в форме «восьмерки» $\mathcal{D}(\varphi) = \cos\varphi$. Угол δ_0 чаще всего составляет 90° .

Заменив r на $y/\cos\varphi$, для этого случая получим:

$$U_1 = E \frac{P_0}{y} \cos\varphi \cos(\varphi + 45^\circ); \quad U_2 = E \frac{P_0}{y} \cos\varphi \cos(\varphi - 45^\circ).$$

С целью выяснить, как меняются напряжения U_1 и U_2 при перемещении источника S параллельно оси X ,

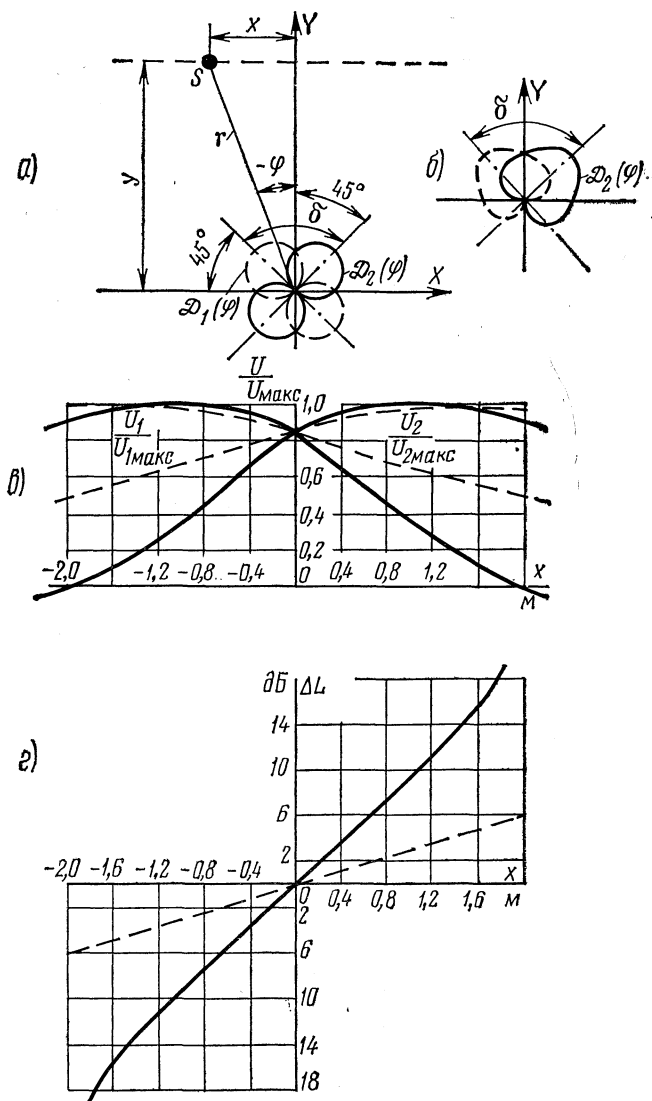


Рис. 3.3. Микрофонная система XY с характеристиками направленности в виде «восьмерки» (а) и кардиоиды (б); относительное изменение напряжений на выходе микрофонов (при $y=2$ м) и интенсивностная разность (в). Сплошные линии на графиках соответствуют характеристикам направленности для случая (а); пунктирные — для случая (б).

построим графики $U_1/U_{1\text{макс}}$ и $U_2/U_{2\text{макс}}$ в функции смещения x (рис. 3.3в, сплошные линии)

$$\Delta L = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} = 20 \lg \frac{\cos(\varphi - 45^\circ)}{\cos(\varphi + 45^\circ)}. \quad (3.1)$$

Как видно из рис. 3.3в и г, при смещении источника от оси симметрии микрофона (ось Y) величина ΔL изменяется почти пропорционально, достигая значения ± 16 дБ при $|x| \leq 0,8y$. При дальнейшем смещении источника ΔL резко возрастает, стремясь к бесконечности при $\varphi \rightarrow 45^\circ$ (т. е. $\delta_0/2$). Из сопоставления рис. 3.3г и 2.2а видно, что микрофонная система ХУ достаточно правильно передает информацию об азимуте источника звука, если последний находится в пределах углов $-\delta_0/2 \leq \varphi \leq \delta_0/2$.

Дальнейшее смещение реального источника звука хотя и вызывает получение больших значений ΔL на выходе микрофонной системы, однако не будет сопровождаться перемещением КИЗ (так как оно ограничено размерами базы воспроизводящей системы).

Б. Рассмотрим второй случай — микрофоны с кардиоидной характеристикой направленности $\mathcal{D}(\varphi) = \frac{1}{2}(1 + \cos\varphi)$ при том же угле $\delta_0 = 90^\circ$:

$$U_1 = \frac{E p_0}{2y} \cos\varphi [1 + \cos(\varphi + 45^\circ)]; \quad U_2 = \frac{E p_0}{2p} \cos\varphi [1 + \cos(\varphi - 45^\circ)]; \quad (3.2)$$

$$\Delta L = 20 \lg \frac{1 + \cos(\varphi - 45^\circ)}{1 + \cos(\varphi + 45^\circ)}.$$

Графики относительного изменения U_1 , U_2 и ΔL в функции положения (x) реального источника звука для этого случая показаны пунктирными линиями на рис. 3.3в и г. Из приведенных графиков следует, что кардиоидные микрофоны при $\delta_0 = 90^\circ$ в системе ХУ обеспечивают искаженную передачу пространственной информации. В частности, большинство источников ансамбля, расположенных в пределах углов $\pm 45^\circ$ относительно стереомикрофона, при воспроизведении локализируются вблизи центра базы громкоговорителей, так как даже при $\varphi = 45^\circ$ величина ΔL согласно (3.2) составляет всего 6 дБ. Для углов $|\varphi| > 45^\circ$ «чувствительность» стереомикрофона к изменению азимута источника звука резко возрастает и при $|\varphi| \rightarrow 60^\circ \Delta L \rightarrow \infty$.

Последнее означает, что у данного стереомикрофона «угол охвата» составляет 120° .

Приведенные примеры показывают, что выбор формы характеристики направленности и ориентации акустических осей микрофонов существенно влияет на точность передачи информации об азимуте источников звука. На практике применяют микрофоны с различным (часто переменным) углом δ_0 , а форма диаграммы направленности («восьмерка», кардиоида, гиперкардиоида) в ряде случаев может переключаться дистанционно в соответствии с условиями записи.

Отсутствие временной разности между микрофонными сигналами обеспечивает хорошую совместимость записей, сделанных по системе ХУ. Недостатком микрофонных систем ХУ является увеличенная громкость центральных источников ансамбля по отношению к крайним, что связано с различными расстояниями от стереомикрофона до исполнителей. Это же обстоятельство приводит к преувеличенному изменению ощущения расстояния до звучащего объекта по мере его перемещения вдоль пунктирной линии (см. рис. 3.3а). Прямолинейная траектория движения реального источника при воспроизведении превращается в криволинейную; слушателю кажется, что при мере смещения от центра базы к краям КИЗ заметно удаляется в глубину сцены (подобные искажения глубиной локализации наблюдаются и в системе АВ; в этом случае центральные КИЗ воспринимаются более удаленными, чем боковые). Если реальный источник звука движется по дуге вокруг стереомикрофона системы ХУ ($r = \text{const}$), то при воспроизведении траекторией движения КИЗ будет прямая (так как величина акустического отношения не меняется).

Другим недостатком системы ХУ является необходимость значительного удаления стереомикрофона от ансамбля (для выполнения условия $|\varphi| < \delta_0/2$), что снижает уровень прямого звука и увеличивает неконтролируемую реверберацию. В некоторых случаях этого можно избежать, располагая исполнителей не на одной линии, а по дуге, на равном расстоянии от стереомикрофона.

Применение стереомикрофона с широким углом «охвата» вызывает, как отмечалось выше, пространственные искажения. По этим причинам одиночный стереомикрофон системы ХУ практически не применяют.

Система MS во многом аналогична системе XY. Стереомикрофон системы MS также состоит из двух совмещенных микрофонов, но с различными характеристиками направленности. Один из них, обычно ненаправленный (диаграмма направленности в виде круга), принимает информацию обо всем звуковом поле (информация «M»), а другой, с диаграммой направленности в виде «восьмерки», принимает информацию, главным образом, о сторонах звукового поля (информация «S»). Название системы MS образовано первыми буквами немецких слов: Mittel — середина и Seite — сторона.

Рассмотрим работу такой микрофонной системы в тех же условиях: реальный источник звука S движется по прямой на расстоянии y от стереомикрофона (рис. 3.4a). При этом на выходе ненаправленного микрофона образуется напряжение U_M :

$$U_M = E \frac{p_0}{r} = E p_0 \frac{\cos \varphi}{y}$$

(множитель $1/r = \cos \varphi / y$, как и в предыдущем случае, характеризует изменение звукового давления с расстоянием. При движении реального источника звука вокруг стереомикрофона $\cos \varphi / y = \text{const}$).

На выходе направленного микрофона

$$U_S = E \frac{p_0}{y} \cos \varphi [\cos (\varphi + 90^\circ)].$$

Сигналы U_M и U_S после микрофонных усилителей поступают на суммарно-разностный преобразователь (СРП), на выходе которого получаются каналные сигналы:

$$U_1 = \frac{1}{2} (U_M + U_S) = E \frac{p_0}{y} \cos \varphi \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos (\varphi + 90^\circ) \right];$$

$$U_2 = \frac{1}{2} (U_M - U_S) = E \frac{p_0}{y} \cos \varphi \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos (\varphi - 90^\circ) \right].$$

Выражения в квадратных скобках представляют собой запись характеристик направленности в форме кардиоид, оси которых повернуты на углы $\pm 90^\circ$ относительно начала отсчета (ось Y). Напомним, что подобные выражения для U_1 и U_2 были получены при анализе работы стереомикрофона системы XY, состоящего из двух кардиоидных микрофонов. Отличие сос-

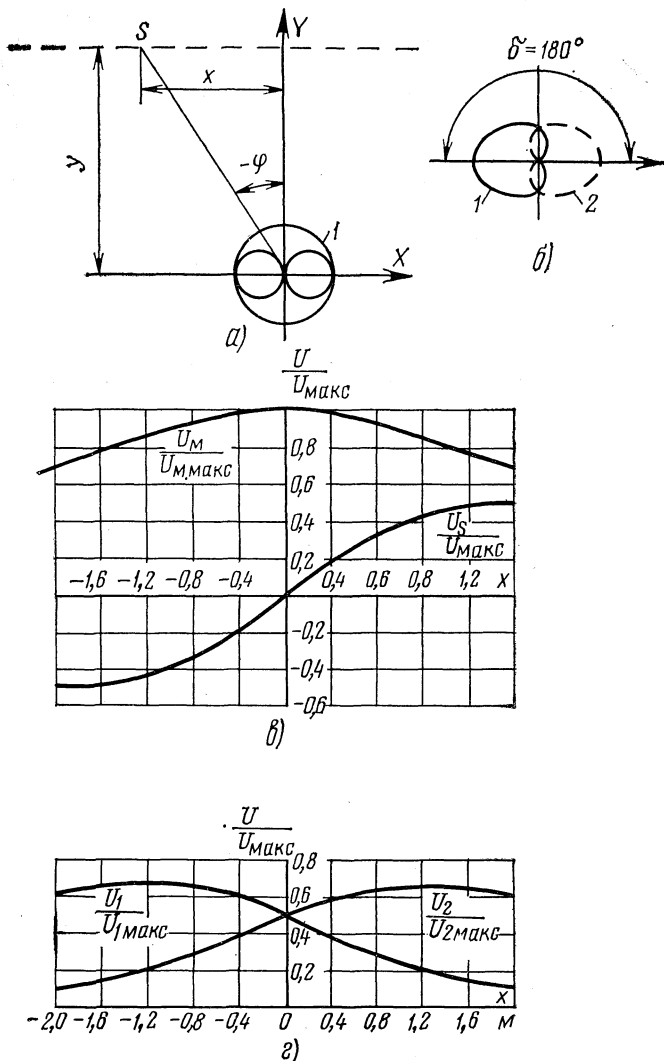


Рис. 3.4. Микрофонная система MS (а) и эквивалентная ей система XY (б); относительное изменение микрофонных сигналов (в) и сигналов на выходе СРП (г)

тоит в ориентации осей микрофонов — в системе XY угол δ_0 между осями микрофонов равен 90° , а в данном, случае $\delta_0 = 180^\circ$. На рис. 3.4в показано относи-

тельное изменение сигналов на выходе микрофонов, а на рис. 3.4г — на выходе суммарно-разностного преобразователя в функции местоположения источника звука x при $y=2$ м. На рис. 3.4.б показаны диаграммы направленности микрофонов системы ХУ, обладающей такими же характеристиками. Следовательно, рассматриваемая микрофонная система с учетом действия СРП эквивалентна системе ХУ, состоящей из двух кардиоидных микрофонов с углом $\delta_0=180^\circ$.

Рассмотренные характеристики направленности микрофонов системы MS («круг» и «восьмерка») не являются единственно возможными. Вместо ненаправленного микрофона M иногда применяют микрофоны с характеристиками направленности типа «восьмерка» или «кардиоида».

Недостатки рассмотренных микрофонных систем удается преодолеть в сложных многомикрофонных системах со специальной обработкой выходных сигналов. Здесь важно напомнить, что стереофоническая звукопередача не в состоянии полностью воссоздать звуковое поле студии хотя бы потому, что направления прихода звуков (как прямых, так и отраженных) при воспроизведении ограничены направлениями на громкоговорители. Применение одиночных стереомикрофонов, как было показано выше, в общем случае не обеспечивает точную передачу пространственной информации и приводит к нарушению музыкального баланса. Поэтому в настоящее время при записи стереограмм для радиовещания и грамзаписи перед звукорежиссером не ставится задача создания стереопанорамы, точно соответствующей действительному расположению исполнителей. Более того, звукорежиссер в большинстве случаев сам решает, как распределить кажущиеся источники на линии базы. При этом он стремится создать такую звуковую картину, которая бы отвечала музыкально-эстетическим требованиям и соответствовала бы сложившимся представлениям о расположении исполнителей в ансамбле. Не исключаются также возможность нетрадиционного расположения исполнителей и даже создание звуковых эффектов, не встречающихся при естественном слушании. Поэтому процесс формирования стереопанорамы при записи следует рассматривать как творческий процесс; успех или неудача при записи во многом зависят от деятельности звукорежиссера.

Требования, предъявляемые к стереопанораме, в значительной мере определяются программным материалом, однако общими являются следующие.

1. Источники звука должны быть распределены в пределах всей базы громкоговорителей. Число основных направлений, по которым должна формироваться стереопанорама, не должно быть большим (обычно их пять — лево, полулево, центр, полуправо, право). Число звуковых «планов», т. е. число градаций удаленности («глубины») звучащих объектов, также не должно превышать пяти.

2. Звучание должно быть сбалансировано по громкости в пределах всей базы громкоговорителей. Имеется в виду не мгновенное равенство громкостей отдельных источников, а результат усреднения слухом звучания всей программы для каждого элемента стереопанорамы.

3. Движение источников звука, если оно необходимо, должно быть по возможности равномерным. За быстрыми (скачкообразными) перемещениями КИЗ слушателю трудно следить.

4. Простое суммирование канальных сигналов должно давать полноценную монофоническую программу — это требование совместимости.

Качество стереофонической записи во многом зависит от расположения и типов микрофонов. Для уменьшения неконтролируемой реверберации микрофон должен находиться в непосредственной близости от источника звука, но это условие неприемлемо для стереомикрофонов всех типов. Поэтому часто для прямых и отраженных звуков применяют разные микрофоны (группы микрофонов). Использование отдельных стереомикрофонов для небольших групп исполнителей снимает проблему баланса громкости, но создает опасность взаимного проникновения сигналов в микрофоны соседних групп. Для уменьшения взаимного влияния исполнителей при записи эстрадных ансамблей применяют щиты, разделяющие исполнителей (или группы исполнителей) с соответствующими микрофонами, причем около каждого исполнителя (или группы) часто ставят мономикрофон, а общий стереомикрофон, принимающий отраженные звуки, устанавливается на некотором расстоянии от ансамбля. При этом информа-

ция об азимутальном положении каждого исполнителя (группы) вводится искусственно, с помощью регуляторов, имеющихся на пульте звукорежиссера.

В ряде случаев сигналы отдельного стереомикрофона, обслуживающего группу исполнителей, должны быть преобразованы на пульте звукорежиссера таким образом, чтобы соответствующие КИЗ занимали не всю базу громкоговорителей, а только определенную ее часть. Иногда возникает и обратная задача: «распределить» звучание одного из источников ансамбля по всей базе громкоговорителей. Следовательно, при записи стереопрограмм звукорежиссер создает «синтетическую» стереопанораму, в которой информация об отдельных КИЗ (азимут, протяженность, «глубина», громкость, тембр, «акустическая атмосфера» зала) вводится искусственно, с помощью сложного арсенала технических средств. Некоторые способы и технические средства, применяемые при обработке микрофонных сигналов, будут рассмотрены ниже.

3.3. Обработка микрофонных сигналов

Современные стереофонические звукорежиссерские пульта представляют собой весьма сложные устройства с большим числом независимых входов (до 32) и выходов (от 4 до 16). Число входов пульта ограничивает число применяемых первичных источников сигнала (моно- и стереомикрофонов, многоканальных магнитофонов). Несмотря на различие функциональных схем и конструктивных особенностей пультов разных фирм, общим для всех является двух- и даже трехступенчатая обработка сигналов.

Каждый вход пульта имеет, как правило, ступенчатые и плавные регуляторы уровня (так называемые «индивидуальные» регуляторы), усилители, корректоры частотной характеристики (подъем или спад усиления на краях частотного диапазона, ограничение частотного диапазона), фильтры «присутствия», регулятор уровня сигнала, подаваемого на общий двухканальный ревербератор, панорамный регулятор (регулятор ширины и направления), функции которого меняются в зависимости от рода используемых сигналов. Все эти устройства, образующие индивидуальный тракт, конструктивно размещены в единой съемной кассете пульта. Сигналы с выходов нескольких индиви-

дуальных трактов смешиваются и подаются в групповые тракты. Последние конструктивно выполнены также в виде отдельных кассет, однако с меньшими возможностями обработки сигналов — отсутствуют входные делители и иногда частотные корректоры. С выходов групповых трактов сигналы могут быть распределены на любой канал выходного тракта. Довольно большое число выходных трактов обусловлено необходимостями резервирования и ведения многоканальной записи на многорожечный магнитофон для дальнейшей обработки (например, для «наложения» звучания солиста на готовые записи звучания отдельных групп с последующей перезаписью — после обработки на пульте — на стереомагнитофон).

Не останавливаясь подробно на возможностях звукоорежиссерских пультов, рассмотрим только те операции обработки сигналов, которые вносят изменения в пространственную информацию об источнике звука.

Регулировка направления на кажущийся источник звука для сигнала с мономикрофона осуществляется распределением его на два групповых тракта с различными уровнями подобно тому, как это было показано на рис. 3.1. Практически эта операция производится потенциометрами панорамного регулятора (см. рис. 3.9).

Регулировка ширины стереопанорамы производится как в индивидуальном (если источник сигнала — стереомикрофон), так и в групповом тракте — когда стереопанорама формируется из ряда сигналов моно- и стереомикрофонов. В практической деятельности звукорежиссера часто возникает необходимость изменять протяженность группы кажущихся источников. Например, сигналы стереомикрофонов ХУ, обслуживающих небольшую группу исполнителей, необходимо преобразовать так, чтобы соответствующие кажущиеся источники занимали не всю базу громкоговорителей, а только ее среднюю часть, причем на остальной части можно «разместить» другие кажущиеся источники.

Устройство, изменяющее ширину стереопанорамы (или «акустическую ширину базы»), может состоять из двух суммарно-разностных преобразователей с раздельными регуляторами уровней суммарного и разностного сигналов (рис. 3.5). Пусть на выходе стереомикрофона имеется сигнал произвольной формы $f(t)$, причем в левом канале $af(t)$, а в правом — $bf(t)$ (случай

интенсивностей стереофонии). Положение КИЗ для данной стереопары определится величиной $\Delta L = 20 \lg \frac{b}{a}$.

На выходе $СРП_1$ получим сигнал суммы $U_m = af(t) + bf(t)$ и сигнал разности $U_S = af(t) - bf(t)$.

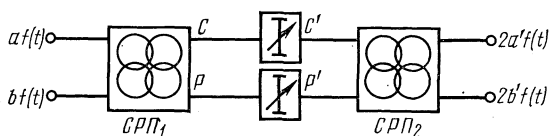


Рис. 3.5. Функциональная схема преобразователя ширины стереопанорамы

Так как в каналах суммы и разности имеются аттенюаторы, их влияние на величины суммарного и разностного сигналов учтем коэффициентами m_1 и m_2 и получим соответственно:

$$U'_m = m_1 U_m = m_1 f(t) [a + b], \quad 0 \leq m_1 \leq 1;$$

$$U'_S = m_2 U_S = m_2 f(t) [a - b], \quad 0 \leq m_2 \leq 1.$$

После второго $СРП_2$ получим сигналы

$$U'_m + U'_S = f(t) [m_1(a + b) + m_2(a - b)] = 2a'f(t);$$

$$U'_m - U'_S = f(t) [m_1(a + b) - m_2(a - b)] = 2b'f(t), \quad (3.3)$$

где $2a' = m_1(a + b) + m_2(a - b)$; $2b' = m_1(a + b) - m_2(a - b)$.

Если уровни суммарного и разностного сигналов не меняются, т. е. $m_1 = m_2 = 1$, то из последних выражений следует, что $a' = a$, $b' = b$, т. е. на выходе $СРП_2$ получим исходные сигналы стереопары.

В общем случае, когда производится регулировка уровней суммарного или разностного сигнала (после $СРП_1$), т. е. при $m_1 \neq m_2$, меняются не только уровни канальных сигналов, но и их соотношение:

$$\Delta L' = 20 \lg \frac{b'}{a'} = 20 \lg \frac{\frac{m_1}{m_2} \left(1 + \frac{b}{a}\right) + \frac{b}{a} - 1}{\frac{m_1}{m_2} \left(1 + \frac{b}{a}\right) - \frac{b}{a} + 1}. \quad (3.4)$$

Из выражения (3.4) ясно, что при $m_1 \neq m_2$ $\Delta L' \neq \Delta L$, кроме случая центрального источника ($a = b$ и $\Delta L' = \Delta L = 0$).

Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. Пусть сигналы до *СРП* отличались в 2 раза, т. е. $b/a=2$. Кажущийся источник, соответствующий этим сигналам ($\Delta L \approx 6$ дБ), локализуется на расстоянии четверти базы от ее центра, т. е. $S \approx 0,25 B$. Пусть аттенюаторы ослабляют разностный сигнал в 2 раза больше, чем суммарный, т. е. $m_1/m_2 = 2$. Определим, как при этом изменится положение КИЗ. Для этого, подставив $m_1/m_2=2$ и $b/a=2$ в выражение (3.4), получим $\Delta L' = 20 \lg 1,4 \approx 3$ дБ. Это означает, что относительное уменьшение уровня разностного сигнала приводит к уменьшению смещения КИЗ. При $\Delta L' = 3$ дБ КИЗ будет значительно ближе к центру базы ($S' = 0,15 B$).

Пример 2. Пусть теперь суммарный сигнал ослаблен в 2 раза больше, чем разностный, т. е. $m_1/m_2 = 0,5$. Для этого же сигнала ($b/a=2$) величина $\Delta L'$ окажется значительно больше — $\Delta L' = 20 \lg 5 \approx 14$ дБ, что соответствует большему смещению КИЗ ($S' \approx 0,46 B$).

Проделав подобные расчеты для других значений b/a при различном соотношении m_1/m_2 , легко убедиться, что относительное увеличение суммарного сигнала приводит к тому, что все кажущиеся источники стереопанорамы «сдвигаются» ближе к центру базы, а при относительном увеличении разностного сигнала — от ее центра. Иными словами, изменяя соотношение суммарного и разностного сигналов, можно изменять ширину стереопанорамы. Если при $m_1=m_2=1$ ширина стереопанорамы соответствовала размеру базы (B), то при $m_2 \rightarrow 0$ (разностный сигнал практически отсутствует) величина $\Delta L' \rightarrow 0$ при любых значениях b/a , т. е. для любого КИЗ. Это означает, что все кажущиеся источники локализуются в центре базы, т. е. ширина стереопанорамы равна нулю (как в монофонии).

При использовании в качестве источника сигналов стереомикрофона *MS* для регулировки ширины стереопанорамы достаточно изменять соотношение U_m/U_s с помощью аттенюаторов на входе *СРП*, причем достаточно только одного *СРП* (см. *СРП*₂ на рис. 3.5).

Регулировка протяженности КИЗ. Эта регулировка осуществляется снижением корреляции между канальными сигналами. Так, например, в рассмотренном выше двойном *СРП* при увеличении уровня разностного сигнала относительно суммарного увеличивается не только ширина стереопанорамы, но и в какой-то мере

протяженность (ширина) кажущихся источников. Последнее связано с тем, что в результате действия аттенуаторов *СРП* в одном из каналов увеличивается уровень сигнала, проникающего из другого канала в противофазе. Если в качестве исходного сигнала используется монофонический сигнал, то, подавая его на один из входов первого *СРП* (например, сигнал $af(t)$) на вход левого канала, $b=0$), на выходе второго *СРП* при $m_2=0$ образуются равные и противофазные сигналы: $m_1af(t)$ и $-m_1af(t)$. В этом случае акустическая система воспроизводит равные противофазные сигналы; кажущийся источник занимает всю ширину базы и практически не локализуется (см. рис. 2.12). Регулируя m_2 , можно в широких пределах изменять протяженность кажущегося источника. Такой прием применяется звукорежиссерами в тех случаях, когда «точечное» звучание неприемлемо по эстетическим соображениям (например, шум моря или стадиона, записанный монофонически, в стереопанораме не должен восприниматься приходящим из одной точки).

Рассмотренный способ снижения корреляции между каналными сигналами может привести к ухудшению совместимости, так как близкие по уровню противофазные сигналы при сложении практически уничтожаются. Более удобно в этом отношении сочетание *СРП* и линии задержки (магнитофонного типа) с величиной $\Delta\tau=5\div 50$ мс. Простое задерживание одного из каналных сигналов приводит к смещению КИЗ в сторону источника опережающего сигнала при потере четкости локализации. Чтобы избежать нежелательного смещения, применяют *СРП* (рис. 3.6). Регулируя

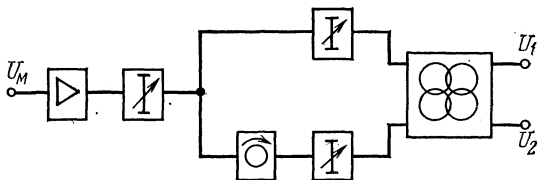


Рис. 3.6. Функциональная схема устройства, регулирующего протяженность (ширину) отдельно-го КИЗ

уровни сигналов на входе *СРП*, можно при неизменном значении τ плавно изменять ширину КИЗ от 0 до B . Важно, что при этом центр КИЗ совпадает с цент-

ром базы (регулировка азимута КИЗ производится другими регуляторами) и совместимость не нарушается.

Еще один способ снижения корреляции между канальными сигналами состоит в применении фильтров, разделяющих частотный спектр сигнала на две части (рис. 3.7). Благодаря применению фильтров ($\Phi НЧ$ в одном канале и $\Phi ВЧ$ — в другом, с одинаковой частотой среза) разность уровней канальных сигналов зависит от частоты. В результате азимутальное положение и ширина КИЗ зависят от спектра излучаемого сигнала и выбора граничной частоты фильтров. Этот способ, заимствованный от псевдостереофонических систем воспроизведения, до настоящего времени, еще применяется при формировании элементов сложной стереопанорамы [58].

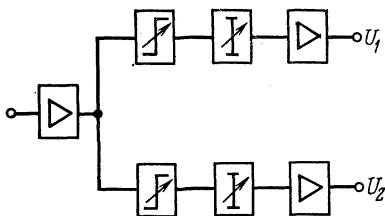


Рис. 3.7. Регулировка протяженности КИЗ с помощью фильтров ($\Phi НЧ$ и $\Phi ВЧ$)

Регулировка «глубины». Распределение кажущихся источников по акустическим «планам» производится изменением доли сигнала данного источника в общем сигнале на выходе ревербератора.

Один из упрощенных вариантов включения стереоревербератора показан на рис. 3.8. Известно, что при изменении расстояния до исполнителя в закрытом поме-

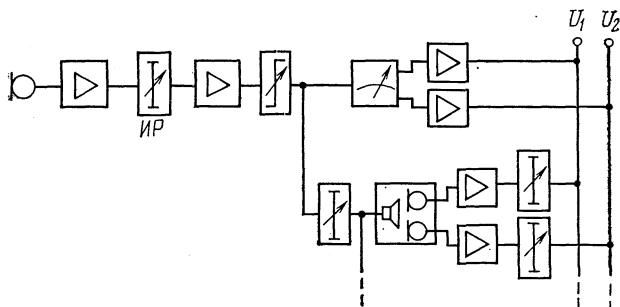


Рис. 3.8. Функциональная схема регулировки удаленности («глубины») КИЗ в одном из индивидуальных трактов

щении меняются не только уровень и акустическое отношение, но и частотная характеристика сигнала. Поэтому, если в процессе исполнения необходимо создать иллюзию удаляющегося источника, звукорежиссер должен по возможности одновременно уменьшать уровень сигнала индивидуальным регулятором, увеличивать уровень сигнала, подаваемого на ревербератор, и вводить затухание на верхних частотах. Если же изменить только акустическое отношение, эффект удаления источника не будет убедительным.

Распределение неподвижных источников по глубине производится такими же регулировками в соответствующих индивидуальных трактах. Обработка сигнала с выхода ревербератора часто производится в отдельной паре свободных индивидуальных или групповых трактов.

Выше были рассмотрены простейшие способы обработки пространственной информации в стереосигнале; современные стереофонические пульта в сочетании с возможностью многорожечной записи на магнитофон позволяют производить весьма сложную многоступенчатую обработку микрофонных сигналов [58].

3.4. Панорамный регулятор

Устройство, состоящее из двух *СРП* с регулировкой соотношения суммарного и разностного сигналов (см. рис. 3.5), позволяет осуществить только симметричную (относительно центра базы) регулировку ширины панорамы. На практике часто требуется регулировать ширину со смещением центра стереопанорамы. В современных стереофонических пультах применяют универсальные панорамные регуляторы. Функциональная схема одного из таких регуляторов приведена на рис. 3.9¹. Входы *1* и *2* панорамного регулятора подключены к выходам соседних индивидуальных трактов, а выходы *1'* и *2'* — к паре групповых трактов. В зависимости от рода используемых сигналов U_1 и U_2 на входе, положения переключателя режима работы *П* и ручек потенциометров функции панорамного регулятора существенно изменяются. Для выяснения этих функций рассмотрим ряд частных случаев.

1. Переключатель *П* находится в положении *MS/X'Y'*. Принимая для простоты расчетов коэффици-

¹ Упрощенная схема регулятора пульта ЕСС-186 фирмы «Тесла».

коэффициент усиления входных усилителей равным единице, а коэффициенты деления потенциометров — κ_1 и κ_2 , запишем выходные сигналы в функции входных:

$$\begin{aligned} U'_1 &= U_1(1 - \kappa_1) + U_2\kappa_2; \\ U'_2 &= U_1\kappa_1 - U_2\kappa_2. \end{aligned} \quad (3.5)$$

А. Входной сигнал от стереомикрофона MS:

$$U_1 = U_m; U_2 = U_S;$$

при $\kappa_1 = \kappa_2 = 0,5$ $U'_1 = \frac{1}{2}(U_m + U_S)$, $U'_2 = \frac{1}{2}(U_m - U_S)$ и схема работает как обычный СРП (преобразование MS/XY). Множитель κ_2 в выражении (3.5) означает, что второй потенциометр является регулятором разностного сигнала (U_S); следовательно, потенциометр κ_2 в этом режиме работы является регулятором ширины (PШ). При изменении κ_2 в пределах от единицы до нуля ширина стереопанорамы уменьшается от значения B до нуля.

От положения регулятора κ_1 зависит положение центра стереопанорамы (при $\kappa_2 = \text{const}$), следовательно, потенциометр κ_1 выполняет функции регулятора направления (РН). Для большей наглядности работа регуляторов ширины и направления в режиме MS/X'Y' иллюстрируется табл. 3.1.

Б. На входе 1 сигнал от мономикрофона; $U_2 = 0$.

Согласно ур-ниям (3.5) при $\kappa_1 = 0$ $U'_1 = U_1$ и $U'_2 = 0$ — КИЗ локализуется в левом громкоговорителе; при $\kappa_1 = 0,5$ $U'_1 = \frac{1}{2}U_1$ и $U'_2 = U_2/2$ — КИЗ локализуется в центре базы; аналогично при $\kappa_1 = 1$ — в правом громкоговорителе.

Следовательно, при действии монофонического сигнала регулятор κ_1 позволяет плавно изменять положение КИЗ в пределах всей базы, а κ_2 на это не влияет.

2. Переключатель Π в положении XY/X'Y':

$$U'_1 = \kappa_1 U_1 + U_2(1 - \kappa_2); U'_2 = \kappa_2 U_2 + U_1(1 - \kappa_1). \quad (3.6)$$

А. На входе 2 сигналы от стереомикрофона XY. Анализ выражений (3.6) показывает, что в этом слу-

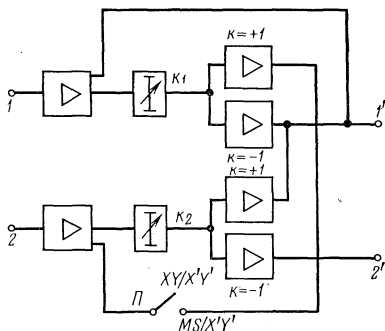


Рис. 3.9. Функциональная схема панорамного регулятора

Таблица 3.1

Работа панорамного регулятора в режиме MS/X'Y'

| Положения регуляторов | |  Исходная стереопанорама | Примечания |
|-----------------------|------------|--|--|
| κ_1 | κ_2 | | |
| 0 | 0 | 1÷5 | Монозвучание в различных точках базы |
| 0,25 | 0 | 1÷5 | |
| 0,5 | 0 | 1÷5 | |
| 0,75 | 0 | 1÷5 | |
| 1,0 | 0 | 1÷5 | |
| 0 | 0,5 | 1÷4 5 | Регулировка ширины со смещением центра |
| 0,25 | 0,5 | 1 2 3 4 5 | |
| 0,5 | 0,5 | 1 2 3 4 5 | |
| 0,75 | 0,5 | 1 2 3 4 5 | |
| 1,0 | 0,5 | 1 2÷5 | |
| 0,5 | 0 | 1÷5 | Симметричная регулировка ширины |
| 0,5 | 0,25 | 1 2 3 4 5 | |
| 0,5 | 0,6 | 1 2 3 4 5 | |
| 0,5 | 0,8 | 1 2 3 4 5 | |
| 0,5 | 1,0 | 1 2 3 4 5 | |
| 0 | 0,25 | 1÷5 | Смещение центра стереопанорамы |
| 0,25 | 0,25 | 1 2 3 4 5 | |
| 0,5 | 0,25 | 1 2 3 4 5 | |
| 0,75 | 0,25 | 1 2 3 4 5 | |
| 1,0 | 0,25 | 1÷5 | |

чае оба потенциометра влияют на ширину и положение центра стереопанорамы. При одновременном изменении κ_1 и κ_2 от 0 до 0,5 происходит симметричное «сжатие» стереопанорамы от значения величины B до

0 (моновучание в центре базы). При дальнейшем повороте обеих ручек ($\kappa_1 = \kappa_2$) от 0,5 до 1 ширина стереопанорамы увеличивается от 0 до B , но с обратным расположением кажущихся источников (табл. 3.2). При движении только одного потенциометра происходят регулировка ширины и смещение центра панорамы одновременно.

В общем случае положение любого КИЗ в результате действия панорамного регулятора может быть рассчитано по изменению величины $\Delta L'$ в сравнении с ΔL (до регулировки):

$$\Delta L' = 20 \lg \frac{U_2'}{U_1'} = 20 \lg \frac{\kappa_2 U_2 + (1 - \kappa_1) U_1}{\kappa_1 U_1 + (1 - \kappa_2) U_2}; \quad \Delta L = 20 \lg \frac{U_2}{U_1}.$$

Б. На входе 1 сигналы от двух мономикрофонов. Если сигналы, действующие на микрофоны, не коррелированы, то κ_1 регулирует положение КПЗ, соответствующего сигналу U_1 от первого микрофона, а κ_2 — соответственно U_2 от второго микрофона. Следовательно, в этом случае панорамный регулятор работает как два независимых регулятора направлений (аналогично функциональной схеме синтезатора стереосигнала на рис. 3.1).

В современных звукорежиссерских пультах применяют более сложные схемы панорамных регуляторов, позволяющих четко разделить функции регуляторов ширины и направления. Так, на рис. 3.10 представлена

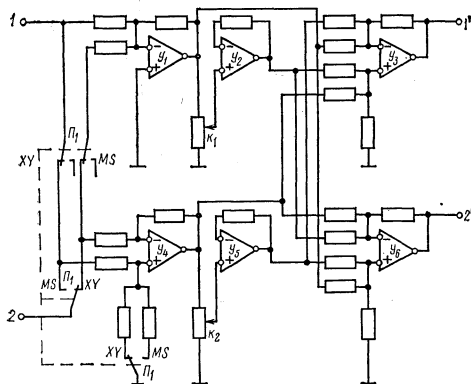



Рис. 3.10. Панорамный регулятор на операционных усилителях

Таблица 3.2

Работа панорамного регулятора в режиме ХУ/Х'У'

| Положения регуляторов | |  | Примечания |
|-----------------------|----------------|---|--|
| К ₁ | К ₂ | | |
| 0 | 0 | 1 2 3 4 5 | Симметричная регулировка ширины |
| 0,25 | 0,25 | 1 2 3 4 5 | |
| 0,4 | 0,4 | 1 2 3 4 5 | |
| 0,5 | 0,5 | 1 ÷ 5 | |
| 0,6 | 0,6 | 5 4 3 2 1 | |
| 0,75 | 0,75 | 5 4 3 2 1 | |
| 1,0 | 1,0 | 5 4 3 2 1 | |
| 0,75 | 1,0 | 5 4 3 2 1 | |
| 0,5 | 1,0 | 5 4 3 2 1 | |
| 0,4 | 1,0 | 5 4 3 2 1 | |
| 0 | 1,0 | 5 ÷ 1 | Симметричная регулировка ширины инверсной панорамы |
| 0 | 0,6 | 1 2 3 4 5 | |
| 0 | 0,5 | 1 2 3 4 5 | |
| 0 | 0,25 | 1 2 3 4 5 | |
| 0 | 0 | 1 2 3 4 5 | |
| 0,25 | 0 | 1 2 3 4 5 | |
| 0,5 | 0 | 1 2 3 4 5 | |
| 0,6 | 0 | 1 2 3 4 5 | |
| 1,0 | 0 | 1 ÷ 5 | |
| 1,0 | 0,4 | 5 4 3 2 1 | |
| 1,0 | 0,5 | 5 4 3 2 1 | Регулировка ширины со смещением центра и инверсией |
| 1,0 | 0,75 | 5 4 3 2 1 | |

упрощенная принципиальная схема *РН* и *РШ* пульта 2010К (фирмы «Тесла»). Особенностью этой схемы является независимость алгоритма от рода входных сигналов (конечно, при условии, что переключатель Π_1 находится в соответствующем положении):

$$\left. \begin{aligned} U'_1 &= U_M \left(\frac{3}{2} - 2\kappa_1 \right) + U_S (1 - 2\kappa_2) = U_1 (1,25 - \kappa_1 + \kappa_2) + \\ &+ U_2 (0,25 - \kappa_1 + \kappa_2); \\ U'_2 &= U_M (0,5 + 2\kappa_1) - U_S (1 - 2\kappa_2) = U_1 (\kappa_1 + \kappa_2 - 0,25) + \\ &+ U_2 (0,75 + \kappa_1 - \kappa_2). \end{aligned} \right\} \quad (3.6a)$$

Анализ ур-ний (3.6a) показывает, что потенциометр κ_1 управляет положением центра стереопанорамы, т.е. это *РН*, а κ_2 регулирует ширину стереопанорамы (*РШ*).

Исходная стереопанорама наблюдается при $\kappa_1 = 0,25$, $\kappa_2 = 0$. Поворот потенциометра *РШ* из крайнего левого в среднее положение ($\kappa_2 = 0,5$) при $\kappa_1 = 0,25$ приводит к симметричному «сжатию» стереопанорамы в точку (монозвучание в центре базы). Дальнейшее смещение *РШ* ($\kappa_2 \rightarrow 1$) приводит к «растяжению» стереопанорамы с обратным расположением сторон.

С помощью *РН* (при $\kappa_2 = 0$) можно смещать центр стереопанорамы из центра базы при $\kappa_1 = 0,25$ примерно до $0,7 \frac{B}{2}$ влево (при $\kappa_1 = 0$) или в крайнее правое положение (при $\kappa_1 = 0,75$). Дальнейшее перемещение движка потенциометра в пределах

$$0,75 < \kappa_1 < 1,0 \text{ при } \kappa_2 = 0$$

приводит к некоторому смещению правого края стереопанорамы за пределы базы.

Действительно, подставляя в (3.6a) $\kappa_1 = 1$ и $\kappa_2 = 0$, получим:

$$U'_1 = 0,25U_1 - 0,75U_2; \quad U'_2 = 0,75U_1 + 1,75U_2.$$

Для источника, локализовавшегося до преобразования в центре базы ($U_1 = U_2$, $\Delta L = 0$), после преобразования на выходе *РН* получим:

$$U'_1 = -0,5U_1; \quad U'_2 = +2,5U_1.$$

При $\Delta L' = 20 \lg |U'_2/U'_1| \approx 17$ дБ, кажущийся источник звука должен локализоваться в области правого гром-

коговорителя, однако из-за противофазности сигналов его локализация будет нечеткой, с некоторым смещением за пределы базы.

3.5. Искажения пространственной панорамы

Как отмечалось выше, расположение звучащих объектов в стереопанораме, как правило, не соответствует реальному расположению исполнителей при записи. Более того, такое несоответствие учитывается, а зачастую планируется звукорежиссером и потому не может считаться искажением пространственной информации. Поэтому в дальнейшем под неискаженной будем понимать стереопанораму, соответствующую замыслу звукорежиссера.

Естественно, что слушатель, находящийся во вторичном помещении, будет воспринимать неискаженную стереопанораму при соблюдении следующих условий:

1) база громкоговорителей при воспроизведении должна соответствовать базе контрольных агрегатов при записи;

2) расстояние слушателя от громкоговорителей должно соответствовать условиям работы звукорежиссера (обычно 2,5—3 м);

3) каналы воспроизведения (включая громкоговорители) должны быть идентичными (кроме того, предполагаются достаточно высокие качественные показатели тракта воспроизведения);

4) правильная установка стереобаланса;

5) слушатель должен находиться точно на равных расстояниях от громкоговорителей.

Посмотрим, насколько важно соблюдение этих условий при воспроизведении.

Выполнение первого условия обычно не вызывает трудностей, так как база контрольных агрегатов находится в пределах 2—3 м. Изменение базы воспроизводящей системы в достаточно широких пределах (1—3 м) не вызывает каких-либо существенных изменений, кроме изменения масштаба стереопанорамы (это следует из постоянства формы кривых рис. 2.3а). Чрезмерное уменьшение базы приближает звучание к монофоническому ($B=0$); увеличение — к ухудшению четкости локализации и неустойчивости центральной части стереопанорамы¹.

¹ Эти явления подробно рассмотрены в § 3.6.

Второе условие также выполняется без каких-либо затруднений. При перемещении слушателя вдоль оси симметрии системы воспроизведения расположение КИЗ остается постоянным (из-за постоянства формы кривых рис. 2.7), меняется лишь угловая ширина кажущегося ансамбля. Следует заметить, что при слишком близком расположении слушателя от линии базы наблюдается неестественный подъем центральной части стереопанорамы выше линии базы. Таким образом, изменение B и y в достаточно широких пределах не вызывает каких-либо нежелательных явлений при стереовоспроизведении. Третье и четвертое условия должны выполняться с достаточно большой точностью. Известно, что изменение усиления в одном из каналов на 2—3 дБ вызывает заметное смещение кажущихся источников центральной части стереопанорамы.

Несовпадение частотных характеристик обоих каналов вызывает частотозависимое смещение кажущихся источников, которое не может быть устранено регулятором стереобаланса.

Следует также учитывать, что у разных индивидуумов чувствительность левого и правого уха может отличаться, и потому точная установка стереобаланса в ряде случаев¹ должна производиться индивидуально.

Нарушение пятого условия — т. е. асимметричное положение слушателя — приводит к появлению дополнительных временной (Δt_{xy}) и интенсивностной (ΔL_{xy}) разностей, вызванных неравенством расстояний до громкоговорителей и различием факторов направленности последних. А так как орган слуха не в состоянии распознать происхождение различий в воспринимаемых сигналах, величины ΔL_{xy} и Δt_{xy} , складываясь со значениями ΔL и Δt , вводимыми в процессе формирования стереопанорамы при записи, приводят к весьма заметным искажениям воспринимаемой панорамы (так называемые пространственные искажения). Наглядное представление о характере пространственных искажений при асимметричном положении слушателя дает рис. 3.11а. При малых значениях x , т. е. смещениях слушателя от оси симметрии, искажения стереопанорамы проявляются так же, как и при неточной установке стереобаланса; при больших — стереопанорама

¹ Например, это важно при проведении экспериментальных исследований локализации.

сильно деформируется — вся ее центральная часть оказывается смещенной в сторону ближайшего к слушателю громкоговорителя.

Для определения количественных закономерностей, характеризующих пространственные искажения в воспроизводящей системе обычного типа, была проведена серия субъективно-статистических экспертиз. Задачей экспертов было определить расположение пяти рече-

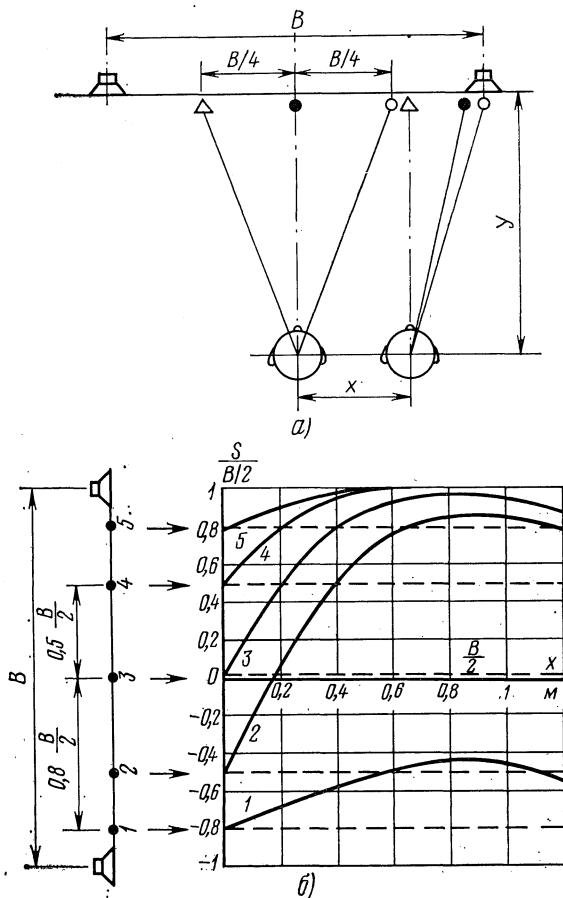


Рис. 3.11. Пространственные искажения при асимметричном положении слушателя (а); расположение кажущихся источников в стереопанораме при перемещении слушателя параллельно базе вправо от оси симметрии (б). $B=1,8$ м, $y=1,5$ м

вых источников на линии базы в зависимости от расстояния x от оси симметрии. Начальное положение этих источников (при $x=0$, т. е. когда эксперт находится на оси симметрии) соответствовало положению, показанному на левой части рис. 3.11б. Использование свойства взаимной независимости положения кажущихся источников в стереопанораме дало возможность предъявлять экспертам пять источников не одновременно, а поочередно. Такая методика упрощала задачу экспертов, что способствовало повышению достоверности полученных результатов.

Статистическая обработка экспертопоказаний дала зависимость положений кажущихся источников от перемещения слушателя вдоль линии базы (см. рис. 3.11б). В дальнейшем такое семейство кривых будет называться пространственными характеристиками системы воспроизведения. Если бы в рассматриваемой системе пространственные искажения полностью отсутствовали, то соответствующие пространственные характеристики имели бы вид прямых линий (см. рис. 3.11б. пунктир).

Как видно из графиков, КИЗ, расположенные в средней части базы (2, 3, 4-й), при небольших смещениях слушателя смещаются почти пропорционально, так что их взаимное расположение практически не меняется. Это объясняется тем, что зависимости, определяющие взаимное положение КИЗ на линии базы (см. рис. 2.2а и 2.4), имеют линейные участки до значения $\Delta L \approx 6 \div 7$ дБ и $\Delta \tau \approx 0,8$ мс, а при малых x суммарные значения ΔL и $\Delta \tau$ (с учетом ΔL_{xy} и $\Delta \tau_{xy}$) не превосходят названных величин.

Кажущиеся источники звука, находящиеся дальше от центра базы (1 и 5-й), меньше подвержены пространственным искажениям вследствие нелинейности зависимости $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L, \Delta \tau)$, так как при формировании этих источников введены большие различия ΔL или $\Delta \tau$ ($\Delta L > 7$ дБ или $\Delta \tau > 0,8$ мс). Это наглядно показано на рис. 3.11б для боковых источников (1 и 5-й), удаленных от центрального на $\pm 0,8 \frac{B}{2}$.

Для крайних источников звука, положение которых на линии базы обусловлено значительными различиями канальных сигналов ($\Delta L > 20$ дБ, $\Delta \tau > 1$ мс), пространственные искажения практически отсутствуют.

Для этих источников, локализуемых в направлениях на громкоговорители, стереофоническая передача вы рождается в две (по числу каналов) монофонические передачи. В этих условиях кажущийся источник превращается в действительный источник (громкоговоритель), не подверженный пространственным искажениям.

На основании представленных графиков можно сделать следующие выводы:

а) пространственные искажения, выражающиеся в изменении местоположений отдельных источников звука, при любом начальном положении последних достигают максимальных значений при $x = \pm B/2$, т. е. в том случае, когда слушатель находится напротив одного из излучателей;

б) центральные источники стереопанорамы наиболее подвержены пространственным искажениям, в то время как крайние боковые почти не меняют своих положений при любых положениях слушателя;

в) при значительных смещениях слушателя от оси симметрии (около 0,5 м) наблюдается «разрыв» стереопанорамы на две части: бóльшая часть кажущихся источников локализуется в направлении ближайшего громкоговорителя, остальные — в области более удаленного громкоговорителя;

г) полученные графики справедливы для системы воспроизведения, состоящей из обычных, фронтально расположенных громкоговорителей (акустические оси нормальны к линии базы) при $B = 1,8$ м, $y = 1,5$ м.

При другом расположении громкоговорителей картина пространственных искажений зависит от характеристик направленности громкоговорителей, но качественно остается такой же.

Из-за пространственных искажений слушатель, находящийся вне оси симметрии системы воспроизведения, получает неверное представление о звучащем ансамбле (точнее, о замысле звукорежиссера). Однако особенности восприятия стереоэффекта в этих условиях не ограничиваются только пространственными искажениями (хотя этот фактор, по-видимому, играет наиболее важную роль). Пространственные искажения сопровождаются следующими изменениями. Направления прихода отраженных звуков студии искажаются в той же мере, что и прямых звуков. «Вторичные» кажущиеся источники не воспринимаются как отдельные

звучащие объекты, однако они играют важную роль в восприятии, так как содержат информацию об акустических особенностях первичного помещения (см. гл. 5). Известно, что от направления прихода отзвука зависит его заметность [105]. Нарушается баланс громкости в стереопанораме; ближние (к слушателю) источники кажутся значительно более громкими, чем источники на противоположном краю базы (это явление подробно рассматривается в § 3.7). Изменяется тембр звучания, главным образом за счет частотной зависимости характеристик направленности громкоговорителей. Кроме того, тембровая окраска звучания зависит от пространственного реверберационного процесса, на который оказывают влияние пространственные искажения. Прозрачность звучания для большинства кажущихся источников ухудшается. Это вызвано, во-первых, пространственным сближением выделяемого и мешающего источников, во-вторых, изменением исходного соотношения громкостей источников.

Таким образом, при смещении слушателя в сторону от оси симметрии все перечисленные особенности стереовосприятия претерпевают существенные изменения, что отрицательно сказывается на оценке качества воспринимаемых стереопрограмм (см. § 1.4).

Рациональное конструирование громкоговорителей, как будет показано в гл. 6, позволит почти полностью устранить пространственные искажения.

3.6. Интерференционные явления при стереовоспроизведении

Проявление Δt_{xy} при стереовоспроизведении не ограничивается только пространственными искажениями. Так как звуковое поле при стереовоспроизведении обусловлено как минимум двумя источниками коррелированных сигналов, в любой его точке в зависимости от ее координат и частотных свойств воспроизводимого сигнала наблюдается интерференционное усиление или ослабление суммарного сигнала.

Рассмотрим, как изменится частотная характеристика суммарного сигнала в произвольной точке звукового поля в результате интерференции. Пусть воспроизводится сигнал произвольного вида, отображаемый нормализованной функцией $f(t)$, причем левый громкоговоритель на расстоянии 1 м в направлении своей аку-

стической оси создает звуковое давление $p_1 f(t)$, а правый — соответственно $p_2 f(t - \Delta\tau)$. Соотношение p_1/p_2 и величина $\Delta\tau$ определяют заданное звукорежиссером положение данного кажущегося источника на линии базы для симметрично расположенного слушателя. Мгновенное значение звукового давления в произвольной точке поля определяется суммированием сигналов громкоговорителей:

$$f_{\Sigma}(t) = \frac{p_1}{l_1} \mathcal{D}_1(\psi_1) f(t) + \frac{p_2}{l_2} \mathcal{D}_2(\psi_2) f(t + \Delta\tau + \Delta\tau_{xy}), \quad (3.7)$$

где l_1 и l_2 — расстояния до левого и правого громкоговорителей соответственно (в метрах); $\mathcal{D}_1(\psi)$ и $\mathcal{D}_2(\psi)$ — характеристики направленности громкоговорителей по звуковому давлению; ψ_1 и ψ_2 — направления на громкоговорители из рассматриваемой точки поля.

Если в рассматриваемой точке появится слушатель, звуковое поле вблизи каждого его уха изменится в результате дифракции. Введение соответствующих коэффициентов, учитывающих дифракцию, — ρ_1 , ρ_2 , τ_1 и τ_2 (см. рис. 1.1) — дает возможность определить каждый из моноуральных сигналов:

$$f_{\text{л}}(t) = \rho_1 \frac{p_1}{l_1} \mathcal{D}_1(\psi_1) f(t - \tau_1) + \rho_2 \frac{p_2}{l_2} \mathcal{D}_2(\psi_2) f(t + \Delta\tau + \Delta\tau_{xy} - \tau_2);$$

$$f_{\text{п}}(t) = \rho_2 \frac{p_1}{l_1} \mathcal{D}_1(\psi_1) f(t - \tau_2) + \rho_1 \frac{p_2}{l_2} \mathcal{D}_2(\psi_2) f(t + \Delta\tau + \Delta\tau_{xy} - \tau_1).$$

Определив спектры амплитуд этих сигналов¹ и перейдя к спектральной плотности мощности, после преобразований получим:

$$w_{\text{л}}(f) = w_0(f) \left\{ \rho_1^2 \frac{p_1^2}{l_1^2} \mathcal{D}_1^2(\psi_1) + \rho_2^2 \frac{p_2^2}{l_2^2} \mathcal{D}_2^2(\psi_2) + 2\rho_1\rho_2 p_1 p_2 \times \right. \\ \left. \times \frac{\mathcal{D}_1(\psi_1) \mathcal{D}_2(\psi_2)}{l_1 l_2} \cos [\omega (\Delta\tau + \Delta\tau_{xy} + \tau_1 - \tau_2)] \right\}; \quad (3.8)$$

$$w_{\text{п}}(f) = w_0(f) \left\{ \rho_2^2 \frac{p_1^2}{l_1^2} \mathcal{D}_1^2(\psi_1) + \rho_1^2 \frac{p_2^2}{l_2^2} \mathcal{D}_2^2(\psi_2) + \right.$$

¹ Подобные преобразования рассмотрены при выводе выражения (6.18).

$$+ 2\rho_1\rho_2 p_1 p_2 \frac{\mathcal{D}_1(\Psi_1) \mathcal{D}_2(\Psi_2)}{l_1 l_2} \cos [\omega (\Delta\tau + \Delta\tau_{xy} + \tau_2 - \tau_1)] \Big\}, \quad (3.9)$$

где $\omega_{\text{л}}(f)$ и $\omega_{\text{п}}(f)$ — спектральные плотности мощности суммарных сигналов, воспринимаемых соответственно левым и правым ухом; $\omega_0(f)$ — спектральная плотность мощности излучаемого сигнала.

Выражения в фигурных скобках характеризуют изменения в спектре сигнала, вызванные интерференцией. Согласно полученным выражениям интерференционные изменения спектра сигнала могут быть в равной степени вызваны как межканальной временной разностью $\Delta\tau$, так и $\Delta\tau_{xy}$, возникающей при асимметричном положении слушателя. Вследствие интерференции в спектрах воспринимаемых сигналов появляется периодическое чередование максимальных и минимальных значений, обусловленное косинусоидальной составляющей. Положение на оси частот минимумов спектральных характеристик воспринимаемых сигналов можно определить из выражений (3.8) и (3.9), приравняв каждый из косинусов минус единице:

$$[f_{\text{л.мин}} = \frac{2k+1}{2[\Delta\tau_{xy} + \Delta\tau + \tau_1 - \tau_2]}, \quad (3.10)$$

$$f_{\text{п.мин}} = \frac{2k+1}{2[\Delta\tau_{xy} + \Delta\tau + \tau_2 - \tau_2]}, \quad (3.11)$$

где $k=0, 1, 2, 3, \dots$

Рассмотрим некоторые частные случаи. Пусть рассматриваемая точка расположена вблизи оси симметрии системы, т. е. при $x \ll l_1$. Для этого случая можно допустить, что

$$l_1 \approx l_2 \approx l_0, \quad \mathcal{D}_1(\Psi_1) \approx \mathcal{D}_2(\Psi_2) \approx \mathcal{D}(\Psi_0). \quad (3.12)$$

Интенсивностная стереофония ($\Delta\tau=0$). С учетом принятых допущений:

$$\omega_{\text{л}}(f) = \omega_0(f) \frac{\mathcal{D}^2(\Psi_0)}{l_0^2} \{ \rho_1^2 p_1^2 + \rho_2^2 p_2^2 + 2\rho_1\rho_2 p_1 p_2 \times \\ \times \cos [\omega (\Delta\tau_{xy} + \tau_1 - \tau_2)] \};$$

$$\omega_{\text{п}}(f) = \omega_0(f) \frac{\mathcal{D}^2(\Psi_0)}{l_0^2} \{ \rho_2^2 p_1^2 + \rho_1^2 p_2^2 + 2\rho_1\rho_2 p_1 p_2 \times \\ \times \cos [\omega (\Delta\tau_{xy} + \tau_2 - \tau_1)] \}.$$

Определим неравномерность спектральных характеристик воспринимаемых сигналов:

$$N_{\text{л}} = 10 \lg \frac{\omega_{\text{л. макс}}(f)}{\omega_{\text{л. мин}}(f)} = 20 \lg \frac{\rho_1 \rho_1 + \rho_2 \rho_2}{\rho_1 \rho_1 - \rho_2 \rho_2} = 20 \lg \frac{\frac{\rho_1}{\rho_2} + \frac{\rho_1}{\rho_2}}{\frac{\rho_1}{\rho_2} - \frac{\rho_1}{\rho_2}};$$

$$N_{\text{п}} = 10 \lg \frac{\omega_{\text{п. макс}}(f)}{\omega_{\text{п. мин}}(f)} = 20 \lg \frac{\frac{\rho_1}{\rho_2} + \frac{\rho_1}{\rho_2}}{\frac{\rho_1}{\rho_2} - \frac{\rho_1}{\rho_2}}.$$

1. Если $\rho_1/\rho_2 = \rho_1/\rho_2$ или $\rho_1/\rho_2 = \rho_2/\rho_1$, то спектральные характеристики соответственно правого и левого моноуральных сигналов периодически обращаются в нуль. При этом неравномерности этих характеристик равны бесконечности. Для средних частот величина $20 \lg \rho_1/\rho_2$ имеет порядок 4—5 дБ (см. рис. 1.1а), следовательно, описанное выше явление наблюдается для кажущихся источников, расположенных вблизи центра базы [$\Delta L = 4 \div 5$ дБ; $S = (0,3 \div 0,4) \frac{B}{2}$].

2. При $\rho_1/\rho_2 = 0$ (или $\rho_2/\rho_1 = 0$), т. е. кажущиеся источники расположены на краях базы:

$$\omega_{\text{л}}(f) \approx \omega_0(f) \rho_1^2 \frac{\mathcal{D}^2(\psi_0)}{l_0^2}; \quad \omega_{\text{п}}(f) \approx \omega_0(f) \rho_2^2 \frac{\mathcal{D}^2(\psi_0)}{l_0^2}.$$

При этом спектральные характеристики моноуральных сигналов не подвержены интерференции.

3. Для промежуточных положений кажущихся источников

$$\omega_{\text{л}}(f) > 0; \quad \omega_{\text{п}}(f) > 0; \quad 0 < N_{\text{л}} < \infty; \quad 0 < N_{\text{п}} < \infty.$$

Временная стереофония ($\rho_1/\rho_2 = 1$; $\Delta\tau = \text{var}$):

$$\omega_{\text{л}}(f) = \omega_0(f) \frac{\mathcal{D}^2(\psi_0)}{l_0^2} \left\{ \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^2 + 1 + 2 \frac{\rho_1}{\rho_2} \cos [\omega (\Delta\tau + \Delta\tau_{xy} + \tau_1 - \tau_2)] \right\} \rho_2^2 \rho_2^2;$$

$$\omega_{\text{п}}(f) = \omega_0(f) \frac{\mathcal{D}^2(\psi_0)}{l_0^2} \left\{ \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^2 + 1 + 2 \frac{\rho_1}{\rho_2} \cos [\omega (\Delta\tau + \Delta\tau_{xy} + \tau_2 - \tau_1)] \right\} \rho_2^2 \rho_2^2.$$

Из последних выражений следует, что при временной стереофонии неравномерность спектральных характеристик моноуральных сигналов не зависит от положения КИЗ на линии базы (т. е. это относится в равной мере ко всей панораме). Наибольшая неравномерность ($N_{л \rightarrow \infty}$ и $N_{п \rightarrow \infty}$) наблюдается при $\rho_1/\rho_2 \rightarrow 1$, что справедливо для низкочастотных сигналов ($f < 300$ Гц согласно рис. 1.1). Положения минимальных значений спектральных характеристик на оси частот зависят от положения кажущегося источника на линии базы ($\Delta\tau$) и от координат точки наблюдения ($\Delta\tau_{xy}$).

Таким образом, не все сигналы, участвующие в формировании пространственной панорамы, в равной мере подвержены интерференционному искажению спектров. Наиболее сильно это проявляется для кажущихся источников вблизи центра базы при интенсивной стереофонии и для всех низкочастотных источников при временной стереофонии. В обоих случаях интерференция выражена сильнее при небольших смещениях слушателя от оси симметрии, так как при больших смещениях условие (3.12) не выполняется и суммируемые сигналы становятся различными по величине из-за влияния направленности громкоговорителей и разности расстояний до последних.

При малых значениях суммы ($\Delta\tau_{xy} + \Delta\tau$) первый минимум спектральной характеристики расположен в области высоких частот. С увеличением $\Delta\tau_{xy}$ этот минимум смещается в сторону более низких частот [выражения (3.10) и (3.11) при $k=0$]. Важно отметить, что во всех случаях положения минимумов спектральных характеристик воспринимаемых сигналов не совпадают, т. е. $f_{л.мин} \neq f_{п.мин}$. А так как энергия спектра реального вещательного сигнала распределена по частоте неравномерно, то сигналы, воспринимаемые левым и правым ухом, будут отличаться по интенсивности. Иными словами, появится бинауральная интенсивностная разность, величина и знак которой определяются интерференцией

$$\Delta L'_6 = 10 \lg \frac{P_{л}(f)}{P_{п}(f)} = 10 \lg \frac{\int_0^{\infty} \omega_{л}(f) df}{\int_0^{\infty} \omega_{п}(f) df},$$

где $P_{л}(f)$ и $P_{п}(f)$ — спектральные мощности бинауральных сигналов.

Очевидно, что вследствие неравенства $\omega_{л}(f)$ и $\omega_{п}(f)$ (особенно в ограниченной полосе частот) бинауральная интенсивностная разность не равна нулю даже для центральных источников панорамы, что повлечет за собой дополнительные искажения локализации (наряду с непосредственным влиянием $\Delta\tau_{xy}$).

При малых базах для появления первого минимума $\omega_{л}(f)$ или $\omega_{п}(f)$ в диапазоне средних частот (300—1000 Гц) необходимо значительное смещение слушателя от оси симметрии, однако при этом суммируемые сигналы различны по величине и роль интерференции снижается. При больших базах величина $\Delta\tau_{xy}$, соответствующая этому же условию, достигается при незначительном смещении от оси симметрии, где еще выполняется условие (3.12). Поэтому интерференционные явления наиболее сильно выражены в системах воспроизведения с большими базами.

Из расчетов [29], проведенных для симметричного положения слушателя, следует, что введение $\Delta\tau$ в пределах от 0 до 0,35 мс приводит к возникновению бинауральной интенсивностной разности порядка 4—8 дБ на частотах 300—1000 Гц. При дальнейшем увеличении $\Delta\tau$ эта разность уменьшается. Последнее может быть объяснено с помощью выражений (3.10) и (3.11), из которых следует, что наиболее сильное различие по частоте положений минимумов спектральных характеристик $\omega_{л}(f)$ и $\omega_{п}(f)$ наблюдается в том случае, когда $(\Delta\tau_{xy} + \Delta\tau)$ соизмеримо с $(\tau_1 - \tau_2)$. Для средних частот при $2\psi_0 = 60^\circ$ эта разность имеет порядок 0,30—0,5 мс (см. рис. 1.1б). При $|\Delta\tau_{xy} + \Delta\tau| \gg |\tau_1 - \tau_2|$ $f_{л.мин}$ практически совпадает с $f_{п.мин}$, поэтому спектральные характеристики обоих моноуральных сигналов сближаются и бинауральная интенсивностная разность $\Delta L'_6$ исчезает.

Благодаря бинауральному приему, а также наличию отраженных звуков в помещении прослушивания заметность интерференционных явлений снижается и они почти не влияют на тембр звучания. Однако нельзя сказать, что эти явления совсем не замечаются слушателями. При воспроизведении узкополосных сигналов, особенно в заглушенных помещениях, при перемещении вдоль линии базы слушатель ощущает периодическое изменение громкости для каждого уха. В ус-

ловиях жилых помещений эти явления менее заметны, так как уровень диффузного звука ограничивает «провалы» частотной характеристики сигнала, однако интерференционные изменения уровней прямого звука приводят к локализационным искажениям. Практически эти искажения выражаются в неустойчивом положении центральных источников при очень малых (несколько сантиметров) смещениях слушателя от оси симметрии (наиболее сильно это проявляется при $B > 3$ м). При дальнейшем смещении слушателя эти явления исчезают, так как возникает различие по уровню между суммируемыми сигналами. Таким образом, наиболее неблагоприятной с точки зрения интерференции является область вблизи оси симметрии при больших базах.

3.7. Баланс громкости при стереовоспроизведении

Общие сведения. Как уже отмечалось, при асимметричном положении слушатель воспринимает искаженную стереопанораму. Другой, возможно менее важной особенностью асимметричного восприятия стереопрограммы является изменение заданного звукорежиссером баланса громкостей отдельных звучащих объектов. Так, например, при передаче стереопанорамы, состоящей из ряда равногромких источников звука, слушателю, находящемуся вне оси симметрии, ближайший источник кажется преувеличенно громким по сравнению с остальными. Следствием нарушения баланса громкостей (или «музыкального баланса») является ухудшение «прозрачности» звучания.

Пространственные искажения обычно сопровождаются нарушениями музыкального баланса, причем оба эти фактора в той или иной мере способствуют снижению предпочтительности стереовоспроизведения. Если пространственные искажения являются субъективной реакцией бинаурального слуха на величины ΔL_{xy} и $\Delta \tau_{xy}$, то нарушение баланса громкости — явление чисто объективное, связанное с изменением интенсивностей звучания при формировании бинауральных сигналов (т. е. до «входа» слухового анализатора).

Известно, что приращение уровня громкости зависит не только от приращения интенсивности звука, но также от абсолютного уровня и частоты (см. «Кривые

равной громкости» [55]). Для определения громкости КИЗ нужно знать не только уровень прямого, но диффузного звука, соответствующего данному источнику. Поэтому для оценки музыкального баланса вместо громкости более удобно использовать понятие интенсивности прямого звука, сознавая, что в результате такой замены расчеты будут носить качественный характер. Роль первых отражений, несущих наибольшую энергию, в создании субъективного ощущения громкости в условиях жилого помещения существенно меньше, чем в условиях больших залов, студий и т. п., по следующим причинам:

малое время реверберации жилых помещений;
уровень прямых звуков достаточно высок по сравнению с уровнями первых отражений из-за малого расстояния от громкоговорителя до слушателя, а также из-за значительной концентрации звуковой энергии, свойственной излучателям средних и высоких частот;
энергетическая «добавка», обусловленная отраженными звуками (в интервале «памяти» слуха), мала вследствие быстрого спада автокорреляционной функции, что характерно для большинства вещательных сигналов;

слуховой анализатор обладает свойством маскировать задержанные во времени повторения сигнала, причем наиболее сильно маскируются сигналы, имеющие малое запаздывание, т. е. именно те сигналы, которые обладают наибольшей энергией. Так, например, эхо-сигнал, запаздывающий на 3—5 мс, будет восприниматься равногромким с прямым звуком только в том случае, если уровень эхо-сигнала увеличить на 12—15 дБ по сравнению с уровнем прямого сигнала [105], [106].

Таким образом, можно считать, что ощущение громкости звука во вторичном помещении формируется в значительной мере за счет прямых звуков от громкоговорителей.

Рассмотрим, как меняется суммарная интенсивность прямого звука, создаваемого двумя громкоговорителями системы воспроизведения при различном положении слушателя. Положение КИЗ, заданное величинами ΔL и $\Delta \tau$, оказывает существенное влияние на суммарную интенсивность звука в рассматриваемой точке поля. Для удобства расчетов будем задавать не положение КИЗ на линии базы, а величины ΔL и $\Delta \tau$,

по которым, используя известные графики рис. 2.2а и рис. 2.4, можно найти местоположение кажущегося источника.

Интенсивность прямого звука $I_{л0}$, создаваемого левым громкоговорителем в произвольной точке на оси симметрии (например, в точке A_0 на рис. 3.12):

$$I_{л0} = \frac{p_1^2}{\rho c} \frac{\mathcal{D}^2(\psi_0)}{l_0^2}, \quad (3.13)$$

где p_1 —действующее значение звукового давления, создаваемого левым излучателем на расстоянии 1 м в

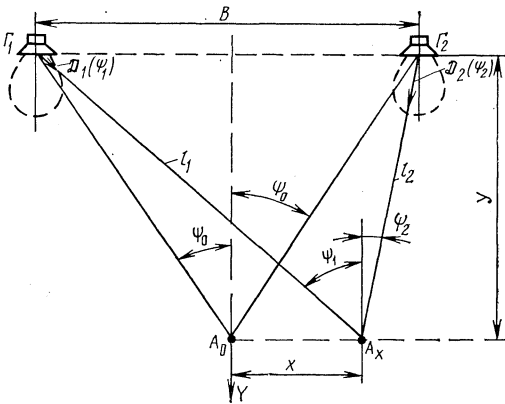


Рис. 3.12. К выводу выражений (2.7) и (3.18)

направлении акустической оси; ρc —удельное акустическое сопротивление среды (воздуха); $\mathcal{D}(\psi_0)$ —значение фактора направленности левого громкоговорителя для направления ψ_0 ; l_0 —расстояние от точки A_0 до громкоговорителей.

Считая громкоговорители системы идентичными по всем параметрам, в том числе по характеристикам направленности, т. е. $\mathcal{D}_1(\psi) = \mathcal{D}_2(\psi) = \mathcal{D}(\psi)$, определим интенсивность прямого звука $I_{п0}$, создаваемую правым громкоговорителем в той же точке A_0 :

$$I_{п0} = \frac{p_2^2}{\rho c} \frac{\mathcal{D}^2(\psi_0)}{l_0^2}, \quad (3.14)$$

где p_2 —действующее значение звукового давления, создаваемого правым громкоговорителем на расстоянии 1 м в направлении акустической оси.

Применяя известное выражение для суммирования мощностей коррелированных процессов [40], перейдем от мощностей к интенсивностям:

$$I_{\Sigma 0} = I_{л0} + I_{п0} + 2R(\Delta\tau) \sqrt{I_{л0} I_{п0}}, \quad (3.15)$$

где $I_{\Sigma 0}$ — суммарная интенсивность прямого звука в точке A_0 (на оси симметрии); $R(\Delta\tau)$ —значение нормированной функции автокорреляции данного воспроизводимого сигнала; $\Delta\tau$ —временной сдвиг между сигналами, формирующими кажущийся источник.

Подставляя (3.13) и (3.14) в (3.15), получим

$$I_{\Sigma 0} = \frac{\mathcal{D}^2(\psi_0)}{l_0^2 \rho c} [p_1^2 + p_2^2 + 2p_1 p_2 R(\Delta\tau)]. \quad (3.16)$$

Для слушателя, расположенного вне оси симметрии, например в точке A_x на расстоянии x от точки A_0 , интенсивности прямых звуков, создаваемых каждым из громкоговорителей, определяются следующим образом:

$$\text{от левого громкоговорителя } I_{лx} = \frac{p_1^2}{\rho c l_1^2} \mathcal{D}^2(\psi_1);$$

$$\text{от правого громкоговорителя } I_{пx} = \frac{p_2^2}{\rho c l_2^2} \mathcal{D}^2(\psi_2).$$

Суммарная интенсивность в точке A_x определится аналогично выражению (3.16):

$$I_{\Sigma x} = \frac{p_1^2}{\rho c} \frac{\mathcal{D}^2(\psi_1)}{l_1^2} + \frac{p_2^2}{\rho c} \frac{\mathcal{D}^2(\psi_2)}{l_2^2} + 2 \frac{p_1 p_2}{\rho c} \frac{\mathcal{D}(\psi_1) \mathcal{D}(\psi_2)}{l_1 l_2} \times \\ \times R(\Delta\tau + \Delta\tau_{xy}), \quad (3.17)$$

где $\Delta\tau_{xy} = \frac{1}{c} (l_1 - l_2)$.

Изменение интенсивности КИЗ при смещении слушателя из точки A_0 в точку A_x

$$\delta L = 10 \lg \frac{I_{\Sigma x}}{I_{\Sigma 0}} = 10 \lg \frac{\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^2 \frac{\mathcal{D}^2(\psi_1)}{l_1^2} + \frac{\mathcal{D}^2(\psi_2)}{l_2^2} + \rightarrow}{\frac{\mathcal{D}^2(\psi_0)}{l_0^2} \left[1 + \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^2 + \rightarrow}$$

$$\rightarrow + 2 \frac{p_1}{p_2} \frac{\mathcal{D}(\psi_1) \mathcal{D}(\psi_2)}{l_1 l_2} R(\Delta\tau + \Delta\tau_{xy}) \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \rightarrow + 2 \frac{p_1}{p_2} R(\Delta\tau) \end{array} \right\} \quad (3.18)$$

Последнее выражение позволяет определить изменение интенсивности прямого звука для случая смешанной стереофонии, т. е. при совместном действии ΔL и $\Delta\tau$ и при любом расположении слушателя. В качестве примера рассмотрим, как изменятся интенсивности отдельных кажущихся источников при переходе слушателя из точки A_0 на оси симметрии в точку напротив правого громкоговорителя ($x=B/2$). В качестве воспроизводимого сигнала выберем шумовой сигнал в полосе от f_1 до f_2 ; в этом случае нормированная функция автокорреляции

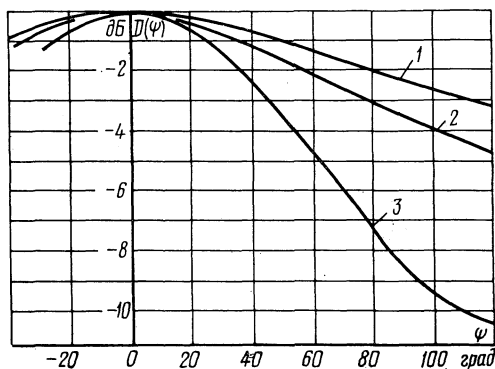
$$R(\tau) = \frac{\sin \pi\tau (f_2 - f_1)}{\pi\tau (f_2 - f_1)} \cos[\pi\tau (f_2 + f_1)].$$

Интенсивностная стереофония. В этом случае $\Delta\tau = 0$, а $R(\Delta\tau) = 1$. Выражение (3.18) примет вид

$$\delta L = 10 \lg \frac{\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^2 \frac{\mathcal{D}^2(\psi_1)}{l_1^2} + \frac{\mathcal{D}^2(\psi_2)}{l_2^2} + 2 \frac{p_1}{p_2} \frac{\mathcal{D}(\psi_1) \mathcal{D}(\psi_2)}{l_1 l_2} R(\Delta\tau_{xy})}{\frac{\mathcal{D}^2(\psi_2)}{l_0^2} \left[\frac{p_1}{p_2} + 1\right]^2} \quad (3.19)$$

Рис. 3.13. Характеристики направленности громкоговорителя 4ГД-28 в оформлении, полученные на полуоктавных полосах шума:

1 — 240–340 Гц; 2 — 480–680 Гц; 3 — 680–960 Гц



Задаваясь различными значениями отношения p_1/p_2 и определив из рис. 3.13 значения факторов направленности, построим зависимость δL в функции начального

положения КИЗ, заданного величиной $\Delta L = 20 \lg p_1/p_2$. Для перемещения КИЗ в пределах базы величина ΔL должна меняться в пределах порядка ± 16 дБ (или $p_1/p_2 = 0,16 \div 6,3$).

Как видно из рис. 3.14 (кривая 1), для шумового сигнала в полосе частот 680—960 Гц крайние источни-

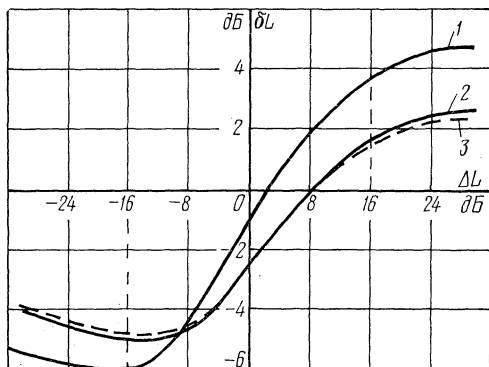


Рис. 3.14. Изменение интенсивности КИЗ при асимметричном положении слушателя ($x = B/2$, $y = 2$ м; $B = 3$ м) для полосы шума 680—960 Гц (1); для звучания трубы (2); для полосы шума 480—680 Гц (3)

ки пространственной панорамы отличаются по интенсивности на 9,6 дБ (для слушателя расположенного напротив правого излучателя). Для «поканальной» за-

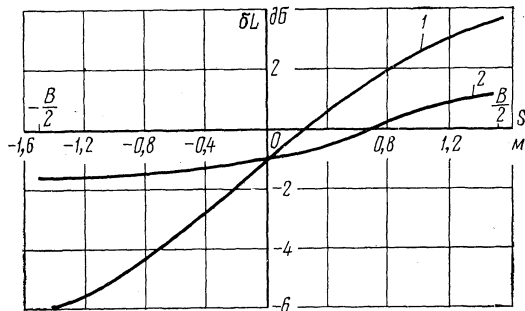


Рис. 3.15. Изменение интенсивности прямого звука при асимметричном положении слушателя ($B = 3$ м; $y = 2$ м; $x = B/2$) в функции начального положения источника звука:

1 — для КИЗ при интенсивностной стереофонии; 2 — для реального источника звука в тех же условиях

писи крайних источников панорамы ($p_1 \approx 0$ или $p_2 \approx 0$) различие по интенсивности для тех же условий может достигать до 12 дБ. Таким образом, при асимметрич-

ном слушании ближайšie (от слушателя) кажущиеся источники звучат громче, а дальние — тише, чем при осевом положении слушателя. Качественно такое же положение наблюдается при восприятии реальных источников звука, однако интенсивность прямого звука в этом случае изменяется при перемещении слушателя в значительной степени меньше, чем при стереофоническом воспроизведении. Для подтверждения этого положения на рис. 3.15 представлены зависимости δL для реальных и кажущихся источников для одинаковых условий в функции начального положения источника на линии базы. Для реальных источников звука (считая их точечными) выражение для расчета δL должно учитывать только изменение звукового давления с расстоянием:

$$\delta L = 20 \lg \frac{l_0}{l_x},$$

где l_x — расстояние от действующего источника до точки A_x ; l_0 — то же, но для точки A_0 .

Кривая 1 на рис. 3.15 получена из рис. 3.14 заменой значений ΔL эквивалентным значением $\frac{S}{B/2}$ в соответствии с рис. 2.2.

Временная стереофония. В этом случае для всех источников $p_1/p_2=1$ и выражение (3.18) принимает следующий вид:

$$\delta L = 10 \lg \frac{\frac{\mathcal{D}^2(\psi_1)}{l_1^2} + \frac{\mathcal{D}^2(\psi_2)}{l_2^2} + 2 \frac{\mathcal{D}(\psi_1)\mathcal{D}(\psi_2)}{l_1 l_2} R(\Delta\tau + \Delta\tau_{xy})}{2 \frac{\mathcal{D}^2(\psi_0)}{l_0^2} [1 + R(\Delta\tau)]}. \quad (3.20)$$

Задавая различные значения $\Delta\tau$ в пределах $\pm 1,2$ мс (что необходимо для перемещения КИЗ в пределах всей базы), найдем значения $R(\Delta\tau)$ и $R(\Delta\tau + \Delta\tau_{xy})$. Подставляя найденные значения в (3.20), получим зависимость, представленную на рис. 3.16. В отличие от предыдущего случая (интенсивностная стереофония), в данном случае крайние источники пространственной панорамы практически не отличаются по интенсивности, однако интенсивность каждого из них примерно на 11 дБ выше интенсивности центрального источника.

Предложенный метод расчета применим не только для таких искусственных сигналов, как гармонический сигнал или полосы шума, но и для реальных вещательных сигналов, если известны их функции автокорреляции. Так, для примера на рис. 3.14 и рис. 3.16 (кривые 2)

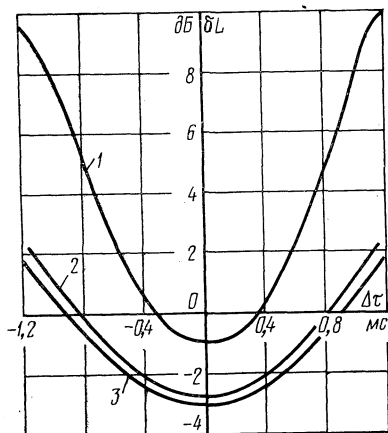


Рис. 3.16. Влияние $\Delta\tau$ в стереосигнале на изменение интенсивности КИЗ при асимметричном положении слушателя ($B=3$ м; $y=2$ м; $x=B/2$):

1 — для полосы шума 680—960 Гц; 2 — для звучания трубы; 3 — для полосы шума 480—680 Гц

2) представлены расчетные данные для сольного звучания трубы в эстрадной программе. Автокорреляционная функция этого звучания представлена на рис. 3.17.

Результаты расчетов показали, что положения кажущихся источников оказывают значительное влияние на величину δL (косвенно, через ΔL и $\Delta\tau$). Величина δL возрастает при увеличении бокового смещения слушателя; уменьшении расстояния до громкоговорителей; увеличении направленности громкоговорителей.

Расчеты, проведенные для различных шумовых полос, показывают, что спектральный состав сигнала в значительной степени влияет на изменение интенсивности звука при перемещении слушателя — чем выше средняя частота спектра, тем сильнее меняется громкость кажущегося источника при тех же условиях. Для иллюстрации на рис. 3.14 и 3.16 приведены зависимости δL для полос шума 680—960 Гц (кривые 1) и 480—680 Гц (кривые 3). Частотная зависимость δL объясняется, главным образом, частотной зависимостью характеристик направленности громкоговорителей, а также изменением $R(\tau)$.

Полученные результаты могут быть представлены в более наглядной форме, если учитывать не только изменения интенсивности, но и местоположения КИЗ (пространственные искажения). Так, на рис. 3.18 показано, как изменяется пространственная панорама для асимметрично расположенного слушателя для интен-

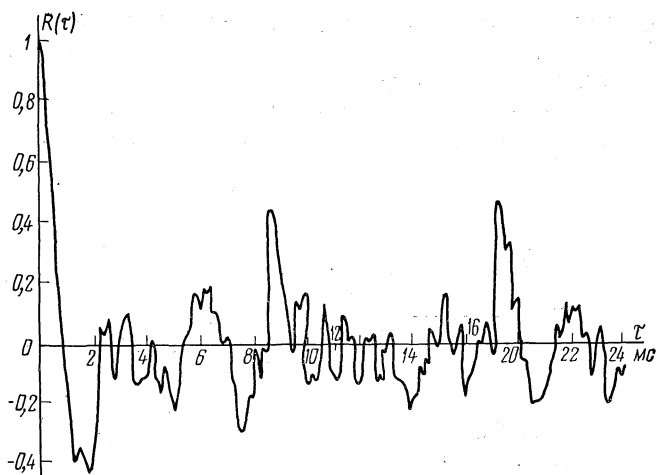


Рис. 3.17. Нормированная функция автокорреляции для звучания трубы в эстрадной программе

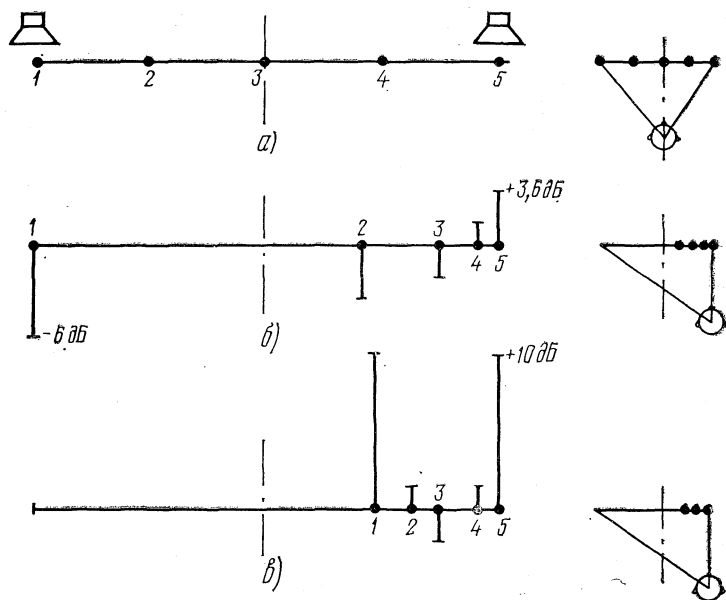


Рис. 3.18. Неискаженная стереопанорама (а), состоящая из равногромких источников 1—5 ($B = 3$ м; $y = 2$ м; $x = B/2$, шумовой сигнал в полосе 680—960 Гц); пространственные искажения и нарушения музыкального баланса при интенсивной (б) и временной (в) стереофонии

сивностной (рис. 3.18б) и временной (рис. 3.18в) стереофонии. Из рис. 3.18 следует, что восприятие в условиях асимметричного положения с точки зрения музыкального баланса хуже монофонического, при котором музыкальный баланс не связан с положением слушателя.

Г л а в а 4

Разделимость сигналов при стереовоспроизведении

4.1. Пространственное восприятие и разделимость сигналов

Одной из важнейших особенностей слухового восприятия стереофонических программ (по сравнению с монофоническими) является то ощущение (качество), которое принято называть прозрачностью звучания. Слушатели при стереовоспроизведении всегда оказываются в состоянии выделить из общего состава звучания ансамбля партию того или иного интересующего его инструмента (голоса) и уверенно отличить друг от друга одинаковые партии, исполняемые разными инструментами. Эта особенность слухового восприятия определяется способностью органа слуха человека разделять воспринимаемые сигналы. При этом используется присущая стереофонии упорядоченность как по форме, так и по направлению восприятия для сигналов, формирующих отдельные источники панорамы. В отличие от этого, при одноканальной передаче можно говорить лишь об упорядоченности таких сигналов только по форме.

Форма вещательного сигнала — это есть совокупность всех тех его признаков, которые позволяют слушателю предугадать с той или иной степенью достоверности (иногда правильно, иногда с ошибкой) неизвестный ему последующий ход временной функции, имея в кратковременной памяти ранее принятые элементы этого сигнала. При восприятии сложного вещательного сигнала слушатель старается подметить и разделить те совокупности элементов в звучании, которые связываются в непрерывно экстраполируемые пос-

ледовательности. Последние, в конечном итоге, и соответствуют звучаниям отдельных инструментов ансамбля. Разделение сигналов по форме является основным и единственным признаком для выделения партий отдельных инструментов и голосов из сложной звуковой картины при монофоническом воспроизведении. Именно этим и объясняется недостаточная прозрачность звучания, свойственная одноканальной (монофонической) передаче.

При двухканальном воспроизведении слушатель воспринимает пространственную звуковую панораму, появляется дополнительная возможность использования присущей органу слуха избирательной способности по направлению. Желая выделить из сложной звуковой картины партию какого-либо инструмента, слушатель концентрирует свое внимание в направлении его расположения в пространстве, что приводит к уменьшению маскирующего действия звуков, воспринимаемых с других направлений. За счет этого повышается отношение сигнал/помеха для выделяемого источника звука, т. е. создаются более благоприятные условия для разделения сигналов. Это утверждение может быть убедительно доказано путем проведения следующего эксперимента.

Искусственным путем синтезируем пространственную звуковую панораму, состоящую из трех КИЗ. Это можно сделать с помощью установки рис. 3.1. Величину базы выберем равной 1,8 м. Пусть слушатель находится на оси симметрии громкоговорителей $Гр_1$ и $Гр_2$. С помощью аттенюаторов $ДБ_1—ДБ_6$ один из звуковых образов расположим в центре базы громкоговорителей и не будем менять его местоположения в процессе проведения эксперимента. Два других расположим соответственно слева и справа от центра базы громкоговорителей на равном расстоянии от последнего. В процессе проведения эксперимента будем менять величину этого расстояния от нуля (все три КИЗ воспринимаются слушателем из одной точки — центра базы громкоговорителей) до максимальной величины (левый и правый звуковые образы расположены соответственно в позициях левого и правого громкоговорителей). Очевидно, что для получения такой панорамы необходимо, чтобы разности интенсивностей ΔL или величины временных сдвигов Δt пары сигналов, формирующих центральный КИЗ, оставались

бы равными нулю, в то время как для двух других пар сигналов, соответствующих левому и правому звуковым образам, значения вводимых ΔL или Δt должны быть равны по величине, но противоположны по знаку. Требуемое перемещение боковых звуковых образов будет достигнуто, если изменять величины ΔL или Δt в пределах от 0 до 12—16 дБ или от 0 до 1,6 мс. Уровни громкости всех трех звуковых образов выберем так, чтобы они казались одинаковыми при их очередном предъявлении слушателю. Необходимая установка уровней громкости для каждого из трех звуковых образов производится регуляторами уровней источников программ.

Влияние пространственного разнесения звуковых образов на изменение условий разделимости соответствующих им сигналов можно оценить по изменению величины артикуляции или относительного порога слышимости выделяемого источника звука. Воспользуемся методом артикуляции. Для этого в качестве исходных монофонических сигналов выберем записи трех различных по содержанию речевых отрывков, произнесенных одним и тем же человеком в одинаковом ритме и, по возможности, с одной и той же интонацией. Это условие позволяет практически устранить влияние тембра и характера исполнения на результаты эксперимента. Предложим эксперту оценить разборчивость одного из источников звука пространственной панорамы при мешающем действии двух других. При этом используем для оценки разборчивости выделяемого источника специальный речевой тест. Он содержит 130 слов, записанных при чтении артикуляционных таблиц. Два других (маскирующих) речевых источника — повторяющиеся отрывки дикторского текста длительностью звучания 7—10 с. Заметим, что в начале эксперимента слушатели затрудняются распознавать слова (или слоги), т. е. их внимание непроизвольно переключается на разные звуковые образы. Однако через несколько секунд слушателю удавалось сосредоточить внимание на выделяемом источнике звука и распознаваемость речи увеличивалась. Поэтому оценивалась разборчивость последних 100 слов. Подобная методика, в несколько измененном виде, впервые предложена в [129].

Результаты этих исследований представлены графически отдельно для интенсивностной (рис. 4.1) и

временной (рис. 4.2) стереофонии. Здесь по оси ординат отложена слоговая разборчивость S_p , %, для боковых (кривая 1) и центрального (кривая 2) кажущихся речевых источников звука, а по оси абсцисс — величина

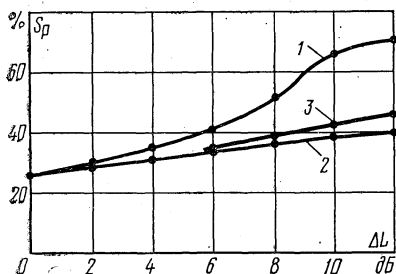


Рис. 4.1. Изменение артикуляции речевых источников пространственной панорамы при интенсивностной стереофонии: $B=1,8$ м; $2\varphi=60^\circ$; $\Delta\tau=0$

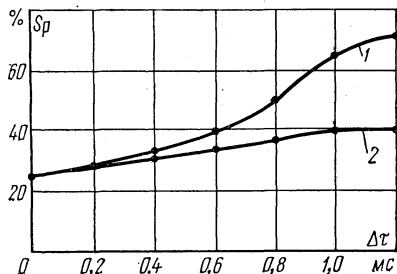


Рис. 4.2. Изменение артикуляции речевых источников пространственной панорамы при временной стереофонии: $B=1,8$ м; $2\varphi=60^\circ$; $\Delta L=0$

ны интенсивностных ΔL или временных $\Delta\tau$ разностей, вводимых в сигналы, формирующие боковые звуковые образы пространственной панорамы. Эти экспериментальные исследования показали, что при $\Delta L=0$ (или $\Delta\tau=0$) слушатели воспринимают все три КИЗ из одного направления (центра базы), что позволяет характеризовать подобное восприятие как монофоническое. При этом разборчивости каждого из источников минимальны и одинаковы по величине. При $\Delta L=2\div 4$ дБ (или $\Delta\tau=0,2\div 0,4$ мс) слушатель воспринимает размытый (объемный) звуковой образ без возможности четкого пространственного разделения отдельных источников звука. Появляющееся у всех слушателей ощущение «звучащего объема» позволяет характеризовать подобное восприятие как объемное. Незначительное повышение разборчивости речевых источников свидетельствует о том, что в этом случае условия для разделения сигналов несколько улучшаются. Дальнейшее увеличение ΔL (или $\Delta\tau$) значительно улучшает возможность пространственного разделения левого и правого кажущихся звуковых образов. Словесная разборчивость последних уже при $\Delta L=10\div 12$ дБ (или $\Delta\tau=1\div 1,2$ мс) составляет практически 100%. При этом всеми слушателями отмечается прекрасное простран-

венное разделение боковых звуковых образов: на каждом из них они могут легко сосредоточить внимание и воспринять артикуляционный тест. Несколько иная картина наблюдается при попытке слушателя выделить центральный источник звука, а именно: увеличение ΔL (или $\Delta \tau$) не вызывает существенного возрастания его разборчивости (см. рис. 4.1 и 4.2, кривая 2). Это явление субъективно воспринимается слушателями как «провал центра».

Покажем, что не различия ΔL (или $\Delta \tau$), вводимые для каждой из трех пар сигналов, а именно наличие пространственного разнесения формируемых этими сигналами звуковых образов как раз и является причиной улучшения условий их разделимости. Для этого с помощью уже описанной выше установки поочередно предложим слушателю два различных варианта звуковой панорамы, состоящей, как и раньше, из трех КИЗ. В первом случае для всех трех пар сигналов величины ΔL и $\Delta \tau$ выберем равными нулю. Очевидно, что при этом все три звуковых образа локализируются слушателем, находящимся на оси симметрии системы воспроизведения, в одной точке посередине базы. Во втором случае величины одновременно вводимых для каждой пары сигналов ΔL и $\Delta \tau$ подберем таким образом, чтобы кажущийся источник звука по-прежнему локализовался слушателем в одной точке посередине базы. Эксперту предложим определить разборчивость одного источника, воспринимаемого на фоне двух других, по методике, изложенной выше. Расхождения полученных результатов при этом не превышают 10—15%.

Данные этих исследований убедительно показывают, что: локализация КИЗ в одной точке на линии базы системы воспроизведения (этот случай эквивалентен монофонической передаче) приводит к наименьшей прозрачности звучания при прослушивании; пространственное разнесение звуковых образов улучшает условия разделимости воспринимаемых слушателем сигналов, это изменение оказывается тем значительнее, чем больше угловое расстояние между отдельными звуковыми образами пространственной панорамы.

В качестве наглядной иллюстрации приведем следующий пример. Представим себе несколько различных прозрачных рисунков животных, наложенных друг на друга. В этом случае разделение и последующее опознавание животных становится возможным только

благодаря различию их форм. Термин «форма» имеет здесь все тот же смысл, что и ранее. Следуя взглядом за линией одного из рисунков, тем увереннее выбираем на каждом пересечении путь дальнейшего следования, чем более отчетливо чувствуется форма животного, т. е. связь уже пройденного пути с дальнейшим его продолжением. Очевидно, что разделение рисунков тем труднее, чем ближе формы животных. Если же эти рисунки дополнительно еще разнести и в пространстве (пусть на небольшой угол), то решение этой задачи окажется значительно проще и чаще всего не представляет никаких затруднений.

Что же является определяющим в восприятии стереофонического эффекта, в том числе и такой его важнейшей компоненты — более высокой прозрачности звучания: разделение сигналов по форме или разделение сигналов по направлению (иначе говоря пространственное разделение кажущихся звуковых образов стереопанорамы)? Несомненно последнее. Об этом свидетельствуют результаты сравнительного прослушивания монофонического, стереофонического и квазистереофонического звучаний, приведенные в § 1.4. Хорошим подтверждением этому являются также данные сравнительного прослушивания звучаний обычной стереосистемы и системы с расширенной зоной стереовосприятия (см. § 6.9).

Все это доказывает, что именно возможность пространственного разделения элементов звуковой панорамы является определяющей причиной повышенной разделимости сигналов, свойственной двухканальному воспроизведению. Разделение же сигналов по форме, приходящее и обычному монофоническому воспроизведению, не является здесь решающим фактором, поскольку предпочтительность стереовоспроизведения резко падает там, где отсутствует возможность пространственного разделения отдельных элементов воспринимаемого ансамбля.

4.2. Математические модели демаскировки сигналов органом слуха человека

Общие сведения. Способность «настроиться» на один из многих одновременно действующих источников звука составляет одну из удивительнейших особенностей человеческого слуха. Механизм отстройки здесь принципиально иной, чем тот, который существует, например, в радиоприемнике, где происходит выделение сигналов из всей

их совокупности за счет того, что они различным образом расположены на оси частот. В отличие от этого, низкочастотные вещательные сигналы имеют перекрывающиеся спектры. Поэтому классическая теория фильтров с ее областями пропускания и затухания здесь оказывается непригодной. Ухо является в этом смысле более тонким инструментом.

Демаскировка — это снижение маскировки при выделении отдельных сигналов (источников звука) из одновременно действующей на слушателя их совокупности путем соответствующей дополнительной обработки входной информации как в периферийном, так и центральном отделах слуховой системы. Этот феномен деятельности слуховой системы был обнаружен лишь в 1948 г. [5]. Механизм слуха, связанный с демаскировкой и выделением полезных сигналов из помех, в настоящее время изучен крайне недостаточно. Тем не менее накопленные сведения в области физиологии уха, известные особенности построения его периферийных и центрального отделов, новейшие знания субъективного поведения экспертов при определении порогов слышимости для различных экспериментальных условий и, наконец, известные из классической теории сигналов методы их выделения из помех позволяют создать первые математические модели для количественной оценки этой особенности слуха. Модели бинауральной демаскировки устанавливают связь между входными характеристиками сигналов и их разделительностью, оценивая последнюю изменением отношения сигнал/помеха для каждого из выделяемых сигналов. Математическое моделирование (кроме удобства расчетов) является обычно первым шагом на пути построения соответствующих измерительных приборов.

Ниже рассмотрены три наиболее известные в настоящее время модели бинауральной демаскировки сигналов.

Модель накопления. Поясним сущность модели накопления, предложенной К. Д. Шенкелем в 1967 г. Для упрощения рассуждений допустим, что имеется два сигнала: $y_1(t)$ и $y_2(t)$, каждый из которых представляет собой сумму полезного $f_S(t)$ и только одного мешающего (маскирующего) $f_n(t)$ сигналов; и пусть в одном из них фаза полезного сигнала сдвинута на 180° , тогда можно записать

$$y_1(t) = f_S(t) + f_n(t); \quad y_2(t) = -f_S(t) + f_n(t). \quad (4.1)$$

Оказывается, что усилить различие полезного и мешающего сигналов по интенсивности (или иначе говоря произвести накопление полезного сигнала) можно, если сначала найти суммы и разности мгновенных значений исходных сигналов (4.1), т. е.

$$\begin{aligned} y_1(t) + y_2(t) &= 2f_n(t); & y_1(t) - y_2(t) &= 2f_S(t); & y_2(t) - \\ - y_1(t) &= -2f_S(t), \end{aligned} \quad (4.2)$$

а затем полученные таким образом суммы и разности добавить к каждому из исходных сигналов:

$$y_1(t) + [y_1(t) + y_2(t)] = f_S(t) + 3f_n(t); \quad (4.3)$$

$$y_1(t) + [y_1(t) - y_2(t)] = 3f_S(t) + f_n(t); \quad (4.4)$$

$$y_1(t) + [y_2(t) - y_1(t)] = -f_S(t) + f_n(t); \quad (4.5)$$

$$y_2(t) + [y_1(t) + y_2(t)] = -f_S(t) + 3f_n(t); \quad (4.6)$$

$$y_2(t) + [y_1(t) - y_2(t)] = f_S(t) + f_n(t); \quad (4.7)$$

$$y_2(t) + [y_2(t) - y_1(t)] = -3f_S(t) + f_n(t). \quad (4.8)$$

Рассматривая выражения (4.3) — (4.8), нетрудно видеть, что они содержат три разных эффекта: а) полезный сигнал увеличился по амплитуде по сравнению с маскирующим в 3 раза [см. (4.4) и (4.8)]; б) соотношение амплитуд полезного и маскирующего сигналов не изменилось [см. (4.5) и (4.7)] и в) амплитуда маскирующего сигнала увеличилась по сравнению с амплитудой полезного сигнала в 3 раза [см. (4.3) и (4.6)]. Конечно, представляет интерес только первый из этих эффектов (а), где происходит накопление полезного сигнала. Последнее означает, что для него увеличивается отношение сигнал/помеха, что эквивалентно уменьшению порога маскировки или увеличению процента правильно понятой артикуляции. Напомним, что порогу маскировки соответствует минимальное значение уровня звукового давления, создаваемого выделяемым источником звука (или уровень соответствующего этому звуковому образу электрического сигнала), при котором последний еще прослушивается на фоне мешающих (маскирующих) звуков (сигналов). Очевидно, что эти уровни соответствуют относительным порогам слышимости для выделяемых источников звука (сигналов).

Рассматриваемая модель как раз и использует этот положительный эффект — накопление полезного сигнала, — достигаемый при выполнении изложенных выше суммарно-разностных преобразований над мгновенными значениями входных сигналов в соответствии с выражениями (4.3) — (4.8).

Полная структурная схема модели накопления представлена на рис. 4.3. Кроме суммирующих (+) и вычитающих (—) устройств, она содержит также набор полосовых фильтров ($ПФ_v$), квадратирующие устройства 15—20, интеграторы 21—26 и устройства 27—

32, вычисляющие отношение мощности полезного сигнала (P'_{sv}) к полной мощности маскирующих сигналов (P'_{nv}). Здесь же для большей наглядности частич-

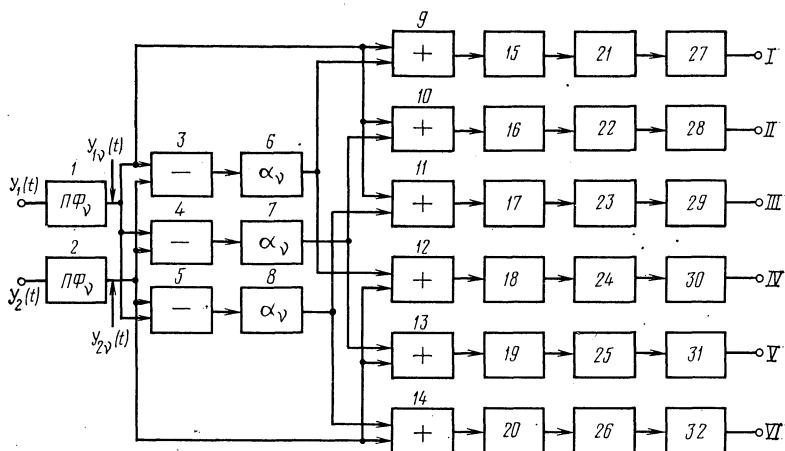


Рис. 4.3. Структурная схема модели накопления

но показаны операции, выполняемые над сигналами при прохождении последними каждого элемента (блока) модели.

Поясним особенности структурной схемы модели и получим расчетные формулы, позволяющие теоретическим путем количественно оценить влияние временных и интенсивностных разностей, а также корреляционных связей воздействующих сигналов на изменение условий их разделимости.

Пусть на каждый из входов модели (см. рис. 4.3) воздействует сумма только двух сигналов: полезного и мешающего, так что

$$y_1(t) = a_{1s} f_s(t - \tau_{1s}) + a_{1n} f_n(t - \tau_{1n}); \quad y_2(t) = a_{2s} f_s(t - \tau_{2s}) + a_{2n} f_n(t - \tau_{2n}), \quad (4.9)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют левому и правому входам модели (органа слуха); индекс S — полезному сигналу; индекс n — мешающему (маскирующему) сигналу; a_{1s} , a_{2s} и a_{1n} , a_{2n} — амплитуды полезного и мешающего сигналов для левого и правого уха слушате-

ля; τ_{1S} , τ_{2S} и τ_{1n} , τ_{2n} — времена запаздывания этих сигналов; $f_S(t)$ и $f_n(t)$ — функции времени, отображающие колебания полезного и мешающего сигналов. Будем считать, что

$$-1 \leq f_S(t), f_n(t) \leq 1. \quad (4.10)$$

При построении структурной схемы модели накопления учтена одна из замечательных особенностей [60], присущая слуховому анализатору человека, — разделять (уже в периферическом отделе) всю совокупность входных сигналов по частоте на области, называемые частотными группами или критическими полосами. Эта операция осуществляется с помощью полосовых фильтров ($ПФ_v$), имеющих полосы прозрачности, соответствующие критическим полосам слуха.

Сигналы, получаемые на выходе этих фильтров, можно записать в виде

$$\begin{aligned} y_{1v}(t) &= a_{1S} f_{Sv}(t - \tau_{1S}) + a_{1n} f_{nv}(t - \tau_{1n}); \quad y_{2v}(t) = \\ &= a_{2S} f_{Sv}(t - \tau_{2S}) + a_{2n} f_{nv}(t - \tau_{2n}). \end{aligned} \quad (4.11)$$

Здесь индекс v определяет номер частотной группы (или критической полосы) слуха.

Последующая переработка всей информации в модели накопления так же, как и в слуховом анализаторе, осуществляется отдельно внутри каждой критической полосы. При этом сигналы $y_{1v}(t)$ и $y_{2v}(t)$ сначала подвергаются суммарно-разностным преобразованиям, смысл которых поясняют ф-лы (4.3) — (4.8). Заметим, что для различных частных случаев входных сигналов $y_{1v}(t)$ и $y_{2v}(t)$ накопление полезного сигнала может происходить на том или ином выходе сумматоров 9—14. Поэтому дальнейшей обработке (она идентична) подвергаются каждый из шести полученных таким образом выходных сигналов (см. рис. 4.3, элементы 9—14). Здесь учитываются следующие сведения, объясняющие формирование порогов слышимости:

а) абсолютный порог слышимости при восприятии шума образуется слухом путем оценки не амплитуды, а мощности сигнала, сосредоточенной отдельно внутри каждой частотной группы; если в какой-либо частотной группе мощность сигнала превысит пороговое значение, то шум будет услышан;

б) при определении относительного порога слышимости чистого тона, маскируемого шумом, можно пре-

небрежь всеми компонентами последнего, лежащими за пределами образованной слухом критической полосы. Тон также может быть услышан лишь тогда, когда его интенсивность достигнет определенного порогового значения по отношению к интенсивности маскирующего шума, приходящейся на эту частотную группу.

Отсюда следует, что для каждого из упомянутых выше входных сигналов должна быть вычислена мощность, что требует возведения полученных при выполнении суммарно-разностных преобразований функций в квадрат (см. рис. 4.3, элементы 15—20) и последующего их усреднения во времени (элементы 21—26). При этом интервал усреднения (T) должен составлять 200 мс. После усреднения могут быть отброшены все члены, где под знаком интеграла стоит произведение некоррелированных функций, которыми являются полезный $f_{sv}(t)$ и мешающий $f_{nv}(t)$ сигналы, так как общеизвестно, что

$$\overline{f_{sv}(t) f_{nv}(t)} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f_{sv}(t) f_{nv}(t) dt \quad (4.12)$$

равно 0 при $T \rightarrow \infty$, а для $T = 200$ мс величина этого интеграла становится очень малой по сравнению с выражениями

$$\overline{f_{sv}^2(t)} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f_{sv}(t) f_{sv}(t) dt; \quad \overline{f_{nv}^2(t)} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f_{nv}(t) f_{nv}(t) dt. \quad (4.13)$$

Дискриминаторы (см. рис. 4.3, элементы 27—32) выделяют для каждого из шести каналов отношение накопленной мощности полезного сигнала P'_{sv} к мощности маскирующего P'_{nv} .

Теперь после краткого пояснения и обоснования сути выполняемых в модели математических преобразований исходной совокупности сигналов приведем, опуская все промежуточные выкладки, окончательные формулы, позволяющие рассчитать отношения мощностей полезного и маскирующего сигналов для каждого из шести выходов при условии, что на вход модели воздействуют сигналы, определяемые выражением (4.9); тогда окончательно получим:

$$\left(\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} \right)_I = \frac{[4a_{1S}^2 + a_{2S}^2 + 4a_{1S} a_{2S} R_v(\Delta\tau_S)] P_{Sv}}{[4a_{1n}^2 + a_{2n}^2 + 4a_{1n} a_{2n} R_v(\Delta\tau_n)] P_{nv}}; \quad (4.14)$$

$$\left(\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} \right)_{II} = \frac{[4a_{1S}^2 + a_{2S}^2 - 4a_{1S} a_{2S} R_v(\Delta\tau_S)] P_{Sv}}{[4a_{1n}^2 + a_{2n}^2 - 4a_{1n} a_{2n} R_v(\Delta\tau_n)] P_{nv}}; \quad (4.15)$$

$$\left(\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} \right)_{III} = \frac{a_{2S}^2 P_{Sv}}{a_{2n}^2 P_{nv}}; \quad (4.16)$$

$$\left(\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} \right)_{IV} = \frac{[a_{1S}^2 + 4a_{2S}^2 + 4a_{1S} a_{2S} R_v(\Delta\tau_S)] P_{Sv}}{[a_{1n}^2 + 4a_{2n}^2 + 4a_{1n} a_{2n} R_v(\Delta\tau_n)] P_{nv}}; \quad (4.17)$$

$$\left(\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} \right)_V = \frac{a_{1S}^2 P_{Sv}}{a_{1n}^2 P_{nv}}; \quad (4.18)$$

$$\left(\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} \right)_{VI} = \frac{[4a_{2S}^2 + a_{1S}^2 - 4a_{1S} a_{2S} R_v(\Delta\tau_S)] P_{Sv}}{[4a_{2n}^2 + a_{1n}^2 - 4a_{1n} a_{2n} R_v(\Delta\tau_n)] P_{nv}}. \quad (4.19)$$

Здесь номера I, II, III, IV, V, VI определяют номер выхода модели (см. рис. 4.3); $\Delta\tau_S$ и $\Delta\tau_n$ — бинауральные временные разности соответственно для пар полезного и мешающего сигналов; $R_v(\Delta\tau_S)$ и $R_v(\Delta\tau_n)$ — значения нормированной функции корреляции соответственно для полезного и маскирующего сигналов; P_{Sv} , и P_{nv} — средние за время T значения мощностей для нормализованных функций (4.10) полезного $f_{Sv}(t)$ и маскирующего $f_n(t)$ сигналов в критической полосе v . Очевидно, что

$$\Delta\tau_S = \tau_{1S} - \tau_{2S}; \quad \Delta\tau_n = \tau_{1n} - \tau_{2n}; \quad (4.20)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{Sv} &= \overline{f_{Sv}^2(t)} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f_{Sv}(t) f_{Sv}(t) dt; \\ P_{nv} &= \overline{f_{nv}^2(t)} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f_{nv}(t) f_{nv}(t) dt, \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

и, наконец, если в качестве полезного и маскирующего сигналов используется равноамплитудный шум, нижняя и верхняя частотные границы которого для критической полосы v составляют соответственно f_1 и f_2 , то можно написать, что

$$\left. \begin{aligned} R_v(\Delta\tau_S) &= \frac{\sin(2\pi f_2 \Delta\tau_S) - \sin(2\pi f_1 \Delta\tau_S)}{2\pi \Delta f_v \Delta\tau_S} \\ R_v(\Delta\tau_n) &= \frac{\sin(2\pi f_2 \Delta\tau_n) - \sin(2\pi f_1 \Delta\tau_n)}{2\pi \Delta f_v \Delta\tau_n} \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

где Δf_v — ширина критической полосы v .

Как только величина отношения P'_{sv} / P'_{nv} на каком-либо из шести выходов модели в пределах критической полосы превысит пороговое значение, то относительный порог слышимости (или применительно к данному случаю, порог маскировки) достигнут и полезный сигнал будет услышан при его восприятии на фоне мешающих звуков.

И, наконец, при формировании окончательного суждения необходимо установить взаимное влияние частотных групп друг на друга. Поэтому в модели накопления результату, полученному для каждой отдельной частотной группы, приписывается определенный весовой множитель α_v ¹ (см. рис. 4.3, элементы 6, 7, 8), изменяющийся по величине при переходе от одной критической полосы к другой. В качестве примера на рис. 4.4 показано изменение значений коэффициента α_v от номера частотной группы v . Последние согласуют теоретически и экспериментально полученные пороги маскировки для случая, когда полезный сигнал воздействует на левое и правое ухо слушателя в противофазе, а мешающий — в фазе (условие $\pi/0$).

Корреляционная ЕС-модель. Прежде всего изложим те общие соображения, которые положены в основу построения этой модели бинауральной демаскировки сигналов.

Согласно корреляционной модели пространственного слуха [40, 72] в основе направленного слушания лежат слияние звуков, воспринимаемых по левому и правому каналам слухового анализатора. При бинауральном воздействии пары коррелированных сигналов, отличающихся по уровню или по времени поступления на левый и правый входы органа слуха, происходит воз-

¹ В полученных ранее выражениях (4.14)—(4.19) величина коэффициента α_v принята равной 1.

буждение трех, так называемых «концептуальных поверхностей», участвующих в процессе слияния. Причем две из них (левая и правая) представляют собой плоскости (или поля) текущей автокорреляции воспринимаемых слушателем сигналов. На центральной кон-

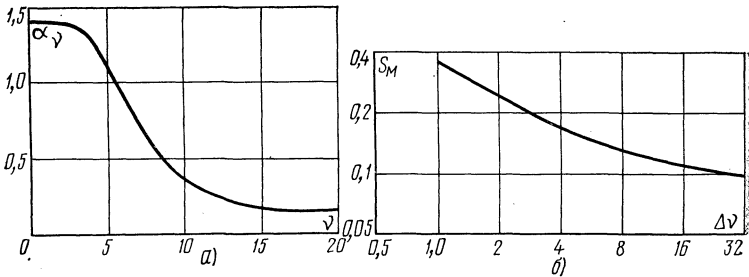


Рис. 4.4. Примеры весовых функций, учитывающих: а — взаимное влияние частотных групп друг на друга; б — изменение пороговой величины (S_m) от числа частотных групп с одинаковым отношением сигнала к шуму

цептуальной поверхности реализуется текущая взаимная корреляция входных сигналов. Введение текущей оценки необходимо потому, что реальные сигналы представляют собой нестационарные случайные функции. Возбуждения трех концептуальных поверхностей при бинауральном восприятии коррелированных сигналов сливаются в единый очаг возбуждения, пространственное положение которого в слуховом центре головного мозга слушателя связано с направлением на КИЗ. Заметим, что анализ звука (в том числе и разделение сигналов) и восприятие направления чрезвычайно тесно связаны между собой. Это неоднократно отмечалось многими исследователями [40]. Поэтому модель бинауральной демаскировки должна содержать устройства, вычисляющие функции автокорреляции входных сигналов, и коррелятор, оценивающий взаимную корреляцию этих сигналов.

Очевидно, что если входные сигналы описываются выражением (4.11), то их функция автокорреляции может быть записана как

$$r_{aj} = \overbrace{y_{jv}(t) y_{jv}(t - \tau)} + \overbrace{a_{js}^2 f_{sv}(t - \tau_{js}) f_{sv}(t - \tau_{js} - \tau)} + \overbrace{a_{jn}^2 f_{nv}(t - \tau_{jn}) f_{nv}(t - \tau_{jn} - \tau)}, \quad (4.23)$$

где j равно 1 или 2, а функция взаимной корреляции может быть представлена в виде

$$r_{\text{вз}} = \overbrace{r_{1\nu}(t) y_{\nu}(t - \tau)} = \overbrace{a_{1S} f_{S\nu}(t_1) f_{S\nu}[t_1 - (\Delta\tau_S + \tau)]} + \\ + \overbrace{a_{1n} f_{n\nu}(t_2) f_{n\nu}[t_2 - (\Delta\tau_n + \tau)]} = r_{S\nu}(\Delta\tau_S + \tau) + r_{n\nu}(\Delta\tau_n + \tau). \quad (4.24)$$

Здесь τ — текущий временной сдвиг сигналов; $r_{S\nu}(\Delta\tau_S + \tau)$ и $r_{n\nu}(\Delta\tau_n + \tau)$ — взаимные корреляционные функции для пары полезных и мешающих сигналов, воздействующих на левый и правый входы слухового анализатора; ν — номер частотной группы, т. е. предполагается, что функции r_{aj} и $r_{\text{вз}}$ вычисляются внутри каждой критической полосы слуха. Заметим, что в выражениях (4.23) и (4.24) введены следующие обозначения:

$$\tau_{2S} - \tau_{1S} = \Delta\tau_S; \quad t_1 = t - \tau_{1S}; \quad \tau_{2n} - \tau_{1n} = \Delta\tau_n; \quad t_2 = t - \tau_{1n}. \quad (4.25)$$

Естественно также предположить [40, 72], что слуховой анализатор при выделении источника звука на фоне мешающих сигналов реагирует («настраивается») на оптимальную задержку ($\Delta\tau_{\text{опт}}$), при которой наступает максимум функции взаимной корреляции для полезных сигналов. Эта операция является типичной для двухканального корреляционного приемника и имеет своей целью повышение отношения сигнал/помеха, а следовательно, и разделимости сигналов. Нетрудно видеть из (4.24), что величина оптимальной задержки для полезного сигнала

$$\Delta\tau_{\text{опт}} = -\Delta\tau_S. \quad (4.26)$$

Пусть в реальных условиях эта операция выполнена не точно, с погрешностью δ , которая все время флюктуирует, тогда

$$\Delta\tau_{\text{опт}} = -\Delta\tau_S + \delta \quad (4.27)$$

и, кроме того, аналогичный временной сдвиг (4.27) получает также и маскирующий сигнал. Иными словами, «настраиваясь» на полезный сигнал, орган слуха преобразует выражение (4.24) к виду

$$r'_{\text{вз}} = \overbrace{a_{1S} a_{2S} f_{S\nu}(t_1) f_{S\nu}(t_1 - \delta)} + \overbrace{a_{1n} a_{2n} f_{n\nu}(t_2) f_{n\nu}[t_2 -} \\ - \overbrace{(\Delta\tau_n - \Delta\tau_S + \delta)]} = r_{S\nu}(\delta) - r_{n\nu}(\Delta\tau_n - \Delta\tau_S + \delta). \quad (4.28)$$

На рис. 4.5 приведена структурная схема первой (корреляционной) части рассматриваемой модели, выполняющей изложенные выше математические операции. На рисунке обозначено: $\Pi\Phi_{\nu}$ — набор фильтров, имеющих полосы прозрачности, соответствующие критическим полосам слуха; 1, 2, 3—устройства, реализующие автокорреляционные и взаимокорреляционные

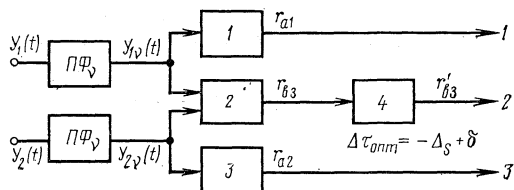


Рис. 4.5. Структурная схема первой части корреляционной ЕС-модели

функции входных сигналов; 4—элемент, вводящий оптимальный временной сдвиг, необходимый для получения максимума функции взаимной корреляции полезных сигналов. На этом же рисунке показаны условно основные операции, выполняемые над исходными сигналами в процессе их обработки с целью улучшения условий разделимости полезных сигналов от мешающих.

Выходные сигналы, описываемые корреляционными функциями r_{a1} , r_{a2} и $r'_{вз}$, по-прежнему отличаются по уровню и по величине временного сдвига. Это обстоятельство используется во второй части модели (рис. 4.6) для еще большего улучшения условий разделимости сигналов. Причем в ее основу положен метод «компенсации и уничтожения» (equalization and cancellation — ЕС) [78—81] компонент маскирующих сигналов.

Поясним работу этой второй, т. е. ЕС части модели, содержащей корректоры сигналов 5, 6 и 9 на рис. 4.6 и элементы вычитания 7, 8 и 10. Суть Е-преобразования, производимого с помощью корректоров сигналов, состоит в том, чтобы путем введения определенных величин временных и интенсивностных разностей, одинаковых для выделяемого и маскирующего сигналов, уравнивать, по возможности, компоненты маскирующего сигнала, поступающего на входы 1,2; 2,3 и 4,5 (см. рис. 4.6). Если после этой коррекции произвести вычитание соответствующих пар сигналов (С-преобразование), то при наличии различных величин бинаураль-

ных разностей для полезного ($\Delta L_s, \Delta \tau_s$) и маскирующего ($\Delta L_n, \Delta \tau_n$) сигналов получим в идеальном случае полное уничтожение маскирующего сигнала и, следовательно, увеличение отношения сигнал/помеха до бесконечности. Однако следует помнить, что Е-преобразования не могут быть выполнены идеально: при этом всегда возникают хаотически действующие погрешно-

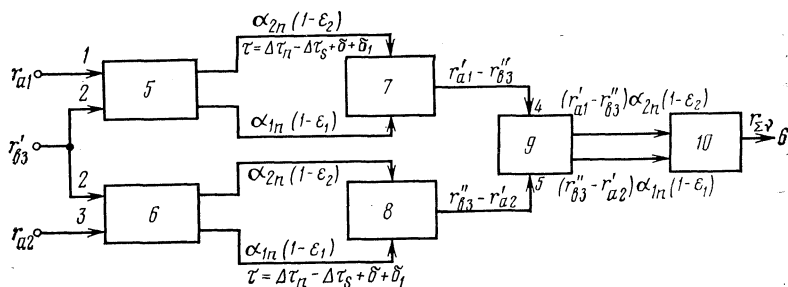


Рис. 4.6. Структурная схема второй части корреляционной ЕС-модели

сти. Поэтому на выходе каждого вычитающего элемента всегда будет существовать маскирующий сигнал и отношение сигнал/помеха будет иметь конечную величину. Заметим, что на рис. 4.6 приведены также требуемые коэффициенты коррекции сигналов, подвергающихся Е-преобразованию, где ε_1 и ε_2 — погрешности коррекции по интенсивности, а δ_1 — погрешность коррекции по времени.

Проделав все операции, предусмотренные второй частью структурной схемы корреляционной ЕС-модели, запишем в окончательном виде выражение для корреляционной функции сигнала, появляющегося на выходе 6 рис. 4.6:

$$r_{\Sigma v} = r_{cv} + r_{nv}, \quad (4.29)$$

где

$$\begin{aligned} r_{cv} = & 2a_{1S} a_{2S} a_{1n} a_{2n} [(1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \overline{f_{Sv}(t - \tau_{1S})} \times \\ & \times \overline{f_{Sv}(t - \tau_{1S} - \delta)} - a_{2S}^2 a_{1n}^2 (1 - \varepsilon_1)^2 \overline{f_{Sv}(t - \tau_{2S})} \times \\ & \times \overline{f_{Sv}(t - \tau_{2S} - \tau_n - \delta_2)} - a_{1S}^2 a_{2n}^2 (1 - \varepsilon_2)^2 \overline{f_{Sv}(t - \tau_{1S})} \times \\ & \times \overline{f_{Sv}(t - \tau_{1S} - \tau_n - \delta_2)}]; \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$r_{nv} = a_{1n}^2 a_{2n}^2 [2(1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_1) \overbrace{f_{nv}(t - \tau_{1n}) f_{nv}(t - \tau_{1n} - \tau_n - \delta)} - (1 - \varepsilon_1)^2 \overbrace{f_{nv}(t - \tau_{2n}) f_{nv}(t - \tau_{2n} - \tau_n - \delta_2)} - (1 - \varepsilon_2)^2 \overbrace{f_{nv}(t - \tau_{1n}) f_{nv}(t - \tau_{1n} - \tau_n - \delta_2)}] \quad (4.31)$$

Здесь r_{cv} и r_{nv} — корреляционные функции для полезной и маскирующей компонент выходного сигнала; ε_1 , ε_2 и δ , δ_1 , δ_2 — хаотические погрешности, возникающие в процессе обработки исходных сигналов, причем $\delta_2 = \delta + \delta_1$ и $\tau_n = \Delta\tau_n - \Delta\tau_s$. (4.32)

Используя известное преобразование Винера—Хинчина, нетрудно, имея корреляционные функции (4.30) и (4.31), получить выражения для спектральных плотностей мощности полезной и маскирующей компонент выходного сигнала:

$$\omega_c(f) = \omega_s(f) \{ 2a_{1s} a_{2s} a_{1n} a_{2n} (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \cos(\omega\delta) - a_{2s}^2 a_{1n}^2 (1 - \varepsilon_1)^2 \cos[\omega(\tau_n + \delta_2)] - a_{1s}^2 a_{2n}^2 (1 - \varepsilon_2)^2 \times \times \cos[\omega(\tau_n + \delta_2)] \}, \quad (4.33)$$

$$\omega_n(f) = a_{1n}^2 a_{2n}^2 \omega_n(f) \{ 2(1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \cos[\omega(\tau_n + \delta)] - (1 - \varepsilon_1)^2 \cos[\omega(\tau_n + \delta_2)] - (1 - \varepsilon_2)^2 \cos[\omega(\tau_n + \delta_2)] \}, \quad (4.34)$$

где $\omega_s(f)$ и $\omega_n(f)$ — спектральные плотности мощности нормализованных функций полезного $f_s(t)$ и маскирующего $f_n(t)$ сигналов.

Теперь, используя (4.33) и (4.34), можно без особых затруднений получить выражения для оценки мощности полезной $\langle P_{cv} \rangle$ и мешающей $\langle P_{nv} \rangle$ компонент сигнала на выходе модели. При этом, выполняя усреднение погрешностей, возникающих в модели при обработке сигналов, будем считать, что случайные величины ε_1 , ε_2 , δ и δ_1 центрированные, статистически независимы и имеют нормальное распределение. Кроме того, для упрощения математических преобразований, положим, что

а) $\sigma_{\varepsilon_1}^2 = \sigma_{\varepsilon_2}^2 = \sigma_{\varepsilon}^2$ и $\sigma_{\delta_1}^2 = \sigma_{\delta}^2$, где σ_{δ}^2 и σ_{ε}^2 — дисперсии упомянутых выше нормальных процессов;

б) временные функции $f_s(t)$ и $f_n(t)$ представляют собой равноамплитудный шум.

Проделав все эти довольно громоздкие преобразования, связанные с усреднением погрешностей ε_1 , ε_2 , δ ,

δ_1, δ_2 и переходом от спектральной плотности мощности к полной мощности сигнала в критической полосе уха, и считая, что величины σ_{δ}^2 и $\sigma_{\delta_2}^2$ настолько малы, что для любой воспроизводимой частоты выполняются условия

$$\exp\left(-\frac{\sigma_{\delta}^2}{2} \omega^2\right) \approx 1 \text{ и } \exp\left(-\frac{\sigma_{\delta_2}^2}{2} \omega^2\right) \approx 1, \quad (4.35)$$

получим следующие выражения:

$$\langle P_{cv} \rangle \cong P_v [2a_{1S} a_{2S} a_{1n} a_{2n} - (1 + \sigma_{\epsilon}^2) (a_{2S}^2 a_{1n}^2 + a_{1S}^2 a_{2n}^2)] \times R_v(\Delta\tau_n); \quad (4.36)$$

$$\langle P_{nv} \rangle \cong 2P_v a_{1n}^2 a_{2n}^2 R_v(\Delta\tau_n) \sigma_{\epsilon}^2, \quad (4.37)$$

где P_v — мощность нормализованного шума в критической полосе v ; $R_v(\Delta\tau_n)$ — значение нормализованной функции корреляции, вычисляется с помощью выражения, аналогичного (4.22); знак $\langle \rangle$ означает операцию усреднения, выполненную для случайных величин $\epsilon_1, \epsilon_2, \delta, \delta_1, \delta_2$.

Заметим, что если на слуховой анализатор воздействует m некоррелированных мешающих сигналов, то полагаем, что операции коррекции и вычитания производятся независимо для каждой пары полезный сигнал — мешающий сигнал, после чего результаты суммируются без учета знака. Далее, если полосы частот Δf полезного и мешающих сигналов шире критической Δf_v , то описанный выше способ обработки сигналов производится отдельно для каждой частотной группы, после чего результаты также суммируются. На основании изложенного выражения (4.36) и (4.37) преобразуются к виду

$$\langle P_c \rangle = P \sum_{v=1}^k \sum_{n=1}^m \frac{\Delta f_v}{\Delta f} \frac{1}{m} |2a_{1S} a_{2S} a_{1n} a_{2n} - (1 + \sigma_{\epsilon}^2) \times (a_{2S}^2 a_{1n}^2 + a_{1S}^2 a_{2n}^2) R_v(\Delta\tau_n)|; \quad (4.38)$$

$$\langle P_n \rangle = 2P \sum_{v=1}^k \sum_{n=1}^m \frac{\Delta f_v}{\Delta f} |a_{1n}^2 a_{2n}^2 R_v(\Delta\tau_n) \sigma_{\epsilon}^2|, \quad (4.39)$$

где P — полная мощность нормализованного сигнала в полосе $\Delta f = f_2 - f_1$; Δf_v — ширина критической полосы v ; k — число частотных групп, образуемых слухом при

восприятию данных сигналов; m — число мешающих сигналов.

При записи выражений (4.38) и (4.39) принято, что все воздействующие на входы органа слуха сигналы (как полезный, так и мешающие) имеют одинаковые частотные спектры (наихудший для разделения этих сигналов случай).

Очевидно, что отношение сигнал/помеха на выходе b корреляционной ЕС-модели с учетом (4.38) и (4.39) может быть представлено выражением

$$K = \frac{\langle P_c \rangle}{\langle P_n \rangle}. \quad (4.40)$$

Для того чтобы оценить степень бинауральной демаскировки сигналов слуховым анализатором, необходимо найти отношение

$$Q_j = \frac{K}{K_j}, \quad (4.41)$$

где K_j — отношение сигнал/помеха для выделяемого сигнала на левом ($j = 1$) или правом ($j = 2$) входах слухового анализатора, в данном случае определяемое как

$$K_j = \frac{a_{jS}^2}{\sum_{n=1}^m a_{jn}^2}. \quad (4.42)$$

Введем обозначения:

$$\frac{a_{1S}}{a_{2S}} = q_S; \quad \frac{a_{1n}}{a_{2n}} = q_n; \quad q_{Sn} = q_S q_n = \frac{a_{1S} a_{1n}}{a_{2S} a_{2n}}. \quad (4.43)$$

С учетом (4.43), (4.42), (4.40), (4.38) и (4.39) выражение (4.41) представим в виде

$$Q_j = \frac{\sum_{v=1}^k \sum_{n=1}^m \frac{\Delta f_v}{\Delta f} \frac{a_{jn}^2}{m} |2q_{Sn}^\theta - (q_S^{2\theta} + q_n^{2\theta}) R_v(\Delta\tau_n)| \sum_{n=1}^m a_{jn}^2}{2 \sum_{v=1}^k \sum_{n=1}^m \frac{\Delta f_v}{\Delta f} |a_{1n}^2 a_{2n}^2 R_v(\Delta\tau_n) \sigma_\varepsilon^2|}, \quad (4.44)$$

где $v = 2j - 3$, причем $j = 1$ или 2 .

Таким образом получено окончательное выражение, позволяющее оценить повышение отношения сигнал/помеха для полезного сигнала в результате выполнения преобразований, предусмотренных структурными схемами рис. 4.5 и 4.6 корреляционной ЕС-модели. Последняя предполагает также наличие так называемого механизма суждения, который из трех вариантов выходного сигнала—1, 3 и 6—на рис. 4.5 и 4.6 выбирает для дальнейшего анализа тот, который обладает наилучшим отношением сигнал/помеха для полезного (т. е. выделяемого слушателем) сигнала. Очевидно, если получим $Q_j < 1$, то это значит, что в процессе бинауральной обработки сигналов отношение сигнал/помеха ухудшается и, следовательно, в этом случае система будет действовать так же, как при восприятии монофонического сигнала, и демаскировка невозможна.

Некоторые особенности применения корреляционной ЕС-модели для оценки условий разделимости стереофонических сигналов будут показаны позже.

Модель корреляционного пеленгования. Анализ и сопоставление психоакустических особенностей локализации отдельных звуковых образов, составляющих пространственную панораму, при применении громкоговорящих агрегатов и головных телефонов позволяют предположить, что:

положение в пространстве, протяженность и воспринимаемая громкость КИЗ определяют местонахождение, форму и интенсивность очага возбуждения в слуховом центре головного мозга слушателя;

при одновременном восприятии нескольких пространственно разнесенных кажущихся источников звука в слуховом центре головного мозга слушателя возникает соответствующее пространственное распределение очагов возбуждений; по-видимому, эта картина является уменьшенной в масштабе копией исходной пространственной панорамы.

При восприятии нескольких кажущихся источников сложного звукового образа в одной точке (этот случай соответствует монофонической звукопередаче) возникающие в слуховом центре головного мозга слушателя очаги возбуждений, вызываемые сигналами каждого отдельного инструмента, накладываются друг на друга. Ограниченная разрешающая способность возбужденной области слухового центра, а также отсутст-

вие возможности для выделения того или иного элемента звуковой панорамы посредством переключения внимания слушателя на разные направления приводят к тому, что условия для наиболее полного воссоздания спектров музыкальных инструментов и их выделения на фоне звучащего ансамбля оказываются наихудшими. Бинауральное снижение маскировки здесь оказывается невозможным.

При одновременном восприятии слушателем нескольких пространственно разнесенных КИЗ (этот случай соответствует стереофонической звукопередаче) в слуховом центре возникает пространственная картина распределения возбуждений, являющаяся отражением реальной звуковой панорамы. Последнее сопровождается не только улучшением возможностей для анализа, так как в этом случае используется значительно больший отдел слуховой области, но также приводит к снижению взаимной маскировки источников звука, составляющих пространственную панораму. В этом случае работает механизм бинаурального освобождения от маскировки, что приводит к улучшению разделимости стереофонических сигналов и в конечном итоге к повышению прозрачности звучания. Заметим также, что протяженность кажущегося источника при двухканальной звукопередаче является управляемой. Посредством выбора определенных величин ΔL , $\Delta \tau$ или $R(\Delta \tau)$ канальных сигналов стереопары, формирующих звучание того или иного музыкального инструмента воспринимаемой панорамы, для каждого из них может быть найдена оптимальная протяженность звукового образа и соответствующего ему очага возбуждения в слуховом центре головного мозга слушателя, при которых достигается наиболее точное и естественное восприятие. Это вторая сторона предпочтительности стереовоспроизведения, связанная с локализацией.

Вся трудность получения критерия, оценивающего изменение условий разделимости сигналов в соответствии с рассмотренной выше моделью, состоит в том, чтобы найти функциональную зависимость, связывающую угловое положение, протяженность и воспринимаемую громкость КИЗ, во-первых, с характеристиками стереофонического сигнала, являющимися носителями этой информации и, во-вторых, с пространственным положением, формой и интенсивностью соответствующего этому звуковому образу очага возбуждения. Весьма

подходящей с этой точки зрения является так называемая обостренная функция локализации $r'_{\text{лок}}$, получаемая путем попарного вычитания составляющих уже известной функции ($r_{\text{лок}}$):

$$r'_{\text{лок}} = [r_2(\Delta\tau_{22,11} + \Delta\tau) + r_3(\Delta\tau_{12,21} - \Delta\tau)] - r_1(\Delta\tau_{12,11}) - r_4(\Delta\tau_{22,21}) = 2r_{вз} - r'_a - r''_a. \quad (4.45)$$

Операция обострения позволяет сузить кривую (4.45) примерно в 3 раза и получить большее соответствие теоретических и экспериментальных результатов. Заметим, что составляющие функции $r'_{\text{лок}}$ легко могут быть получены экспериментальным путем с помощью описанного ранее корреляционного пеленгатора.

Упрощенная структурная схема модели локализации звука, объясняющая этот феномен восприятия с

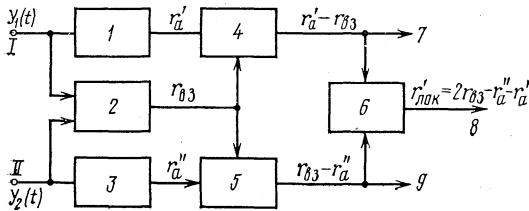


Рис. 4.7. Упрощенная структурная схема модели локализации звука

позиций корреляционного пеленгования, с учетом, по-видимому, выполняемой слухом операции обострения (4.45) приведена на рис. 4.7. Здесь I и II—левый и правый входы слухового анализатора; 1 и 3—автокорреляторы; 2—взаимный коррелятор; 4, 5 и 6—элементы вычитания; 7, 8, 9—выходы модели.

Очевидно также, что в соответствии с общей корреляционной моделью бинаурального слуха, разработанной в работах [24, 71, 72], возбуждение левой и правой концептуальных поверхностей в модели корреляционного пеленгования может быть связано с функциями $r_1(\Delta\tau_{12,11})$ и $r_4(\Delta\tau_{21,22})$, в то время как возбуждение центральной концептуальной поверхности описывается суммой функций: $r_2(\Delta\tau_{22,11}) + r_3(\Delta\tau_{12,21})$. Методы расчета этих функций были изложены ранее.

Отношение сигнал/помеха, характеризующее способ-

ность слушателя выделять полезный сигнал на фоне маскирующих звуков,

$$K = \frac{r'_{m \text{ лок. макс}}}{\sum_{i=1}^n r'_{i \text{ лок. } \varphi_m}}, \quad (4.46)$$

где $i=1, 2, \dots, n$ —число маскирующих сигналов; m —выделяемый сигнал.

Величина K в (4.46) представляет собой отношение максимального значения функции локализации ($r'_{m \text{ лок. макс}}$) выделяемого слушателем источника к сумме значений функций локализации остальных КИЗ, вычисленных для направления φ_m на оцениваемый источник звука.

Основное преимущество изложенного метода оценки разделимости сигналов состоит в том, что его практическая реализация не вызывает особых затруднений, так как исходные данные для выражения (4.46) легко могут быть получены с помощью широко применяемого в настоящее время корреляционного пеленгатора.

4.3. Применение моделей бинауральной демаскировки к оценке разделимости сигналов

Изменения порогов маскировки. Используя модель накопления (см. с. 136), получим для целого ряда частных случаев выражения, позволяющие теоретически предсказать изменение порога маскировки полезного сигнала. Предположим, что на входы слухового анализатора воздействуют только два сигнала: полезный и мешающий, описываемые выражением (4.11), и пусть выполняются условия $a_{1S}=a_{2S}=a_S$, $a_{1n}=a_{2n}=a_n$, $\Delta\tau_S=0$, $\Delta\tau_n=0$. Иными словами, компоненты каждого из этих сигналов одинаковы по уровню, по времени предъявления и синфазны. Этот случай условно обозначим как 0/0. С учетом этих ограничений, отношения мощностей полезного и маскирующего сигналов (4.14)—(4.19) для каждого из шести выходов модели накопления (см. рис. 4.3) примут вид

$$\left(\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} \right)_{I=VI} = \frac{a_S^2 P_{Sv}}{a_n^2 P_{nv}}. \quad (4.47)$$

Если допустим, что амплитуды полезного (a_s) и маскирующего (a_n) сигналов выбраны в данном случае так, что отношение мощностей (4.47) соответствует порогу маскировки (S_M) полезного сигнала, то можно написать, что

$$S_M = \frac{a_s^2 P_{sv}}{a_n^2 P_{nv}}. \quad (4.48)$$

Отсюда в данном случае уровень полезного сигнала, соответствующий его порогу маскировки,

$$L_{0/0} = 10 \lg S_M + 10 \lg a_n^2 P_{nv}. \quad (4.49)$$

Аналогично могут быть получены выражения, определяющие пороги маскировки полезного сигнала и для ряда других частных случаев (табл. 4.1.), когда компоненты полезного и маскирующего сигналов, воздействующих на левое и правое ухо слушателя, отличаются по уровню, фазе, времени предъявления. Таблица 4.1 содержит не только все сведения о предъявляемых сигналах (графа 1), но в ней указаны также номер выхода модели (графа 3), где происходит накопление сигнала, и выражения (графа 4), позволяющие в каждом конкретном случае вычислить значение порога маскировки. Сравнение последних с выражением (4.49) позволяет теоретически предсказать изменение порога маскировки по сравнению с условием 0/0 [см. (4.47) — (4.49)]. Эти данные также приведены в табл. 4.1, графа 5. В графе 6 представлены отдельно для каждого частного случая пределы изменения порогов маскировки. Для всех приведенных в таблице частных случаев модель накопления дает результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными. Приведем ряд теоретических и экспериментальных зависимостей не только иллюстрирующих степень пригодности данной модели, но и показывающих влияние пространственного разделения источников звука на изменение порога маскировки. Например, используя приведенное в табл. 4.1 (графа 5, строка 9) выражение, нетрудно рассчитать изменение величины $L_{(0/0) \Delta L_S}$, соответствующее порогу маскировки полезного сигнала, для любого значения интерауральной разности интенсивностей ΔL_S , если известна из опыта величина $L_{0/0}$ или $L_{\text{мон}/0}$. Эта зависимость представлена кривой 1 на рис. 4.8. Здесь по оси ординат отложен уровень полез-

Определение порогов маскировки

| 1 Сведения о предъявляемых сигналах | 2 Условное обозначение | 3 Номер выхода, где происходит накопление сигнала | 4 Выражение, определяющее отношение сигнал/помеха | 5 Уровень L полезного сигнала, соответствующий его порогу маскировки, дБ | 6 Примечание |
|---|---------------------------|--|---|---|--|
| 1. Полезный и маскирующий сигналы воздействуют бинаурально (на оба уха), причем $a_{1S} = a_{2S} = a_S$, $a_{1n} = a_{2n} = a_n$, $\Delta\tau_S = \Delta\tau_n = 0$ | 0/0 | I—VI | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \frac{a_S^2 P_{Sv}}{a_n^2 P_{nv}}$ | $L_{0/0} = 10 \lg S_M + 10 \lg a_n^2 P_{nv}$ | — |
| 2. Полезный и маскирующий сигналы воздействуют только на левое ухо слушателя (моноуральное восприятие), причем $a_{1S} = a_S$, $a_{1n} = a_n$, $a_{2S} = a_{2n} = 0$ | МОН/МОН | I, II, IV, V, VI | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \frac{a_S^2 P_{Sv}}{a_n^2 P_{nv}}$ | $L_{\text{мон/мон}} = 10 \lg S_M + 10 \lg a_n^2 P_{nv}$ | На третьем выходе модели как полезный, так и маскирующий сигналы отсутствуют |
| 3. Полезный и маскирующий сигналы воздействуют только на правое ухо слушателя (моноуральное восприятие), причем $a_{2S} = a_S$, $a_{2n} = a_n$, $a_{1S} = a_{1n} = 0$ | МОН/МОН | I, II, III, IV, VI | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \frac{a_S^2 P_{Sv}}{a_n^2 P_{nv}}$ | $L_{\text{мон/мон}} = 10 \lg S_M + 10 \lg a_n^2 P_{nv}$ | На пятом выходе модели как полезный, так и маскирующий сигналы отсутствуют |

Продолжение табл. 4.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|-------|-----------|---|--|--|
| 4. Полезный сигнал действует только на левое ухо слушателя, маскирующий — только на правое, т. е. $a_{1S} \neq 0$, $a_{2n} \neq 0$, $a_{2S} = a_{1n} = 0$, и наоборот | — | V или III | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \infty$ | Величина L равна абсолютному порогу слышимости | Маскировка полезного сигнала мешающим отсутствует, так как каждый из них воздействует на разные входы органа слуха |
| 5. Полезный сигнал по-дан моноурально (только на один из входов органа слуха), мешающий — бинаурально, например, $a_{1S} \neq 0$, $a_{2S} = 0$, $a_{1n} = a_{2n} = a_n$, $\Delta\tau_n = 0$ | мон/0 | II | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \frac{4a_{1S}^2 P_{Sv}}{a_n^2 P_{nv}}$ | $L_{\text{мон}/0} = L_{0/0}$ — $10 \lg 4 = L_{0/0}$ — 6 дБ | Если полезный сигнал подать теперь на правое ухо слушателя, то результат не изменится, за исключением того, что накопление уже будет происходить на другом выходе модели |
| 6. Полезный сигнал действует моноурально (только на один из входов органа слуха), мешающий — бинаурально и в противофазе, т. е. $a_{1S} \neq 0$, $a_{2S} = 0$, $a_{1n} = a_n$, $a_{2n} = -a_n$ | мон/π | I | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \frac{4a_{1S}^2 P_{Sv}}{a_n^2 P_{nv}}$ | $L_{\text{мон}/\pi} = L_{0/0}$ — $10 \lg 4 = L_{0/0}$ — 6 дБ | При воздействии полезного сигнала на правое ухо слушателя величина порога маскировки не изменится, однако накопление полезного сигнала уже будет осуществляться на другом выходе модели накопления |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|------------------------------|-------------------------|---|---|--|
| <p>7. Полезный сигнал, одинаковый по уровню, воздействует синфазно «а» или противофазно «б» на оба уха слушателя, а маскирующий только на один из входов, т. е. а) $a_{1S} = a_{2S} = a_S$, $a_{1n} \neq 0$, $a_{2n} = 0$ и б) $a_{1S} = -a_{2S} = a_S$, $a_{1n} \neq 0$, $a_{2n} = 0$</p> | <p>а) 0/мон б) π/мон</p> | <p>III</p> | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} \rightarrow \infty$ | <p>Величины $L_{0/мон}$ и $L_{\pi/мон}$ одинаковы и равны абсолютному порогу слышимости</p> | <p>При воздействии маскирующего сигнала только на правое ухо слушателя величина порога маскировки не изменится, но накопление будет происходить уже на выходе V модели</p> |
| <p>8. Полезный и маскирующий сигналы воздействуют бинаурально, отлого по уровню для каждого из них равно 0, т. е. $\Delta L_S = \Delta L_n = j$, причем а) $a_{1S} = a_{2S}$, $a_n = a_{1n} = -a_{2n}$ и б) $a_{1S} = -a_{2S}$, $a_{1n} = a_{2n} = a_n$</p> | <p>а) 0/π б) π/0</p> | <p>I, IV II, IV</p> | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \frac{9a_{1S}^2 P_{Sv}}{a_n^2 P_{nv}}$ | <p>$L_{0/\pi} = L_{\pi/0} = L_{0/0} - 9,5$ дБ</p> | <p>В случае «а» полезный сигнал воздействует синфазно, а маскирующий — в противофазе; в случае «б» наоборот</p> |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|--|-----------|--|---|---|
| <p>9. Оба сигнала воздействуют бинаурально и синфазно, причём для полезного сигнала вводятся интерференциальная разность интенсивностей ΔL_s, в то время как для маскирующего величина $\Delta L_n = 0$, т. е. $a_{1s} \neq 0$, $a_{2s} = qa_{1s}$; ($0 < q < 1$), $a_{1n} = a_{2n} = a_n$</p> | <p>$(0/0)_{\Delta L_s}$</p> | <p>II</p> | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \frac{(2-q)^2 a_{1s}^2 P_{Sv}}{a_n^2 P_{nv}}$ | <p>$L_{(0/0)_{\Delta L_s}} = L_{0/0}$ — $-20 \lg(2-q)$, где $q = 10^{\frac{\Delta L_s}{20}}$</p> | <p>Очевидно, что если $q = 1$ ($\Delta L_s = 0$), то $L_{(0/0)_{\Delta L_s} = 0} = L_{0/0}$, и при $q = 0$ ($\Delta L_s = \infty$) будем иметь $L_{(0/0)_{\Delta L_s} = \infty} = L_{0/0}$ — — 6 дБ $= L_{\text{мон}/0}$</p> |
| <p>10. Полезный сигнал воздействует в противофазе и для него вводятся также интерференциальная разность интенсивностей ΔL_s, для маскирующего сигнала, воздействующего синфазно, величина $\Delta L_n = 0$, т. е. $a_{1s} \neq 0$, $a_{2s} = -qa_{1s}$, $a_{1n} = a_{2n} = a_n$</p> | <p>$(\pi/0)_{\Delta L_s}$</p> | <p>II</p> | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \frac{(2+q)^2 a_{1s}^2 P_{Sv}}{a_n^2 P_{nv}}$ | <p>$L_{(\pi/0)_{\Delta L_s}} = L_{0/0}$ — $-20 \lg(2+q)$, где $q = 10^{\frac{\Delta L_s}{20}}$</p> | <p>Если $q = 1$, то $\Delta L_s = 0$, и тогда имеем $L_{(\pi/0)_{\Delta L_s} = 0} = L_{0/0}$ — — 9,5 дБ; при $q = 0$ ($\Delta L_s = \infty$), получим $L_{(\pi/0)_{\Delta L_s} = \infty} = L_{0/0}$ — 6 дБ $= L_{\text{мон}/0}$</p> |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|---------------------------------------|----------------------|--|---|--|
| <p>11. Полезный и маскирующий сигналы воздействуют бинаурально и синфазно, для каждой из этих пар сигналов введены одинаковые по величине, но противоположные по знаку интеруральные различия по интенсивности, т. е. $\Delta L_s = -\Delta L_n = \Delta L$, $\Delta \tau_s = \Delta \tau_n = 0$</p> | <p>(0/0)$\Delta L$</p> | <p>II V</p> | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \frac{(2-q)^2}{(2q-1)^2} \times \frac{a_{1s}^2 P_{sv}}{a_n^2 P_{nv}}$ <p>при $q > 0,5$; $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \frac{a_{1s}^2 P_{sv}}{q^2 a_n^2 P_{nv}}$ при $q < 0,5$</p> | $L_{(0/0)\Delta L} = L_{0/0} + 20 \lg \left(\frac{2q-1}{2-q} \right)$ <p>при $q > 0,5$; $L_{(0/0)\Delta L} = L_{0/0} - 20 \lg q$ при $q < 0,5$, $\Delta L_s = -20 \lg q$, дБ</p> | <p>Если $q \rightarrow 0$, то величина порога маскировки будет стремиться к абсолютноному порогу слышимости полезного сигнала. При $q = 1$ имеем $L_{(0/0)\Delta L} = L_{0/0}$</p> |
| <p>12. Полезный сигнал воздействует моноурально, например, только на левое ухо слушателя (рующийся — бинаурально и синфазно, и для него введена интеруральная разность интенсивностей (ΔL_n), т. е. $a_n = a_{1n} = qa_{2n}$ ($0 < q < 1$))</p> | <p>(мон/0)ΔL_n</p> | <p>II</p> | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \frac{4a_{1s}^2 P_{sv}}{(2-q)a_n^2 P_{nv}}$ | $L_{(мон/0)\Delta L_n} = L_{0/0} - 20 \lg \left(\frac{2}{2-q} \right) = L_{мон/0} - 20 \lg \left(\frac{1}{2-q} \right)$ <p>где $q = 10^{\frac{\Delta L}{20} n}$</p> | <p>Если $q = 1$, то $\Delta L_n = 0$ и $L_{(мон/0)\Delta L_n} = 0 = L_{мон/0}$. При $q = 0$ имеем $L_{(мон/0)\Delta L_n} = \infty = L_{мон/0} + 6 \text{ дБ} = L_{0/0}$</p> |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|----------------------------------|-----------------|--|--|---|
| <p>13. Полезный и состоящий из двух компонент маскирующий сигналы воздействуют бинарально, причем а) $a_{1S} = a_{2S}$ и $b = c$; б) $a_{1S} = -a_{2S}$, $b = c$</p> | <p>а) $(0/0)_R$</p> | <p>а) II, V</p> | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \frac{9a_{1S}^2 P_{Sv}}{(5 + 4b^2) P_{nv}}$ | $L_{(0/0)_R} = L_{0/0} + 20 \lg \left(\frac{5 + 4b^2}{9} \right)$ | <p>а) если $c = b = 1$ и $d = 0$, то для маскирующего сигнала значение коэффициента корреляции равно 1, при этом имеем $L_{(0/0)_R=1} = L_{(0/0)}$; при $c = b = 0$ и $d = 1$ значение $R = 0$ и тогда $L_{(0/0)_R=0} = L_{(0/0)}$ — — 2,6 дБ;</p> |
| | <p>б) $(\pi/0)_R$</p> | <p>б) I, VI</p> | $\frac{P'_{Sv}}{P'_{nv}} = \frac{9a_{1S}^2 P_{Sv}}{(5 - 4b^2) P_{nv}}$ | $L_{(\pi/0)_R} = L_{0/0} + 20 \lg \left(\frac{5 - 4b^2}{9} \right)$ | <p>б) если $c = b = 1$ и $d = 0$, то $L_{(\pi/0)_R=1} = L_{(0/0)}$ — — 9,5 дБ $= L_{(\pi/0)}$; при $c = b = 0$ и $d = 1$ имеем $L_{(\pi/0)_R=0} = L_{0/0}$ — — 2,6 дБ</p> |

ного сигнала L_S , дБ, а по оси абсцисс — величины ΔL_S , дБ. Причем полезным сигналом является тон частотой 315 Гц, последний маскируется однородным шумом с уровнем 70 дБ. В отличие от этого, кривая 2 рис. 4.8 показывает изменение уровня полезного сигнала $[L(\pi/0)_{\Delta L_S}]$ в случае, когда обе его компоненты воздействуют на уши слушателя в противофазе [см. табл. 4.1, строка 10, условие $(\pi/0)_{\Delta L_S}$]. Данные эксперимента показаны кружочками, причем отрезки по вертикали говорят о разбросе экспертопоказаний.

На рис. 4.9 для тех же самых испытательных сигналов приведена кривая изменения порога маскировки для случая $(\text{мон}/0)_{\Delta L_n}$ (см. табл. 4.1, строка 12). Здесь же по оси ординат отложен уровень полезного сигнала L_S , соответствующий его порогу маскировки, по оси абсцисс — величины вводимых интенсивностных различий ΔL_n , дБ, для воздействующих на левое и правое ухо слушателя синфазных компонент маскирующего сигнала.

Заметим, что модель накопления дает также результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными и при наличии интерауральных временных различий для пар полезного ($\Delta \tau_S$) и маскирующего ($\Delta \tau_n$) сигналов, если учтены следующие особенности при их обработке. Во-первых, орган слуха компенсирует имеющийся временной сдвиг для левой и правой компонент полезного сигнала с целью получения для

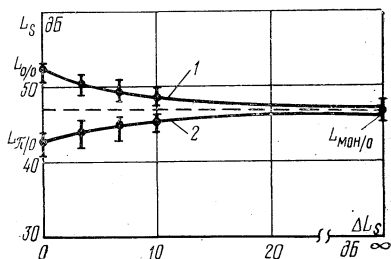


Рис. 4.8. Влияние бинауральной разности уровней тона на величину его порога слышимости при маскировке равноамплитудным шумом

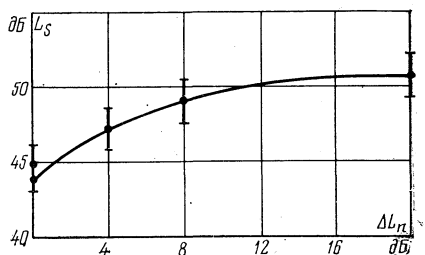


Рис. 4.9. Влияние бинауральной разности уровней маскирующего шума на величину порога слышимости чистого тона

них максимума корреляционной функции. Причем этой операции коррекции по времени в равной степени подвергается и маскирующий сигнал, для которого вводится тоже значение $\Delta\tau = -\Delta\tau_s$. Во-вторых, орган слуха производит ослабление по уровню каждой из запаздывающих компонент входных сигналов. На рис. 4.10 показано

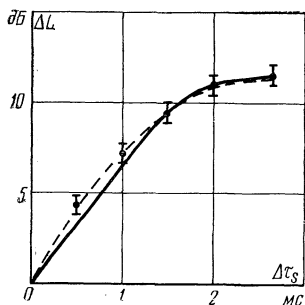


Рис. 4.10. Снижение порога маскировки чистого тона от величины бинауральной временной разности маскирующего равноамплитудного шума

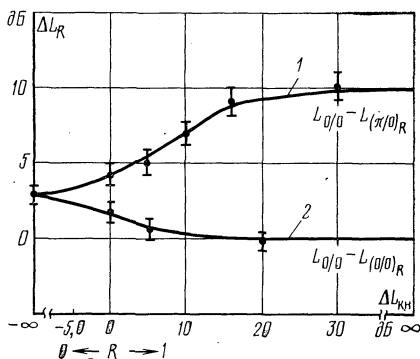


Рис. 4.11. Изменение порога маскировки чистого тона частотой 315 Гц от величины коэффициента корреляции маскирующего равноамплитудного шума

снижение порога маскировки полезного сигнала (тон с частотой 200 Гц) при введении интераурального фазового различия $\Delta\varphi_s$, что эквивалентно в данном случае наличию $\Delta\tau_s$. Маскирующий сигнал по-прежнему представляет собой однородный шум с уровнем 70 дБ. Причем величина ΔL вычислена как разность уровней $L_{0/0}$ и $L_{\varphi/0}$. И в этом случае результаты вычислений хорошо подтверждаются экспериментом (см. рис. 4.10, точки).

Кроме того, модель накопления дает возможность оценить влияние коэффициента корреляции пар входных сигналов на изменение порога маскировки. Для определенности предположим, что полезный сигнал подается в фазе на оба уха, а маскирующий является суммой двух компонент, т. е.

$$\left. \begin{aligned} y_{1v}(t) &= a_{1s} f_{sv}(t) + [bf_{1v}(t) + df_{2v}(t)]; \\ y_{2v}(t) &= a_{2s} f_{sv}(t) + [cf_{1v}(t) + df_{3v}(t)], \end{aligned} \right\} \quad (4.50)$$

где $|b| = |c|$, а коэффициенты b и d связаны соотношением $b^2 + d^2 = 1$; временные функции полезного сигнала $f_{sv}(t)$ и маскирующих $f_{1v}(t)$, $f_{2v}(t)$, $f_{3v}(t)$ — нормализованы и не коррелированы. Из (4.50) очевидно, что, изменяя соотношение между коэффициентами b и d , можно менять значение коэффициента корреляции между сигналами $[bf_{1v}(t) + df_{2v}(t)]$ и $[cf_{1v}(t) + df_{3v}(t)]$ от 1 при $b=1$ и $d=0$ до нуля, если b и c равны 0. На рис. 4.11 приведены кривые, показывающие изменение порога маскировки от величины коэффициента корреляции R , маскирующего сигнала для двух случаев: а) полезный сигнал одинаковый по уровню воздействует на левое и правое ухо слушателя синфазно [обозначим этот вариант как $(0/0)_R$, кривая 2 на рис. 4.11] и б) компоненты полезного сигнала также одинаковы по уровню и действуют в противофазе [условно обозначим этот вариант как $(\pi/0)_R$, кривая 1 на рис. 4.11]. Соответствующие формулы приведены в табл. 4.1, строка 13. По оси ординат на рис. 4.11 отложены величины ΔL_R , определяемые как разности уровней $L_{0/0}$ и $L_{(0/0)_R}$ (вариант «а») или $L_{0/0}$ и $L_{(\pi/0)_R}$ (вариант «б»); по оси абсцисс — разность уровней $\Delta L_{к.н.}$, дБ, между коррелированными $[bf_{1v}(t)]$ и $[cf_{1v}(t)]$ и некоррелированными $[df_{2v}(t)]$ и $[df_{3v}(t)]$ компонентами маскирующего сигнала, т. е. $\Delta L_{к.н.} = 20 \lg(b/d)$. При этом, как и ранее, полезным сигналом является тон частотой 315 Гц, маскирующим — однородный шум с уровнем 70 дБ. И в этом случае результаты расчетов хорошо согласуются с данными эксперимента.

Изменение отношения сигнал/помеха. Для оценки разделимости стереофонических сигналов используем выражения (4.38) — (4.40), полученные в результате математического моделирования процесса бинауральной демаскировки сигналов в соответствии с представлениями корреляционной ЕС-модели. Нетрудно видеть, что величина K в выражениях (4.38) — (4.40) является не только функцией характеристик входных сигналов m , ΔL , $\Delta \tau$, $\omega(f)$, $R(\Delta \tau)$, но также в значительной степени определяется величинами дисперсий σ_ε^2 и σ_δ^2 хаотических погрешностей, возникающих в слуховой системе в процессе переработки информации.

Используя выражения (4.38) — (4.40), оценим влияние величин ΔL , $\Delta \tau$ сигналов, формирующих отдельные источники звука пространственной панорамы, на изменение отношения сигнал/помеха (K) и определим

значения дисперсий σ_e^2 и σ_δ^2 , при которых корреляционная ЕС-модель дает достоверные результаты.

Для большей простоты и наглядности рассуждений, не снижающих, однако, общности полученных при этом закономерностей, воспользуемся при проведении теоретических расчетов и соответствующих экспериментальных исследований простейшей пространственной панорамой, состоящей из трех звуковых образов. При этом отдельно рассмотрим два случая: а) пространственная звуковая панорама создается введением в каналные сигналы, формирующие каждый из трех звуковых образов, только временных разностей ($\Delta\tau$) и б) введением только интенсивностных разностей (ΔL), причем метод синтеза аналогичен изложенному ранее в § 4.1. Кроме того, пусть источниками монофонических сигналов являются три разных шумовых генератора, создающих некоррелированный между собой равноамплитудный шум в одинаковой полосе частот (наихудший случай для выделения) от $f_1=80$ Гц до $f_2=1080$ Гц. Допустим, что воспроизведение синтезированных сигналов осуществляется с помощью головных телефонов.

Учитывая метод синтеза воспроизводимых сигналов, преобразуем выражение (4.40) к виду:

для интенсивностной стереофонии ($\Delta L \neq 0, \Delta\tau = 0$)

$$K_{\Delta L} = \frac{\sum_{v=1}^{\kappa} \sum_{n=1}^2 \frac{\Delta f_v}{\Delta f} | 2a_{1S} a_{2S} a_{1n} a_{2n} - (1 + \sigma_e^2) (a_{2S}^2 a_{1n}^2 + a_{1S}^2 a_{2n}^2) |}{4 \sum_{v=1}^{\kappa} \sum_{n=1}^2 \frac{\Delta f_v}{\Delta f} a_{1n}^2 a_{2n}^2 \sigma_e^2} ; \quad (4.51)$$

для временной стереофонии ($\Delta L = 0, \Delta\tau \neq 0$)

$$K_{\Delta\tau} = \frac{\sum_{v=1}^{\kappa} \sum_{n=1}^2 \frac{\Delta f_v}{\Delta f} | 1 - (1 + \sigma_e^2) R_v(\Delta\tau_n) |}{2 \sum_{v=1}^{\kappa} \sum_{n=1}^2 \frac{\Delta f_v}{\Delta f} \sigma_e^2 | R_v(\Delta\tau_n) |} , \quad (4.52)$$

причем относительное изменение этих величин с введением ΔL или $\Delta \tau$ можно представить как

$$K'_{\Delta L, \Delta \tau} = \frac{K_{\Delta L \neq 0, \Delta \tau \neq 0}}{K_{\Delta L = 0, \Delta \tau = 0}} \quad (4.53)$$

Зависимости, показывающие изменение величины $K'_{\Delta L}$ в случае чисто интенсивностной стереофонии, представлены на рис. 4.12 и 4.13. Здесь по оси ординат отложено относительное изменение отношения сигнал/помеха в децибелах, вычисленное по выражениям (4.51) и (4.53) отдельно для боковых (см. рис. 4.12) и центрального (см. рис. 4.13) кажущихся источников пространственной панорамы, а по оси абсцисс — разность интенсивностей (ΔL , дБ) сигналов, формирую-

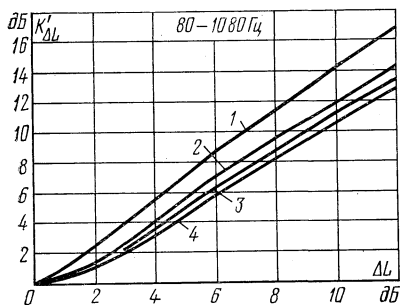


Рис. 4.12. Зависимости отношения сигнал/помеха для боковых КИЗ пространственной панорамы при интенсивностной стереофонии: кривая 1 — при $\sigma_{\epsilon}^2 = 0,1$; кривая 2 — при $\sigma_{\epsilon}^2 = 0,2$; кривая 3 — при $\sigma_{\epsilon}^2 = 0,25$; кривая 4 — при $\sigma_{\epsilon}^2 = 0,3$

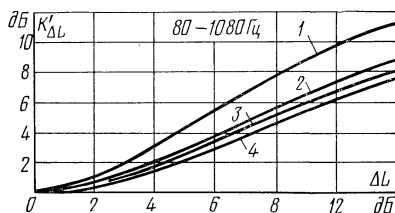


Рис. 4.13. Зависимости отношения сигнал/помеха для центрального КИЗ пространственной панорамы при интенсивностной стереофонии: кривая 1 — при $\sigma_{\epsilon}^2 = 0,1$; кривая 2 — при $\sigma_{\epsilon}^2 = 0,2$; кривая 3 — при $\sigma_{\epsilon}^2 = 0,25$; кривая 4 — при $\sigma_{\epsilon}^2 = 0,3$

щих боковые звуковые образы. Параметром этих кривых является величина дисперсии¹ σ_{ϵ}^2 , характеризующая погрешности при проработке информации в слуховой системе. Нетрудно видеть (см. рис. 4.12, 4.13), что при постоянной величине σ_{ϵ}^2 относительное значение отношения сигнал/помеха ($K'_{\Delta L}$) растет тем зна-

¹ Значения дисперсий σ_{δ}^2 и $\sigma_{\delta_2}^2$ настолько малы, что для любой воспроизводимой частоты выполняется условие (4.35). Последнее будет выполнено, если $\sigma_{\delta}^2 < 0,1$.

чительнее, чем больше величина ΔL . Кроме того, при увеличении ΔL наблюдается более быстрое изменение отношения $K'_{\Delta L}$ для сигналов, формирующих боковые звуковые образы воспринимаемой панорамы. Отсюда следует, что с увеличением ΔL должно наблюдаться преимущественное улучшение условий для выделения боковых звуковых образов.

Влияние временной разности $\Delta\tau$ на изменение величины $K'_{\Delta\tau}$ для боковых (кривая 1) и центрального (кривая 2) КИЗ представлено на рис. 4.14 (сплошные линии). По оси ординат отложены величины $K'_{\Delta\tau}$, дБ, вычисленные по выражениям (4.53) и (4.52); по оси

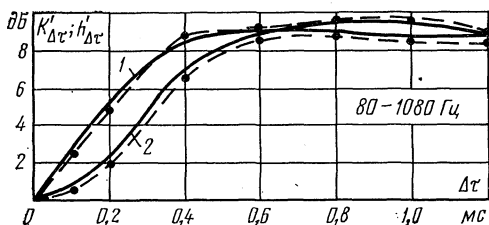


Рис. 4.14. Экспериментальные (пунктирные кривые) и теоретические (сплошные кривые) зависимости (при $\sigma_{\varepsilon}^2 = 0,25$) изменения отношения сигнал/помеха для боковых 1 и центрального 2 КИЗ при временной стереофонии

абсцисс — величина вводимой задержки $\Delta\tau$, мс. Эти зависимости получены при значении $\sigma_{\varepsilon}^2 = 0,25$. Их характер аналогичен ранее полученным кривым (см. рис. 4.12, 4.13) только при $\Delta\tau < 0,6$ мс. Дальнейшее увеличение временной разности ($\Delta\tau > 0,6$ мс) не вызывает изменения величин $K'_{\Delta\tau}$, оказывающихся практически одинаковыми для каждой пары сигналов, формирующих тот или иной звуковой образ воспринимаемой панорамы. Последнее становится возможным потому, что при выбранных условиях формирования стереопанорамы интенсивность, форма и пространственное распределение очагов возбуждения в слуховом центре головного мозга слушателя (соответствующих отдельным КИЗ) не изменяются, если $\Delta\tau > 0,6$ мс. При этом не должны также изменяться и условия разделимости воспроизводимых сигналов.

Очевидно, что совпадение теоретических и экспериментальных зависимостей, характеризующих условия восприятия центрального и боковых звуковых образов при введении ΔL или $\Delta\tau$, должно наблюдаться только при определенной величине σ_{ε}^2 . Найдем это значение,

используя метод определения порога слышимости h . Под величиной h здесь понимается наименьший воспринимаемый уровень выделяемого источника звука, при котором слушатель еще замечает его звучание на фоне мешающих звуков.

Прежде всего установим количественную связь между величинами K и h . Не вызывает сомнения тот факт, что порогу слышимости будет соответствовать одно и то же значение величины $K_{\Delta L}$ или $K_{\Delta \tau}$, равное K_{Π} . С учетом этого можно написать, что

$$K_{\Pi} = h_{\Delta L}^2 K_{\Delta L} = h_{\Delta \tau}^2 K_{\Delta \tau}, \quad (4.54)$$

где $h < 1$, причем $h = a'_{1S}/a_{1S} = a'_{2S}/a_{2S}$. Здесь a'_{1S} и a'_{2S} — амплитуды полезного сигнала, соответствующие порогу слышимости выделяемого источника звука.

При $\Delta L = 0$ или $\Delta \tau = 0$ выражение (4.54) примет вид

$$K_{\Pi} = h_{\Delta L=0}^2 K_{\Delta L=0} = h_{\Delta \tau=0}^2 K_{\Delta \tau=0}. \quad (4.55)$$

После деления (4.54) на (4.55) и логарифмирования полученные выражения можно записать в виде

$$10 \lg \frac{K_{\Delta L \neq 0}}{K_{\Delta L=0}} = 20 \lg \frac{h_{\Delta L=0}}{h_{\Delta L \neq 0}}; \quad 10 \lg \frac{K_{\Delta \tau \neq 0}}{K_{\Delta \tau=0}} = 20 \lg \frac{h_{\Delta \tau=0}}{h_{\Delta \tau \neq 0}}. \quad (4.56)$$

Из выражения (4.56) следует, что относительное изменение отношения сигнал/помеха для сигналов выделяемого звукового образа равно по величине относительному изменению его порога слышимости. Следовательно, изменение порога слышимости непосредственно характеризует способность органа слуха человека разделять воспринимаемые сигналы.

Значение порога слышимости h для каждого из трех звуковых образов упомянутой выше пространственной панорамы легко может быть найдено экспериментальным путем, например с помощью методики, впервые изложенной в [74]. Суть ее состоит в следующем. В первой части эксперимента слушатель с помощью специального потенциометра уменьшает уровень канальных сигналов, формирующих выделяемый источник звука, до величины h_1 , при которой он перестает замечать его присутствие. Во второй части экспертизы слушатель, наоборот, увеличивает уровень выделяемого источника звука от своего минимального значения,

лежащего ниже порога слышимости, до величины h_2 , при которой он начинает замечать появление третьего звукового образа. Порог слышимости определяется как среднее арифметическое величин h_1 и h_2 . Заметим, что путем проведения обширных экспериментальных исследований в [74] было установлено, что изложенная выше методика и так называемая «классическая», описание которой также приведено в этой работе, дают

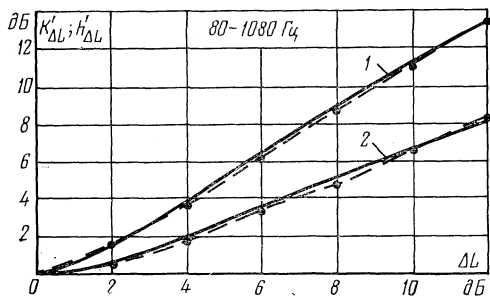


Рис. 4.15. Экспериментальные (пунктирные кривые) и теоретические (сплошные линии) зависимости (при $\sigma_\varepsilon^2 = 0,25$) изменения отношения сигнал/помеха для боковых 1 и центрального 2 КИЗ при интенсивностной стереофонии

практически совпадающие результаты. Это дает право применить первый метод, как наиболее простой и оперативный. Число экспертов выбрано с учетом получения доверительного интервала, равного 1 дБ при достоверности 0,99.

Результаты этих экспериментальных исследований представлены на рис. 4.14 и 4.15 (пунктирные кривые). Здесь же для сравнения приведены зависимости $K'_{\Delta L} = f_1(\Delta L)$ или $K'_{\Delta \tau} = f_2(\Delta \tau)$ (сплошные линии), найденные теоретическим путем с помощью выражений (4.51) — (4.53) при условии, что $\sigma_\varepsilon = 0,5$ и $\sigma_\delta \ll \leq 0,1$ мс. По оси ординат отложены значения $20 \lg \frac{h_{\Delta L=0}}{h_{\Delta L \neq 0}}$

и $K'_{\Delta L}$ или $20 \lg \frac{h_{\Delta \tau=0}}{h_{\Delta \tau \neq 0}}$ и $K'_{\Delta \tau}$, дБ; по оси абсцисс — величины временных ($\Delta \tau$, мс) или интенсивностных (ΔL , дБ) разностей сигналов, формирующих боковые звуковые образы воспринимаемой панорамы. Нетрудно видеть (см. рис. 4.14, 4.15), что расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 1 дБ.

Таким образом, при выбранных условиях проведения эксперимента корреляционная ЕС-модель дает ре-

зультаты, хорошо согласующиеся с данными опыта, если $\sigma_\varepsilon = 0,5$ и $\sigma_\delta \leq 0,1$ мс.

Изменение разборчивости речевых источников. Используя критерий (4.46), вычислим изменение разборчивости каждого из трех речевых источников пространственной панорамы, полученной путем введения в каналы сигналы только интенсивностных разностей для тех же самых акустических условий и на том же испытательном сигнале, что и описанные (см. с. 132—134)

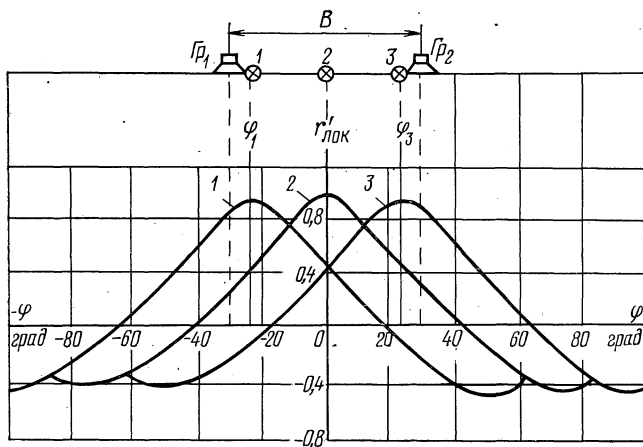


Рис. 4.16. Функции локализации сигналов, формирующих пространственную панораму, состоящую из речевых КИЗ: $B=1,8$ м; $2\psi=60^\circ$; $\Delta L=8$ дБ

артикуляционные испытания. Сохранение неизменными условий проведения эксперимента и метода синтеза стереопанорамы позволяет сравнить полученные здесь результаты с данными описанных ранее экспертиз (см. с. 133) и тем самым оценить степень пригодности критерия (4.46) для оценки условий разделимости стереофонических сигналов.

С помощью известного прибора — корреляционного пеленгатора — найдем экспериментальным путем функциональные зависимости r'_a , r''_a и $r_{вз}$, являющиеся элементами обостренной функции локализации $r'_{лок}$ (4.45). Заметим, что свойство взаимонезависимости по локализации кажущихся звуковых образов дает возможность измерения зависимостей r'_a , r''_a и $r_{вз}$ путем поочередного воспроизведения сигналов, соответствующи-

щих отдельным звуковым образам стереопанорамы. Далее путем попарного вычитания полученных зависимостей получим функции локализации для каждого из речевых источников и представим последние графически (рис. 4.16). Здесь для большей наглядности показаны местоположения КИЗ на линии базы громкоговорителей, указаны величина базы B , м, и значения введенных интенсивностных разностей $\Delta L=8$ дБ для сигналов, формирующих боковые (см. рис. 4.16, кружочки 1 и

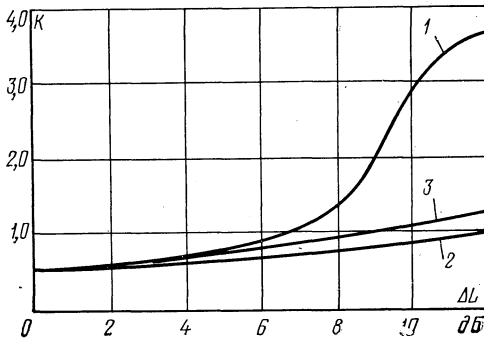


Рис. 4.17. Зависимость отношения сигнал/помеха для центрального 2 и боковых 1 КИЗ от разности интенсивностей сигналов, формирующих последние: $B=1,8$ м; $2\varphi=60^\circ$; $\Delta L \neq 0$; $\Delta\tau=0$

3) речевые источники. Подобным образом может быть получена пространственная картина распределения функций $r'_{\text{лок}}$ для каждого из вводимых значений ΔL . Теперь можно вычислить для сигналов каждого речевого источника отношение сигнал/помеха (K), используя выражение (4.46).

Результаты расчетов представлены графически на рис. 4.17, отдельно для боковых (кривая 1) и центрального (кривая 2) КИЗ. Рассмотрим полученные зависимости.

При $\Delta L=0$ (этот случай соответствует двухканальной монофонической передаче) функции локализации воспроизводимых сигналов оказываются совмещенными и равными по величине. Последнее обеспечивается условиями проведения опыта. При этом величины K также одинаковы. Следует ожидать, что при слуховом восприятии таких сигналов условия их разделимости будут наихудшими. Аналогичные результаты получены также при использовании метода артикуляции, а именно: разборчивость речевых КИЗ, составляющих прост-

ранственную панораму, при $\Delta L=0$ минимальна и одинакова по величине (см. рис. 4.1).

Введение одинаковых по величине, но противоположных по знаку интенсивностных разностей для сигналов, формирующих боковые звуковые образы пространственной панорамы, вызывает равное смещение этих источников в разные стороны, в то время как центральный КИЗ по-прежнему локализуется слушателем посередине базы. Аналогичным образом распределяются и соответствующие им функции локализации, но величина максимального значения последних не изменяется (см. рис. 4.16). При этом наблюдается рост

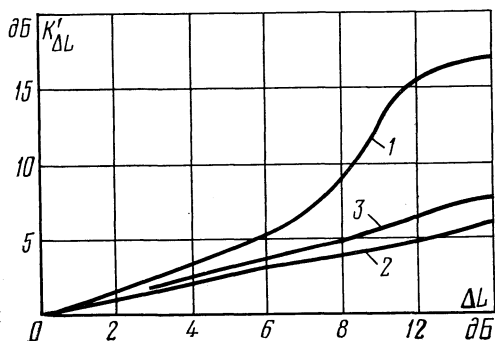


Рис. 4.18. Относительное изменение отношения сигнал/шум для боковых 1 и центрального 2 КИЗ при интенсивностной стереофонии ($B=1,8$ м; $2\psi=60^\circ$)

величины K для всех КИЗ, однако для боковых виртуальных источников рис. 4.17, кривая 1, эта величина растет значительно быстрее. Относительное изменение этой величины ($K'_{\Delta L}$), определяемое выражением (4.53) и характеризующее изменение условий разделения сигналов слушателем, показывает, что с увеличением ΔL должно наблюдаться улучшение условий для восприятия всех звуковых образов (рис. 4.18). Здесь по оси ординат отложены значения $K'_{\Delta L}$, вычисленные по выражению (4.53) и выраженные в децибелах для боковых (кривая 1) и центрального (кривая 2) КИЗ; по оси абсцисс — разность уровней ΔL , дБ, канальных сигналов, формирующих боковые речевые источники стереопанорамы. Нетрудно видеть (см. рис. 4.18), что для боковых источников величина $K'_{\Delta L}$ растет быстрее. Это создает неодинаковые условия для выделения слушателем звучаний боковых и центрального источников: должно наблюдаться с введением ΔL

быстрое улучшение разборчивости боковых КИЗ при фактически неизменном качестве восприятия центрального речевого источника. Последнее должно восприниматься субъективно как «провал середины». Заметим, что результаты выполненных ранее артикуляционных испытаний (см. рис. 4.1), полностью подтверждают качественно это предположение.

Сопоставим теперь количественно результаты проведенных артикуляционных исследований (см. рис. 4.1) с данными по изменению коэффициента $K'_{\Delta L}$. При этом следует иметь в виду, что искать их непосредственную связь нецелесообразно потому, что разные виды артикуляции (фразовая, словесная, слоговая и т. д.) зависят друг от друга нелинейно. Имеет смысл от величины артикуляции перейти к отношению сигнал/помеха и лишь это последнее сопоставить с значением коэффициента $K'_{\Delta L}$. Для этого воспользуемся семейством экспериментально найденных зависимостей слоговой разборчивости (S_p) от уровня речи L_p , т. е. $S_p = f(L_p)$ [27, 47], полученных при различных уровнях ($L_{ш}$) маскирующего белого шума.

Зная воспринимаемый уровень выделяемого слушателем источника звука (при проведении субъективных и объективных испытаний эта величина для каждого речевого источника составляла 80 дБ) и величину его слоговой разборчивости при $\Delta L = 0$, можно из упомянутых выше зависимостей определить уровень эквивалентного шума, оказывающего такое же маскирующее действие на полезный речевой источник звука, как и два остальных одновременно воспринимаемых с ним КИЗ. Теперь нетрудно определить отношение сигнал/помеха при $\Delta L = 0$:

$$10 \lg K_{\Delta L=0} = (L_p)_{\Delta L=0} - (L_{ш})_{\Delta L=0}. \quad (4.57)$$

Тогда аналогично при $\Delta L \neq 0$

$$10 \lg K_{\Delta L \neq 0} = (L_p)_{\Delta L \neq 0} - (L_{ш})_{\Delta L \neq 0}, \quad (4.58)$$

где, очевидно, величина $(L_{ш})_{\Delta L \neq 0}$ может быть найдена как

$$(L_{ш})_{\Delta L \neq 0} = (L_{ш})_{\Delta L=0} - 10 \lg \frac{K_{\Delta L \neq 0}}{K_{\Delta L=0}} = (L_{ш})_{\Delta L=0} - 10 \lg K'_{\Delta L}. \quad (4.59)$$

Из изложенного следует, что разборчивость речевого КИЗ стереопанорамы, маскируемого двумя другими виртуальными источниками, может быть найдена следующим образом:

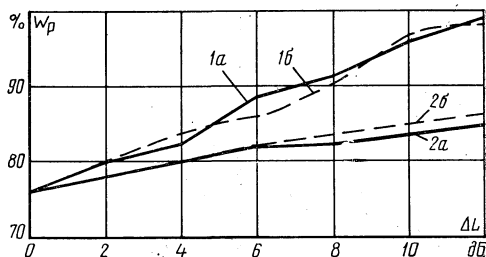
а) сначала с помощью выражений (4.45) и (4.46) определяется величина коэффициента K ;

б) затем по ф-ле (4.59) вычисляется уровень эквивалентного маскирующего шума $(L_{ш})_{\Delta L \neq 0}$ при известных значениях $(L_{ш})_{\Delta L = 0}$ и $(L_p)_{\Delta L = 0}$;

в) и, наконец, из кривых [47]-выражающих зависимость слоговой разборчивости от уровня речи и шума при известном уровне выделяемого речевого источника

Рис. 4.19. Экспериментальные и теоретические зависимости разборчивости речевых источников пространственной панорамы от интенсивностной разности сигналов, формирующих боковые КИЗ:

$B=1,8$ м; $\psi=60^\circ$; — — — теоретические и — — — экспериментальные кривые



и найденной величине эквивалентного маскирующего шума $(L_{ш})_{\Delta L \neq 0}$ (4.59), определяется его слоговая разборчивость S_p , %.

Заметим, что известные из работ [27, 47] взаимосвязи между различными видами артикуляции позволяют при известной слоговой разборчивости S_p определить, в частности, словесную разборчивость W_p .

Полученные таким образом результаты для боковых (кривая 1б) и центрального (кривая 2б) речевых кажущихся источников звука в зависимости от ΔL приведены на рис. 4.19, где по оси ординат отложена величина словесной разборчивости (W_p), %. Расхождение данных, полученных объективным (кривые б) и субъективным (кривые а) методами, не превышает 10%. Последнее свидетельствует о том, что модель корреляционного пеленгования и критерий (4.46) могут быть использованы для оценки способности слушателя разделять изоморфные сигналы при двухканальной звукопередаче. Очевидно, что условия разделимос-

ти таких сигналов будут одинаковыми, если для каждого из них выполняется условие

$$K_1 = K_2 = K_3 = \dots = K_n, \quad (4.60)$$

где K_1, K_2, \dots, K_n — вычисленные по ф-ле (4.46) отношения сигнал/помеха для пар сигналов, формирующих каждый из n источников стереопанорамы.

Этот вывод подтверждается также тем, что расхождение величин K , найденных экспериментальным путем для каждого из воспроизводимых сигналов при условии одинаковой прозрачности (артикуляции) формируемых ими звуковых образов и постоянной величине введенной интенсивностной разности, не превышает

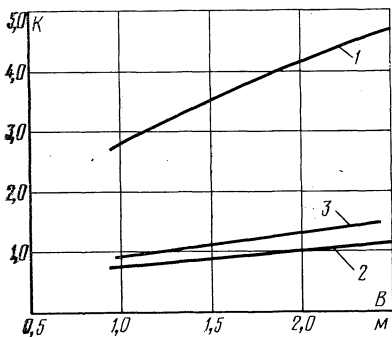


Рис. 4.20. Влияние размера базы на величину отношения сигнал/помеха для боковых 1 и центрального 2 КИЗ при интенсивностной стереофонии ($\Delta L = 8$ дБ; $x = 0$; $y = 1,8$ м)

5—10%. Результаты вычислений коэффициентов K (4.46) и $K'_{\Delta L}$ (4.53) и (4.46) для случая, когда выполняется условие (4.60), представлены графически зависимостями β на рис. 4.17 и 4.18. Введение ΔL повышает разборчивость речевых источников стереопанорамы. Влияние величины базы B , м, на изменение отношения сигнал/помеха K (4.46) для боковых (кривая 1) и центрального (кривая 2) речевых источников стереопанорамы показано на рис. 4.20. Измерения функции локализации ($r'_{\text{лок}}$) проведены при расположении входного поворотного устройства корреляционного пеленгатора на оси симметрии громкоговорителей при удалении $y = 1,8$ м для баз 0,8; 1,2, 1,8, 2,4 м. При этом величина введенной интенсивностной разности для сигналов, формирующих центральный звуковой образ, составляла 0 дБ, в то время как для пар сигналов боковых источников величины ΔL были выбраны равными 10 дБ и отличались только знаком. Характер изме-

нения этих кривых (см. рис. 4.20) показывает, что с увеличением расстояния между громкоговорителями (при неизменных параметрах воспроизводимых сигналов) должна ухудшаться прозрачность звучания центрального источника звука. Это явление ощущается слушателем как «провал середины». Иными словами, для каждой базы существует свое оптимальное соотношение громкостей (баланс уровней) кажущихся звуковых образов, соответствующее наилучшей прозрачности звучания стереопанорамы в целом. Кривая 3 на рис. 4.20 получена при выполнении именно этого условия (4.60). Увеличение размера базы приводит к росту величины K и, следовательно, к улучшению условий для выделения звуковых образов. Этот результат вполне понятен, так как при этом возрастает угловое расстояние между источниками стереопанорамы, т. е. их разнесение в пространстве.

Воспроизведение стереосигнала в комнате радиослушателя, строго говоря, должно производиться при том же самом расстоянии между громкоговорителями, что и его формирование, тогда не будет нарушен задуманный звукорежиссером баланс громкостей в звучании отдельных элементов стереопанорамы. С этой точки зрения формирование стереосигнала следует производить при значении $B \approx 2,4$ м. В этом случае баланс уровней будет незначительно нарушен для малых баз воспроизведения ($B < 1,8$ м). Кроме того, восприятие середины будет оставаться еще достаточно хорошим и при больших базах ($B > 3,0$ м), которые в условиях обычной жилой комнаты могут быть реализованы значительно реже.

Заканчивая рассмотрение теоретических и экспериментальных данных, полученных к настоящему времени при исследовании механизмов повышенной разделительности сигналов при стереовоспроизведении, перечислим те основные выводы, которые вытекают из приведенного в этой главе материала.

1. Предложена и экспериментально подтверждена гипотеза, объясняющая причины повышенной разделительности сигналов при стереофонической передаче по сравнению с монофонической.

2. Рассмотрены математические модели бинаурального освобождения от маскировки, показаны возможности их применения для оценки влияния пространственной локализации источников звука стереопанорамы

на изменение условий разделимости стереофонических сигналов; для оценки степени пригодности каждой из этих моделей проведено сопоставление результатов, полученных путем вычислений и методом субъективно-статистических экспертиз.

3. Показано, что появляющаяся при двухканальной звукопередаче возможность разделения звуковых образов по направлению приводит к уменьшению их взаимной маскировки и в конечном итоге к повышению прозрачности звучания пространственной панорамы в целом. При этом увеличение отношения сигнал/помеха K для выделяемого слушателем звукового образа достигается за счет особенностей процесса переработки информации в слуховой системе.

4. Теоретическим путем исследовано влияние пространственного разнесения кажущихся источников звука стереопанорамы и величины базы громкоговорителей системы воспроизведения на изменение условий разделимости соответствующих этим источникам сигналов. Выполненные расчеты подтверждены данными экспериментальных исследований. При этом установлено:

а) при $\Delta L=0$ и $\Delta \tau=0$ для сигналов, формирующих отдельные источники звука пространственной панорамы, отношение сигнал/помеха K для каждого из них минимально и уменьшается с ростом числа источников звука. В этом случае слушатель локализует звуковые образы в одной точке (что эквивалентно монофонической звукопередаче), прозрачность звучания каждого из них одинакова и минимальна по величине;

б) пространственное разнесение звуковых образов ($\Delta L \neq 0$, $\Delta \tau \neq 0$ —этот случай соответствует стереофонической звукопередаче) вызывает увеличение значений K для всех звуковых образов. Однако для боковых источников эта величина растет значительно быстрее, что создает неодинаковые условия для выделения слушателем звучаний центрального и боковых образов и воспринимается субъективно как «провал середины»;

в) прозрачность звучания n отдельных источников звука, составляющих пространственную панораму и обладающих одинаковым по тембру звучанием, будет наилучшей, если $K_1=K_2=\dots=K_n$. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы общий уровень сигналов, составляющих звучание отдельных звуковых образов, возрастал при перемещении последних к «центру» базы;

г) для каждой базы существует свое оптимальное соотношение громкостей (или так называемый баланс уровней) кажущихся звуковых образов, соответствующее наилучшей прозрачности звучания стереопанорамы в целом.

5. Разработан метод, позволяющий использовать для оценки условий разделимости стереофонических сигналов широко применяемый в настоящее время корреляционный пеленгатор. Один и тот же прибор может быть использован как для объективной оценки местоположения КИЗ на линии базы стереосистемы и **величины**, обеспечиваемой при этом зоны стереовосприятия, так и для объективной оценки условий разделения сигналов слушателем.

6. И, наконец, результаты, полученные здесь при использовании шумового или речевого испытательных сигналов могут быть распространены и на вещательные сигналы других типов, для которых качественно картина остается той же, но могут быть те или иные количественные отклонения. Речь идет о вещательных сигналах, обладающих близким по тембру и характеру исполнения звучанием. Если же пространственная звуковая панорама составлена из звуковых образов, резко отличающихся по тембру и характеру исполнения, то возможности для выделения звучаний каждого из них могут быть достаточно хорошими даже при значительном отклонении величин K воспроизводимых сигналов от оптимального условия $K_1 = K_2 = \dots = K_n$.

Г л а в а 5

Слуховое восприятие реверберационного процесса при двухканальной стереофонии

5.1. Временные и корреляционные структуры ревербирующих сигналов

При электроакустической передаче на микрофон, находящийся в первичном помещении (концертный зал, студия), воздействуют звуковые волны, непосредственно исходящие от источника звука (прямой звук) и большое число волн, отраженных от поверхностей этого помещения (отзвуки). Последние образуют реверберацион-

ный процесс первичного помещения и отличаются от прямого звука по уровню, спектральному составу, времени и направлению прихода.

Очевидно, что реверберирующий сигнал, воспринятый микрофоном и передаваемый при электроакустической передаче из первичного помещения во вторичное, аналитически можно представить в виде

$$f(\xi) = \sum_{i=0}^k a K_{\tau_i} \beta_i \varphi(\xi - \tau_i), \quad (5.1)$$

где a и $\varphi(\xi)$ — соответственно амплитуда и функция времени сигнала, излучаемого источником звуковых колебаний; K_{τ_i} — коэффициент, учитывающий частотозависимое затухание звука в воздухе с расстоянием и полярную характеристику микрофона; β_i — общий коэффициент ослабления i -го отзвука при отражениях от поверхностей первичного помещения; τ_i — время запаздывания сигнала i -го отзвука по отношению к сигналу прямого звука; k — число отзвуков.

Заметим, что значения величин K_{τ_i} , β_i , τ_i могут быть рассчитаны с помощью следующих выражений:

$$K_{\tau_i} = \frac{\mathcal{D}(\psi_i)}{l_i} e^{\frac{-\mu l_i}{2}}; \quad \beta_i = \beta^n; \quad \tau_i = \frac{l_i - l_0}{c}. \quad (5.2)$$

Здесь $\mathcal{D}(\psi_i)$ — характеристика направленности микрофона; ψ_i — угол между акустической осью микрофона и направлением прихода отзвука; l_i — общая длина пути, пройденного звуковой волной i -го отзвука от источника звука до микрофона; l_0 — кратчайшее расстояние от источника звука до микрофона; μ — частотозависимый показатель затухания звука в воздухе, равный обратной величине пути, на котором амплитуда излучаемого сигнала уменьшается в \sqrt{l} раз; β — коэффициент отражения звуковой волны от поверхности студии; n — число отражений i -го отзвука. Для сигнала прямого звука величина $n=0$ и коэффициент $\beta_0=1$.

Величина μ зависит от температуры и в особенности от влажности воздуха и возрастает с увеличением частоты f сигнала. По данным [55] зависимость показателя μ , $1/\mu$, от частоты определяется как

$$\mu = 5,142 \cdot 10^{-4} f^{1,71}. \quad (5.3)$$

Значение коэффициента β определяется по формуле [55]:

$$\beta = \exp \left[\frac{4T \mu v - 0,161v}{TQ_{\Sigma}} \right], \quad (5.4)$$

где T — стандартное время реверберации, с; v — объем первичного помещения, м³; Q_{Σ} — общая площадь поверхностей помещения (студии), м².

Геометрические размеры первичного помещения, координаты источника звука и микрофона, форма и ориентация в пространстве характеристики направленности последнего и величина коэффициента отражения или значения величин T , v и Q_{Σ} обычно известны. Поэтому не трудно сначала рассчитать на основе геометрических представлений значения путей l_0 и l_i , пройденных звуковыми волнами как прямого звука, так и каждого из отзвуков, и затем, используя выражения

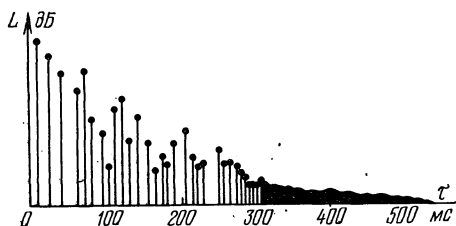


Рис. 5.1. Пример временной структуры ревербирующего сигнала

(5.2) — (5.4), найти времена запаздывания τ_i и уровни сигналов отзвуков, составляющих ревербирующее продолжение сигнала прямого звука. Явление резонансной избирательности, т. е. подчеркивание отдельных компонент спектра сигнала за счет резонансов воздушного объема, может наблюдаться лишь в достаточно малых помещениях, да и то в области низших частот.

Типичная картина временной структуры ревербирующего сигнала для реальных помещений как прямоугольной, так и непрямоугольной форм представлена на рис. 5.1 [77, 28]. Отметим следующие общие особенности, присущие таким сигналам:

в начальной стадии процесса временная структура ревербирующего сигнала дискретна; с увеличением

времени запаздывания отраженных сигналов их количество возрастает, а временные интервалы между ними уменьшаются;

уровень отдельных отзвуков с течением времени постепенно уменьшается, причем в реальных помещениях этот процесс носит флуктуационный характер.

Итак, реверберирующие сигналы, передаваемые по линии звукопередачи из первичного помещения во вторичное, содержат дискретные отражения (несут информацию о геометрических размерах помещения, его объеме) и так называемый диффузный звук. Последний определяет так называемую «гулкость» помещения.

При воздействии реверберирующего сигнала на орган слуха необходимо учитывать, что [55]:

каждый из сигналов — отзвуков, составляющих реверберационный процесс, взвешивается посредством весовой функции $h(-t)$, характеризующей реакцию слуха на импульсное возбуждение;

на слуховое восприятие сигнала каждого i -го отзвука оказывают влияние сигналы более ранних отзвуков, последние имеют тем меньшее значение, чем более они удалены в прошлое; реакцию слуха на взвешенный сигнал каждого более раннего отзвука при восприятии сигнала i -го отзвука можно охарактеризовать значением функции «веса» $m(-\tau)$, где τ — текущее время реверберационного процесса;

преобразование реверберирующего сигнала в слуховой системе может происходить только в области известных прошедших величин, ибо характер сигналов в будущем не известен слушателям.

Таким образом, сигнал $f_t(\xi, \tau)$, формирующий слуховое ощущение в момент времени τ восприятия реверберационного процесса первичного помещения:

$$f_t(\xi, \tau) = \sum_{i=0}^k a_i \varphi(\xi - \tau_i) h[t - (\xi - \tau_i)] m(\tau_i - \tau), \quad \tau_i < \tau, \quad (5.5)$$

где $a_i = aK_{\tau_i} \beta_i$; t — текущее время сигнала $f(\xi)$; τ — текущее время реверберационного процесса; $h(-t)$ и $m(-\tau)$ — две разные записи (удобные для дальнейшего изложения) одной и той же весовой функции, характеризующей «память» слуха.

Взвешивание непрерывного сигнала $\varphi(\xi)$ для момента времени t показано на рис. 5.2. Заметим, что подхо-

дящей весовой функцией $h(-t)$ или $m(-\tau)$ является экспонента вида

$$\left. \begin{aligned} h(t-\xi) &= \frac{1}{T} e^{-\frac{t-\xi}{T}} \text{ при } \xi \leq t; \\ m(\tau_i - \tau) &= \frac{1}{T} e^{-\frac{\tau_i - \tau}{T}} \text{ при } \tau \leq \tau_i. \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

Здесь $h(t-\xi) = 0$ при $\xi > t$ и $m(\tau_i - \tau) = 0$, если $\tau > \tau_i$. T — время, характеризующее длительность «памяти» слуховой системы. Эта величина по данным ряда опубликованных работ составляет 25—30 мс.

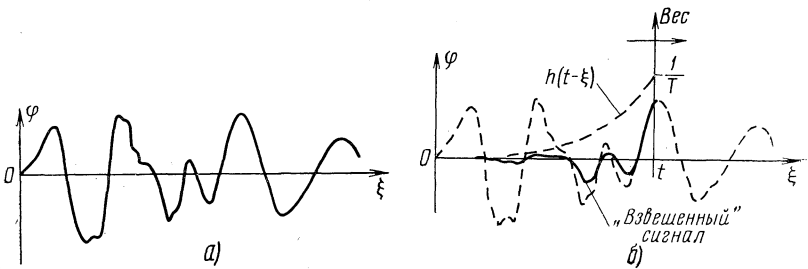


Рис. 5.2. Взвешивание непрерывного сигнала $\varphi(\xi)$ посредством весовой функции $h(t-\xi)$ для произвольного момента времени t

Принимая во внимание корреляционную теорию слуха, найдем кратковременную корреляционную функцию сигнала $f_t(\xi, \tau)$. По определению имеем

$$\begin{aligned} r_t(\tau, \lambda) &= \int_{-\infty}^t \sum_{i=0}^k a_i \varphi(\xi - \tau_i) h[t - (\xi - \tau_i)] m(\tau_i - \tau) \times \\ &\times \sum_{i=0}^k a_i \varphi(\xi - \tau_i - \lambda) h[t - (\xi - \tau_i - \lambda)] m(\tau_i - \tau) d\xi = \\ &= \int_{-\infty}^t \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k a_i a_j m(\tau_i - \tau) m(\tau_j - \tau) \varphi(\xi - \tau_i) h[t - (\xi - \tau_i)] \times \\ &\times \varphi(\xi - \tau_i - \lambda) h[t - (\xi - \tau_j - \lambda)] d\xi, \quad \tau_i < \tau \text{ и } \tau_j < \tau. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Введем обозначения:

$$\tau_i + \Delta\tau_{ij} = \tau_j; \quad \Delta\tau_{ij} = \tau_j - \tau_i. \quad (5.8)$$

Произведем замену переменных:

$$\xi - \tau_i = t_1; \quad \xi - \tau_i - \lambda = \xi - \tau_i - \Delta\tau_{ij} - \lambda = t_1 - (\Delta\tau_{ij} + \lambda). \quad (5.9)$$

Тогда выражение (5.7) примет вид

$$\begin{aligned} r_t(\tau, \lambda) &= \int_{-\infty}^t \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k a^2 K_{\tau_i} K_{\tau_j} \beta_i \beta_j m(\tau_i - \tau) m(\tau_j - \tau) \times \\ &\times \varphi(t_1) h(t - t_1) \varphi[t_1 - (\Delta\tau_{ij} + \lambda)] h[t - t_1 + \Delta\tau_{ij} + \lambda] dt_1 = \\ &= \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k K_{\tau_i} K_{\tau_j} m(\tau_i - \tau) m(\tau_j - \tau) \beta_i \beta_j r_t(\Delta\tau_{ij} + \lambda), \\ \tau_i < \tau \text{ и } \tau_j < \tau, \end{aligned} \quad (5.10)$$

причем

$$\begin{aligned} r_t(\Delta\tau_{ij} + \lambda) &= \int_{-\infty}^t a^2 \varphi(t_1) h(t - t_1) \varphi[t_1 - (\Delta\tau_{ij} + \lambda)] \times \\ &\times h[t - t_1 + \Delta\tau_{ij} + \lambda] dt_1 \end{aligned} \quad (5.11)$$

представляет собой найденную с учетом памяти слуха кратковременную функцию корреляции сигнала, излучаемого источником звуковых колебаний.

Используя дельта-функцию и вводя обозначения

$$\left. \begin{aligned} \tau_i + \Delta\tau_{ij} &= \tau_j; \quad \tau_i - \tau = -t; \\ \tau_j - \tau &= \tau_i - (\tau - \Delta\tau_{ij}); \quad \tau_j - \tau = -t + \Delta\tau_{ij}, \end{aligned} \right\} \quad (5.12)$$

представим выражение (5.10) в виде

$$\begin{aligned} r_t(\tau, \lambda) &= \int_{-\infty}^{\tau} \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k r_t(\Delta\tau_{ij} + \lambda) K_{\tau_i} K_{\tau_j} \beta_i \beta_j m(-t) \times \\ &\times \delta(t) m(-t + \Delta\tau_{ij}) \delta(t - \Delta\tau_{ij}), \quad \tau_i < \tau \text{ и } \tau_j < \tau. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Рассматривая выражение (5.13), нетрудно видеть, что

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{\tau} K_{\tau_i} K_{\tau_j} \beta_i \beta_j m(-\tau) \delta(\tau) m(-\tau + \Delta\tau_{ij}) \delta(\tau - \Delta\tau_{ij}) d\tau = \\ &= r_{\tau}(\Delta\tau_{ij}) \end{aligned} \quad (5.14)$$

— не что иное, как кратковременная функция корреляции для i -го и j -го отзвуков импульсного отклика первичного помещения:

$$h_0(\tau) = \sum_{i=0}^k K_{\tau_i} \beta_i m(\tau_i - \tau) \delta(\tau - \tau_i), \quad (5.15)$$

записанного с учетом «памяти» слуха.

Используя вышеизложенное, окончательно получим

$$r_t(\tau, \lambda) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k r_{\tau}(\Delta\tau_{ij}) r_t(\Delta\tau_{ij} + \lambda), \quad \tau_i < \tau \text{ и } \tau_j < \tau. \quad (5.16)$$

Из (5.16) нетрудно видеть, что влияние первичного помещения характеризуется кратковременной функцией корреляции его импульсного отклика. Последняя с учетом выражений (5.14), (5.15) и (5.16) может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} r_0(\tau) &= \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k r_{\tau}(\Delta\tau_{ij}) = \sum_{i=0}^k K_{\tau_i}^2 \beta_i^2 m^2(\tau_i - \tau) \delta(\tau) + \\ &+ \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^k \sum_{j=0}^k K_{\tau_i} K_{\tau_j} \beta_i \beta_j m(\tau_i - \tau) m(\tau_j - \tau) \delta(\tau - \Delta\tau_{ij}), \\ &\tau_i < \tau \text{ и } \tau_j < \tau. \end{aligned} \quad (5.17)$$

Это выражение записано также с учетом «памяти» слуха.

Следует заметить, что выражение (5.16) не учитывает одновременно воздействующий на слушателя реверберационный процесс жилого (вторичного) помещения, так как последний вследствие малой длительности несущественно влияет на слуховое восприятие реверберационного процесса, передаваемого из первичного помещения.

Очевидно из (5.17), что аналитический метод расчета кратковременных функций корреляции импульсных откликов первичного помещения весьма громоздок и трудоемок. Поэтому имеет смысл для получения таких функций, характеризующих, как было показано выше, акустические особенности помещения, воспользоваться экспериментальным методом, предложенным в [102], несколько изменив при этом (применительно к данным условиям) структурную схему установки. Последняя приведена на рис. 5.3. Она содержит: источник импульсного сигнала *ИИС*, набор полосовых фильтров *ПФ*, оконечный усилитель *ОУ*, громкоговоритель *Гр*, искусственную голову *Г* с микрофонами M_1 и M_2 , микрофон-

ные усилители MU_1 и MU_2 , двухлучевой осциллограф типа С1-16 с синхронизацией ждущей развертки от ИИС, магнитофон M и переключатели $\Pi_1 - \Pi_4$.

Для получения кратковременной функции корреляции импульсного отклика помещения необходимо сначала записать (последовательно во времени) реверберационные процессы сигналов, воспринятых микрофонами

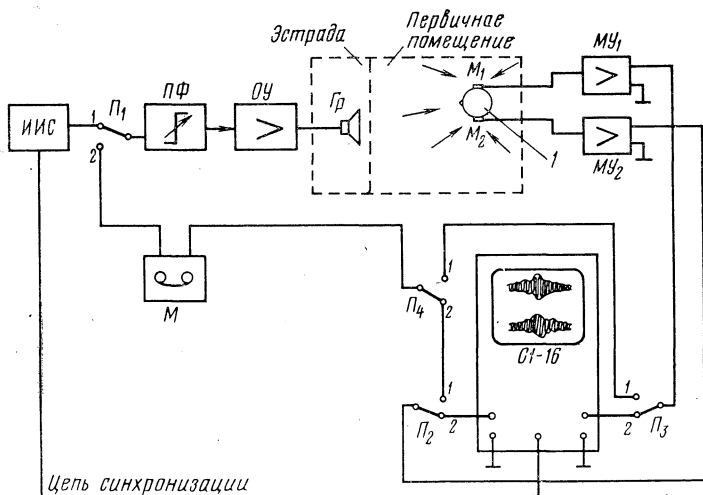


Рис. 5.3. Экспериментальная установка для наблюдения и фотографирования кратковременных функций корреляции реверберирующих сигналов

M_1 и M_2 , на магнитную ленту. При этом переключатели Π_2 и Π_3 должны быть установлены в положение 1, переключатель Π_4 — в положение 1 (при записи реверберирующего сигнала, воспринятого микрофоном M_1) и в положение 2 (при записи импульсного отклика помещения, воспринятого микрофоном M_2). Затем переключатели Π_1 , Π_2 и Π_3 устанавливаются в положение 2 (положение переключателя Π_4 любое), а ранее записанные реверберирующие сигналы воспроизводятся с помощью магнитофона при движении ленты в обратном направлении. При этом на экране двухлучевого осциллографа последовательно во времени экспериментатор наблюдает кратковременные функции корреляции импульсных откликов, воспринятых соответственно микрофонами M_1 и M_2 .

С помощью этой установки (см. рис. 5.3) было получено и затем исследовано в общей сложности свыше 100 коррелограмм импульсных откликов при разном расположении искусственной головы с микрофонами и источника импульсного сигнала в первичном помещении. В качестве последних использовались актовый зал ЛЭИС им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, а также большой

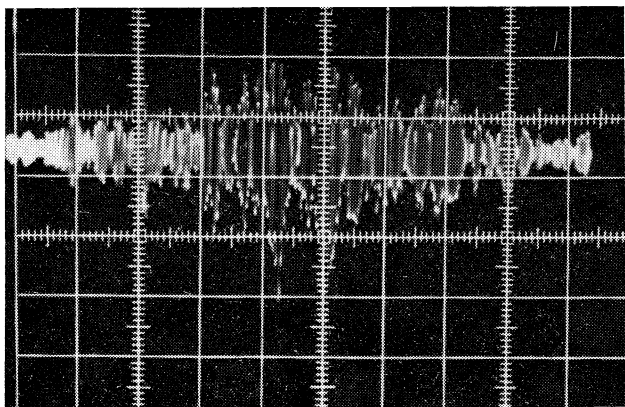


Рис. 5.4. Кратковременная функция корреляции реверберационного процесса первичного помещения

зал для прослушивания ВНИИ РПА. Возбуждение первичного помещения производилось прямоугольным импульсом длительностью не более 2 мс. В качестве примера на рис. 5.4 представлена фотография одной из наиболее типичных кратковременных функций корреляции реверберационного процесса, полученных при выполнении этих исследований. Здесь по оси абсцисс отложено текущее время τ , мс, реверберационного процесса, а по оси ординат — значения кратковременной функции корреляции.

Результаты анализа структуры реверберирующих сигналов, выполненного изложенным выше корреляционным методом с учетом особенностей их обработки механизмом локализации органа слуха, могут быть кратко сформулированы следующим образом:

1. При любом расположении излучателя и приемника звука в первичном помещении кратковременная функция корреляции его импульсного отклика имеет

множество энергетических пиков, отличающихся как по уровню, так и по времени поступления к слушателю.

2. Флуктуационный характер спадаания звуковой энергии реверберирующих сигналов позволяет рассматривать последние, как совокупность аperiodических и периодических ограждений (отзвуков). Отзвуки, приходящие аperiodически, образуют так называемый реверберационный фон (плавно спадающий по уровню) и воспринимаются слитно. Периодические отражения образуют пики реверберирующего сигнала, различным образом распределенные по оси текущего времени τ , и, как будет показано далее, весьма часто могут восприниматься отдельно.

3. Кратковременные функции корреляции реверберационных процессов, воспринимаемых левым (микрофон M_1) и правым (микрофон M_2) ухом, всегда различны.

5.2. Восприятие реверберирующих сигналов механизмом локализации

Для большей наглядности дальнейшего изложения представим схематически (рис. 5.5) кратковременную функцию корреляции реверберирующего сигнала при одноканальной (монофонической) звукопередаче. Оче-

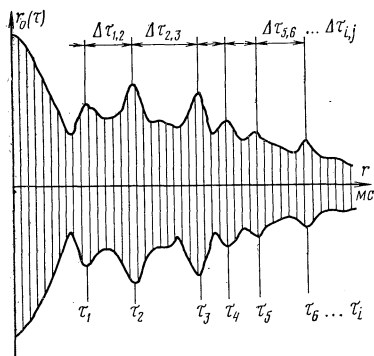


Рис. 5.5. Схематическое представление кратковременной функции корреляции реверберирующего сигнала при одноканальной звукопередаче

видно можно предположить, что разные группы периодических отражений, отличающихся периодом следования и положением на оси времени, составляют при воспроизведении такого сигнала во вторичном помещении отзвуки высокого уровня, несущие информацию об акустических свойствах первичного помещения. Причем

если разница во времени ($\Delta\tau_{1,2}$; $\Delta\tau_{2,3}$; ...; $\Delta\tau_{i,j}$ на рис. 5.5) поступления к слушателю соседних пиков кратковременной функции корреляции меньше минимального значения временной разности ($\Delta\tau_p$), соответствующего раздельному восприятию групп сигналов, составляющих соседние пики, т. е., $\Delta\tau_{i,j} < \Delta\tau_p$, то эти так называемые отзвуки высокого уровня воспринимаются слушателем слитно. При $\Delta\tau_{i,j} > \Delta\tau_p$ они воспринимаются раздельно. Значения $\Delta\tau_p$ для некоторых типов вещательных сигналов были приведены в гл. 2.

Измерение временных интервалов между соседними пиками кратковременной функции корреляции реальных реверберационных процессов показало, что условие раздельного восприятия слушателем отдельных частей реверберирующего сигнала выполняется достаточно часто. Отсюда следует, что при окончательной обработке реверберирующего сигнала в высших нервных центрах, т. е. при превращении этого сигнала в ощущения, образуется ряд раздельно воспринимаемых вторичных звуковых образов. Последние определяют слуховое восприятие акустических особенностей первичного помещения.

Очевидно, что различия в расположении, форме и ориентации в пространстве характеристик направленности микрофонов левого и правого каналов при стереофонической звукопередаче приводят к тому, что временные структуры реверберирующих сигналов, передаваемых по этим каналам, неодинаковы. Последнее является причиной того, что величина интенсивностного различия ΔL_τ реверберирующих сигналов стереопары непрерывно меняется (и в широких пределах) как по величине, так и по знаку с изменением текущего времени τ реверберационного процесса в первичном помещении. Типичный пример изменения ΔL_τ от τ для дискретного участка реверберационного процесса приведен на рис. 5.6. Вычисления ΔL_τ выполнены для значений τ , соответствующих моментам прихода сигналов отдельных отзвуков. При этом источник звуковых колебаний излучает равноамплитудный шум в полосе частот от 100 до 1000 Гц. Если теперь формально для каждого значения ΔL_τ определить, например, экспериментальным путем местоположение кажущегося источника звука на линии базы стереосистемы, то получим картину изменения локализации КИЗ, соответствующего отзвукам первичного помещения в процессе спадания звуко-

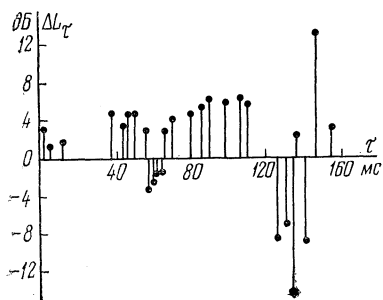


Рис. 5.6. Изменение разностей уровней ревербирующих сигналов в каналах стереосистемы в процессе затухания звуковой энергии в помещении

вой энергии в последнем. Эта зависимость (рис. 5.7) получена без учета временных свойств механизма локализации и свидетельствует лишь о имеющихся предпосылках к смене направлений локализации отзвуков первичного помещения при стереовоспроизведении.

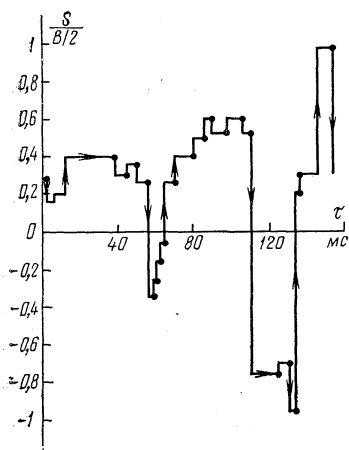


Рис. 5.7. Формальная картина смещения КИЗ при восприятии ревербирующего сигнала (без учета временных характеристик слуха)

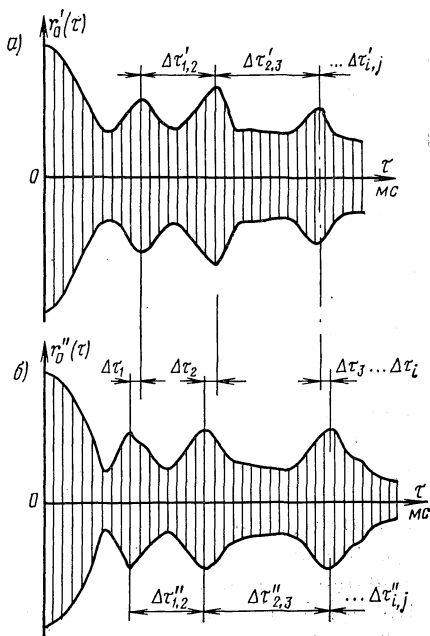


Рис. 5.8. Схематическое представление кратковременных функций корреляции ревербирующих сигналов при двухканальной звукопередаче

Для получения более точных результатов рассмотрим особенности кратковременных функций корреляции реверберирующих сигналов при двухканальной звукопередаче. Эти зависимости схематически представлены на рис. 5.8. Здесь по оси ординат отложены значения кратковременных функций корреляции реверберирующих сигналов левого (рис. 5.8а) и правого (рис. 5.8б) каналов, по оси абсцисс — текущее время (τ , мс) реверберационного процесса. Прежде всего эти коррелограммы отличаются как по уровню, так и во времени поступления к слушателю отдельных групп периодических сигналов, образующих пики реверберационного процесса. Кроме того, вследствие экранирующего действия головы слушателя интерференционные эффекты, обусловленные сложением (взаимодействием) сигналов, излучаемых громкоговорителями левого и правого каналов, оказываются значительно ослабленными. Известно по данным целого ряда ранее опубликованных работ [29], что неравномерность частотных характеристик звукового давления в слуховых проходах ушей слушателя, находящегося в зоне полного стереоэффекта, на частотах выше 500 Гц уменьшается до 3—5 дБ.

Поэтому при двухканальной звукопередаче в значительной степени сохраняется взаимонезависимость двух каналов от входа (микрофоны, установленные в первичном помещении) до выхода (входы слухового анализатора), тем самым обеспечивается различие реверберационных продолжений сигналов, воздействующих на левое и правое ухо слушателя. Последнее приводит к тому, что вторичные КИЗ, образуемые при стереофоническом воспроизведении реверберационного процесса, свойственного первичному помещению, локализируются слушателем в различных точках на линии базы стереосистемы и воспринимаются раздельно, если выполняются условия (см. рис. 5.8):

$$\Delta\tau_i < \Delta\tau_p \text{ и } \Delta\tau_{i,j} > \Delta\tau_p, \quad (5.18)$$

где $\Delta\tau_i$ — разница во времени поступления к слушателю двух соседних пиков реверберационного процесса первичного помещения, воспроизводимого в помещении прослушивания при стереофонической звукопередаче; $\Delta\tau_{i,j}$ — разница во времени поступления к слушателю, находящемуся во вторичном помещении, соседних пар раздельно воспринимаемых отзвуков первичного помещения.

Иными словами, двухканальная стереофоническая система передачи звука способна благодаря особенностям бинаурального слушания имитировать во вторичном помещении пространственность прихода отзвуков, свойственную первичному помещению. Однако эти возможности ограничены углом, под которым видны громкоговорители из точки расположения слушателя.

В отличие от этого, при одноканальной звукопередаче все отзвуки, составляющие реверберационный процесс в первичном помещении, воспринимаются слушателем как исходящие из одного направления (громкоговорителя).

5.3. Восприятие отзвуков первичного помещения при стереовоспроизведении

Подтвердим экспериментальным путем, что пространственное разделение вторичных звуковых образов, возможное при стереовоспроизведении, и лежит в основе более полной передачи акустических особенностей первичного помещения двухканальными системами передачи звука по сравнению с одноканальными.

Для количественной оценки условий слухового выделения одновременно воспроизводимых сигналов прямых звуков и отзвуков может быть использован метод определения порога слышимости. Действительно, если слушатель воспринимает отдельные части реверberирующих сигналов (см., например, энергетические пики на рис. 5.8) в качестве отдельных вторичных КИЗ (отзвуков), локализуемых в разных местах на линии базы громкоговорителей, то он может при выделении того или иного отзвука первичного помещения переключать внимание на разные направления. Это должно привести к кажущемуся уменьшению маxимизирующего действия остальных вторичных источников. Поэтому по величине порога слышимости последних можно судить о способности слушателя к восприятию отдельных частей реверберационного процесса, а значит, и о возможности звуковой системы передавать информацию об акустической атмосфере первичного помещения.

Методом субъективно-статистических экспертиз определим изменение порога слышимости как сигналов прямых звуков, так и отзвуков для самого простого случая, когда каналные сигналы представляют собой сумму только двух компонент (рис. 5.9 и 5.10). Назовем ка-

жущийся источник звука, формируемый при двухканальном воспроизведении парой опережающих компонент (a_1 и a'_1 на рис. 5.9 и 5.10), первичным (основным), а парой запаздывающих сигналов (a_2 и a'_2 на рис. 5.9 и 5.10) — вторичным кажущимся звуковым образом.

Исследования выполним отдельно для интенсивностной (см. рис. 5.9) и временной (рис. 5.10) стереофонии

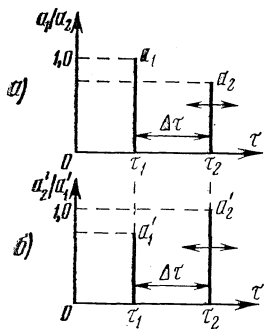


Рис. 5.9. Временные структуры канальных сигналов (интенсивностная стереофония)

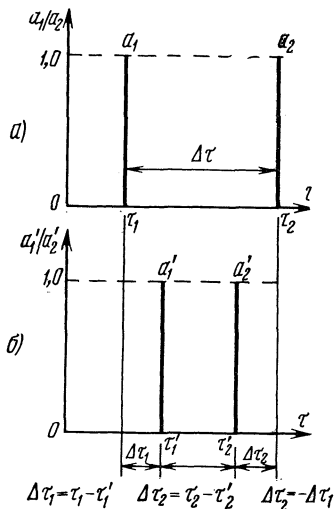


Рис. 5.10. Временные структуры канальных сигналов (временная стереофония)

для случая симметричного расположения слушателя относительно громкоговорителей Gr_1 и Gr_2 при $y=B=2,4$ м. Причем величины вводимых временных $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$ и интенсивностных $[\Delta L_1=20 \lg(a_1/a'_1)]$ и $\Delta L_2=20 \lg(a_2/a'_2)]$ разностей будем для каждого опыта выбирать таким образом, чтобы первичный и вторичный звуковые образы при их поочередном предъявлении слушателю локализовались бы им на равных расстояниях справа и слева от центра базы. Это оказывается возможным, если $\Delta L_1 = -\Delta L_2$ или $\Delta\tau_1 = -\Delta\tau_2$.

Используем для определения порога слышимости первичного или вторичного звуковых образов при их

одновременном предъявлении слушателю методике, описанную на с. 167—168.

При проведении этих исследований источником для синтеза канальных сигналов послужила запись дикторского текста (отрывок женской речи).

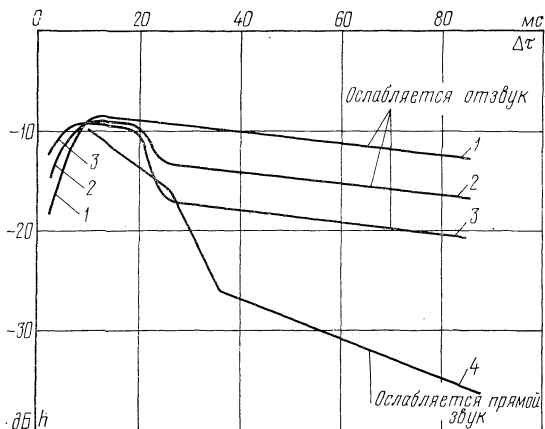


Рис. 5.11. Влияние временных и интенсивностных разностей компонент канальных сигналов на изменение порога слышимости прямого звука и отзвука:

1, 4 — $\Delta L = 0$ дБ; 2 — $\Delta L = 8$ дБ; 3 — $\Delta L = 16$ дБ

Число экспертов выбрано с учетом получения доверительного интервала, равного 1,5 дБ при достоверности 0,99.

Изменение порога слышимости h , дБ, сигналов прямого звука (a_1, a'_1) и отзвука (a_2, a'_2) от величины введенного временного сдвига $\Delta\tau$, мс, между ними при условии, что $\Delta L_1 = \Delta L_2 = 0$ и $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2 = 0$, представлено на рис. 5.11 (кривые 1 и 4). Случай, когда первичный и вторичный звуковые образы при их поочередном предъявлении локализируются в одной точке по центру базы громкоговорителей, эквивалентен монофонической передаче.

Рассмотрим зависимость изменения порога слышимости отзвука (см. рис. 5.11, кривая 1). При малых значениях временных сдвигов ($\Delta\tau < 10$ мс, область устойчивого или почти устойчивого слияния опережающей и задержанной компонент канальных сигналов) наблюдается изменение его порога слышимости от —18—19 дБ

до — 9дБ. Это явление может быть объяснено возрастающей величиной подавления органом слуха запаздывающих сигналов (a_2, a'_2) отзвука. В области неустойчивого слияния ($\Delta\tau > 20$ мс) порог слышимости отзвука понижается с ростом $\Delta\tau$. При этом крутизна наклона зависимости составляет в этой области для речевого сигнала 0,055 дБ/мс.

Несколько иная картина наблюдается при определении порога слышимости сигналов прямого звука (см. рис. 5.11, кривая 4). Уменьшение уровня опережающих сигналов уже при $\Delta\tau > 4 \div 5$ мс приводит практически к отдельному восприятию первичного и вторичного звуковых образов. Поэтому величина порога слышимости прямого звука уменьшается с ростом $\Delta\tau$ значительно быстрее, чем для отзвука. Крутизна наклона полученной зависимости (см. рис. 5.11, кривая 4) составляет уже 0,4—0,5 дБ/мс. При одной и той же величине $\Delta\tau$ чувствительность органа слуха к восприятию опережающих компонент канальных сигналов выше. Это различие проявляется тем сильнее, чем больше величина введенного временного сдвига. Очевидно, что для обоих случаев величина h не может оказаться ниже значения абсолютного порога слышимости. Поэтому при каком-то достаточно большом значении временного сдвига $\Delta\tau$, когда полностью утеряна корреляционная связь между сигналами прямого звука и отзвука, обе зависимости (кривые 1 и 4) должны совпасть.

Аналогичные результаты были получены также для случая одноканальной (монофонической) звукопередачи и установлена полная ее эквивалентность двухканальной при условии изоморфности воспроизводимых сигналов ($\Delta L_1 = \Delta L_2 = 0$ и $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2 = 0$). Отсюда следует, что величина порога слышимости не изменяется при переходе от реальных к кажущимся звуковым образам, если первичные и вторичные источники звука в обоих случаях воспринимаются слушателем (при их поочередном предъявлении) из одного направления.

Теперь перечислим и поясним графически изменения порогов слышимости как первичного, так и вторичного звуковых образов, вызванные введением интенсивностных (ΔL_1 и ΔL_2) или временных ($\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$) разностей для опережающих (a_1 и a'_1) и задержанных (a_2 и a'_2) компонент канальных сигналов (см. рис. 5.9. и 5.10).

Рассмотрим случай чисто интенсивностной стереофонии, т. е. когда $\Delta L = \Delta L_1 = -\Delta L_2$; $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2 = 0$. При ма-

лых временных сдвигах ($\Delta\tau < 4-5$ мс, область устойчивого слияния сигналов) увеличение $\Delta\tau$ при постоянном значении ΔL сопровождается понижением порога слышимости отзвука. Заметим, что при $\Delta\tau = 2,4$ мс (рис. 5.12, кривая 1) изменение величины h составляет порядка -6 дБ. Для несколько больших значений временного сдвига ($3 \div 5$ мс $< \Delta\tau < 15 \div 20$ мс, область почти устойчивого слияния воспроизводимых сигналов) величина

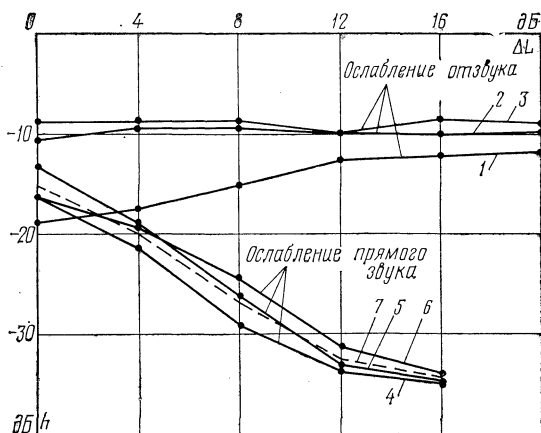


Рис. 5.12. Влияние интенсивностных разностей компонент канальных сигналов на изменение порога слышимости прямого звука и отзвука:

1 — $\Delta\tau = 2,4$ мс; 2, 5 — $\Delta\tau = 18,6$ мс; 3, 4 — $\Delta\tau = 18,6$ мс

на порога слышимости отзвука практически не зависит от величин ΔL и $\Delta\tau$ и составляет величины порядка $-8-10$ дБ (см. рис. 5.12, кривые 2 и 3). Эта область наихудшей (минимальной) чувствительности органа слуха к восприятию запаздывающих сигналов. Заметим, что аналогичная картина наблюдается также и в изменении порога слышимости прямого звука с той лишь разницей, что область устойчивого слияния сигналов при ослаблении опережающих компонент лежит при значениях $\Delta\tau < 3 \div 4$ мс.

В области неустойчивого слияния сигналов ($\Delta\tau > 25$ мс, ослабляются сигналы отзвука) или отдельного восприятия первичного и вторичного звуковых образов ($\Delta\tau > 4 \div 5$ мс, ослабляются сигналы прямого звука) величины порога слышимости как отзвука (см.

рис. 5.11, кривые 2 и 3), так и прямого звука (см. рис. 5.12, кривые 4, 5 и 6) повышаются как с увеличением ΔL , так и с ростом $\Delta\tau$. При этом оказывается, что повышение порога слышимости

$$\Delta h = h_{\Delta L \neq 0} - h_{\Delta L = 0} \text{ при } \Delta\tau = \text{const}, \quad (5.19)$$

связанное с увеличением ΔL , не зависит от величины введенного временного сдвига $\Delta\tau$. Зависимости, показывающие изменение величины Δh , дБ, от ΔL , дБ, представлены графически на рис. 5.13. Нетрудно видеть, что изменение порога слышимости для сигналов прямого

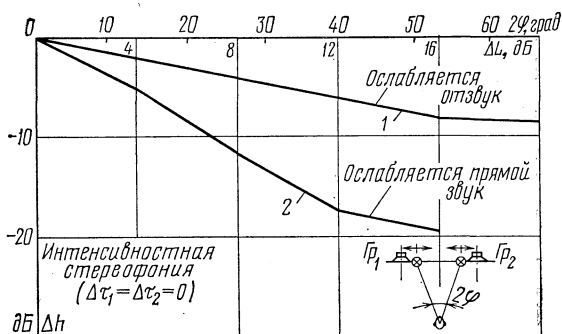


Рис. 5.13. Изменение порога слышимости прямого звука и отзвука в области их раздельного восприятия:

1 — $\Delta\tau > 30$ мс; 2 — усредненная кривая для $\Delta\tau = 9,3; 18,6; 26,3$ мс

звуча (рис. 5.13, кривая 2) происходит значительно быстрее, чем для сигналов отзвука (кривая 1). Это различие проявляется тем резче, чем больше величина ΔL . Согласно выдвинутой гипотезе (см. гл. 4), причина повышения порога слышимости (см. рис. 5.13) может быть связана с появляющейся при этом возможностью пространственного разделения по направлению первичного и вторичного звуковых образов. Последнее должно сопровождаться уменьшением их маскирующего влияния друг на друга. Поэтому на рис. 5.13 по оси абсцисс, кроме значений ΔL , отложена также величина угла 2φ , град, между направлениями на первичный и вторичный кажущиеся звуковые образы из точки расположения слушателя. Как и следовало ожидать, повышение порога слышимости Δh как прямого звука, так и отзвука в области их раздельного или почти раздельного восприя-

тия оказывается тем значительнее, чем на больший угол эти источники звука разнесены в азимутальной плоскости.

Аналогичные исследования, выполненные для временной стереофонии $\Delta L_1 = -\Delta L_2 = 0$, $\Delta \tau_1 = -\Delta \tau_2 \neq 0$ (см. рис. 5.10), показали ее полную эквивалентность интенсивностной, если время запаздывания $\Delta \tau$ сигналов отзвука лежит в области их раздельного восприятия от сигналов прямого звука. В качестве примера на рис. 5.14 приведены индивидуальные кривые экспертов, обозначенные цифрой 3, полученные при определении порога

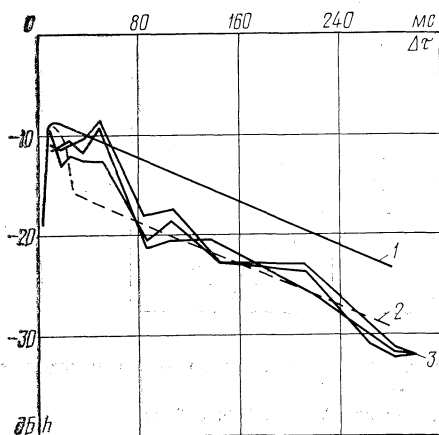


Рис. 5.14. Изменение порога слышимости отзвука при временной стереофонии

слышимости отзвука для случая, когда $\Delta \tau_1 = -\Delta \tau_2 = 0,8$ мс, а $\Delta L = 0$. Здесь же для сравнения (пунктирная кривая 2) показана подобная зависимость для интенсивностной стереофонии ($\Delta L \neq 0$, а $\Delta \tau_1 = -\Delta \tau_2 = 0$) при том же самом расположении первичного и вторичного звуковых образов на линии базы громкоговорителей ($\Delta L = 8$ дБ). Кривая 1 на рис. 5.14 представляет собой изменение порога слышимости сигналов отзвука при условии, если $\Delta L_1 = \Delta L_2 = 0$ дБ и $\Delta \tau_1 = \Delta \tau_2 = 0$ мс. Изложенные выше сведения получены для речевого испытательного сигнала. Для других типов вещательных сигналов картина восприятия качественно не меняется, возникают лишь те или иные количественные изменения.

Результаты этих экспериментальных исследований позволяют утверждать, что локализация вторичных зву-

ковых образов, соответствующих отзвукам первичного помещения, в различных местах на линии базы громкоговорителей приводит к понижению их порогов слышимости. Иначе говоря, уменьшается маскирующее действие отзвуков друг на друга и облегчаются условия для их выделения. Последнее и является причиной более полной передачи акустических особенностей первичного помещения (так называемой «акустической атмосферы») стереофоническими звуковыми системами по сравнению с монофоническими. Отсюда следует, что места прослушивания, для которых пространственные искажения стереопанорама невелики, являются также оптимальными и с точки зрения восприятия акустической обстановки первичного помещения.

5.4. Мгновенный спектр мощности реверберирующего сигнала. Коэффициент интерференционных искажений

Наряду с передачей информации об акустических свойствах первичного помещения реверберационный процесс также обогащает звучание, делает воспринимаемые тембры более разнообразными и правильными.

Рассмотрим частотные свойства реверберирующего сигнала и определим те его характерные особенности, которые играют важную роль в процессе восприятия тембра.

Используя преобразование Фурье, мгновенный спектр амплитуд $G_t(\omega, \tau)$ сигнала $f_t(\xi, \tau)$ (5.5), формирующего слуховое ощущение в момент времени τ реверберационного процесса, можно представить в виде

$$G_t(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^t \sum_{i=0}^k a K_{\tau_i} \beta_i \varphi(\xi - \tau_i) h(t - \xi + \tau_i) \times \\ \times m(\tau_i - \tau) e^{-i\omega\xi} d\xi, \quad \tau_i < \tau. \quad (5.20)$$

Здесь сохранены неизменными обозначения, принятые в выражении (5.5).

Применяя подстановку $\xi - \tau_i = t_1$, имеем

$$G_t(\omega, \tau) = \sum_{i=0}^k K_{\tau_i} \beta_i m(\tau_i - \tau) e^{-i\omega\tau_i} \int_{-\infty}^t a \varphi(t_1) h(t - t_1) \times \\ \times e^{-i\omega t_1} dt_1 = \sum_{i=0}^k K_{\tau_i} \beta_i m(\tau_i - \tau) e^{-i\omega\tau_i} G_t(\omega), \quad \tau_i < \tau, \quad (5.21)$$

где $G_t(\omega)$ — мгновенный спектр амплитуд сигнала $a\varphi(\xi)$, излучаемого источником звуковых колебаний, найденный с учетом памяти слуха $h(-t_1)$.

Применение дельта-функции $\delta(\tau - \tau_i)$ дает возможность представить выражение (5.21) в виде

$$G_t(\omega, \tau) = G_t(\omega) \int_{-\infty}^{\tau} e^{-i\omega\tau} \sum_{i=0}^k K_{\tau_i} \beta_i \delta(\tau - \tau_i) m(\tau_i - \tau) dt, \quad (5.22)$$

$$\tau_i < \tau$$

Заметим, что

$$h_0(\tau) = \sum_{i=0}^k K_{\tau_i} \beta_i \delta(\tau - \tau_i), \quad (5.23)$$

представляет собой импульсный отклик помещения, поэтому окончательно получим

$$G_t(\omega, \tau) = G_t(\omega) \int_{-\infty}^{\tau} h_0(\tau) m(\tau_i - \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau =$$

$$= G_t(\omega) G_{\tau}(\omega); \quad \tau_i < \tau. \quad (5.24)$$

Теперь не представляет труда определить мгновенный спектр мощности $\Psi_t(\omega, \tau)$:

$$\Psi_t(\omega, \tau) = |G_t(\omega, \tau)|^2 = \Psi_t(\omega) \Psi_{\tau}(\omega), \quad \tau_i > \tau, \quad (5.25)$$

где $\Psi_t(\omega)$ — мгновенный спектр мощности сигнала, излучаемого источником звуковых колебаний; $\Psi_{\tau}(\omega)$ — мгновенный спектр мощности импульсного отклика первичного помещения, найденный с учетом памяти слуховой системы, причем

$$\Psi_t(\omega) = |G_t(\omega) G_t^*(\omega)|; \quad (5.26)$$

$$\Psi_{\tau}(\omega) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k K_{\tau_i} K_{\tau_j} \beta_i \beta_j m(\tau_i - \tau) m(\tau_j - \tau) \cos[\omega(\tau_i - \tau_j)],$$

$$\tau_i < \tau \text{ и } \tau_j < \tau. \quad (5.27)$$

Выражения (5.25) — (5.27) позволяют рассчитать мгновенный спектр мощности сигнала, формирующего слуховое ощущение в любой момент времени τ реверберационного процесса, если известны: а) геометрические размеры и акустические характеристики первичного помещения; б) характеристики направленности и расположение микрофонов и источников звука; в) функциональная зависимость, характеризующая память слуха;

г) тип испытательного сигнала и аналитическая запись его временной функции.

Рассматривая выражение (5.25), нетрудно видеть, что влияние первичного помещения характеризуется мгновенным спектром мощности его импульсного отклика. Очевидно, что наличие большого числа повторений звука, воспроизводимого в закрытом помещении, увеличивает время слухового восприятия каждого элемента быстро изменяющегося во времени звукового события и создает тем самым необходимые предпосылки для «тонкого» анализа спектра воспроизводимых сигналов. Напомним [24, 40], что чем больше время анализа, тем выше его точность. Однако использование этой возможности в реальных условиях затрудняется эффектами текущей интерференции в реверберационном сигнале.

По-видимому, информация о тембральных особенностях звучания будет передана тем точнее, чем лучше в каждый момент времени соответствие между огибающими мгновенного спектра мощности реверберирующего сигнала и сигнала, излучаемого источником звуковых колебаний. Иначе говоря, передаваемые тембры воспринимаются наилучшим образом, если огибающая мгновенного спектра мощности импульсного отклика помещения, найденного с учетом памяти слуха, не зависит от частоты при всех возможных значениях τ .

Получим выражение для оценки величины интерференционных искажений, возникающих при слуховом восприятии реверберирующего сигнала. Запишем выражения (5.25) и (5.27) в несколько иной форме:

$$\begin{aligned} \Psi_t(\omega, \tau) &= \Psi'_t(\omega, \tau) + \Psi''_t(\omega, \tau) = \Psi_t(\omega) \Psi'_\tau(\omega) + \\ &+ \Psi_t(\omega) \Psi''_\tau(\omega) = \Psi_t(\omega) \sum_{i=0}^k a_i^2 m^2(\tau_i - \tau) + \\ &+ \Psi_t(\omega) \sum_{i \neq j}^k \sum^k a_i a_j m(\tau_i - \tau) m(\tau_j - \tau) \cos[\omega(\tau_i - \tau_j)], \\ \tau_i < \tau \text{ и } \tau_j < \tau, \end{aligned} \quad (5.28)$$

где $a_i = K_{\tau_i} \beta_i$ и $a_j = K_{\tau_j} \beta_j$. В (5.28) продукты интерференционных искажений содержат вторые слагаемые.

Далее предполагается, что орган слуха обрабатывает реверберирующий сигнал таким образом, чтобы интерференционные искажения были минимальны (оптимальный прием). Последнее утверждение будет выпол-

нено, если для каждого значения τ справедливо условие

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} [\Psi''_{\tau}(\omega) - \Psi''_{\tau}] d\omega = 0, \quad (5.29)$$

причем Ψ''_{τ} — величина постоянная во всем диапазоне воспроизводимых частот и определяется как

$$\Psi''_{\tau} = \frac{1}{\Delta\omega} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \sum_{i \neq j}^k \sum_{i \neq j}^k a_i a_j m(\tau_i - \tau) m(\tau_j - \tau) \cos[\omega(\tau_i - \tau_j)] d\omega, \quad (5.30)$$

$\tau_i < \tau$ и $\tau_j < \tau,$

где ω_1 и ω_2 — соответственно верхняя и нижняя круговые частоты сигнала, излучаемого источником звуковых колебаний.

С учетом вышеизложенного полная мощность продуктов интерференционных искажений реверберирующего сигнала (5.5) может быть представлена как

$$P''_{\tau} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \left| \sum_{i \neq j}^k \sum_{i \neq j}^k a_i a_j m(\tau_i - \tau) m(\tau_j - \tau) \cos[\omega(\tau_i - \tau_j)] - \Psi''_{\tau} \Psi_i(\omega) \right| d\omega, \quad \tau_i < \tau \text{ и } \tau_j < \tau. \quad (5.31)$$

Заметим, что под знаком интеграла в выражении (5.31) введено обозначение модуля. Это сделано потому, что положительные и отрицательные отклонения огибающей мгновенного спектра мощности импульсного отклика помещения от ее оптимального частотонезависимого значения Ψ''_{τ} , найденного из условия (5.29) и (5.30), воспринимаются слушателем как интерференционные искажения, связанные с изменением тембра звучания.

Полная мощность неискаженного сигнала

$$P'_{\tau} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \left[\sum_{i=0}^k a_i^2 m^2(\tau_i - \tau) + \Psi''_{\tau} \right] d\omega, \quad \tau_i < \tau. \quad (5.32)$$

Величиной, оценивающей интерференционные искажения реверберирующего сигнала $f_i(\xi, \tau)$ (5.5), найденной с учетом памяти слуха, может служить отношение мощностей P''_{τ} и P'_{τ} , т. е.

$$\eta'(\tau) = P''_{\tau} / P'_{\tau}. \quad (5.33)$$

Отношение (5.33) назовем коэффициентом интерференционных искажений.

На начальном участке реверберационного процесса, где слуховое ощущение в каждый момент времени t определяется малым числом отзвуков, наиболее заметны эффекты текущей интерференции импульсного отклика помещения, приводящие при неудачном расположении микрофонов и источника звука в первичном помещении к искажениям тембра передаваемого звучания. На завершающем участке реверберационного процесса в каждый момент времени приходит достаточно большое число повторений, различных по уровню и по времени поступления в точку расположения микрофона. Кроме того, слуховая память человека сохраняет еще и более ранние по времени прихода отзвуки. Поэтому суммарное число формирующих слуховое ощущение сигналов импульсного отклика помещения здесь оказывается настолько большим, что эффект текущей интерференции в значительной степени сглаживается. На завершающем участке реверберационного процесса практически имеет место энергетическое суммирование сигналов отзвуков. Поэтому наблюдается хорошее соответствие между огибающими мгновенных спектров мощности $\Psi_t(\omega, \tau)$ и $\Psi_t(\omega)$. В этом случае значение $\eta'(\tau) = 0$. При этом завершающая часть реверберационного процесса определяет восприятие так называемой «гулкости», свойственной первичному помещению.

5.5. Восприятие интерференционных искажений

В § 5.2 было показано, что при окончательной обработке некоррелированных сигналов в высших нервных центрах, т. е. при появлении соответствующих ощущений, число раздельно воспринимаемых звуковых образов равно количеству воздействующих сигналов. При этом интерференционные искажения для каждого из этих слуховых сигналов отсутствуют. В этом случае можно говорить лишь о взаимной маскировке источников звука, составляющих пространственную панораму.

Механизм восприятия коррелированных сигналов значительно сложнее. При этом образуется только один звуковой образ, тембр звучания которого определяется не только спектральными особенностями каждой из компонент канального сигнала, но также существенно зависит от временной структуры последнего.

Напомним, что разность по времени Δt поступления к слушателю сигналов, воспроизводимых левым и пра-

вым громкоговорителями, преобразуется в механизме локализации органа слуха в разность интенсивностей путем ослабления по уровню запаздывающего сигнала. Причем величина этого ослабления m' является не только функцией $\Delta\tau$, но также существенным образом зависит от соотношения уровней воспроизводимых сигналов.

При постоянном значении $\Delta\tau$ величина ослабления запаздывающего сигнала тем значительнее, чем больше уровень опережающего сигнала. Величина m' всегда меньше 1 при $\Delta\tau > 0$ и $m' = 1$ при $\Delta\tau = 0$ [1, 5, 50].

Так как анализ звука и локализация чрезвычайно тесно связаны между собой [40], то, естественно, возникает вопрос, является ли упомянутая выше особенность общим свойством механизмов слуха, в том числе и того, который отвечает за частотный анализ звука и восприятие тембра.

Для ответа на этот вопрос сначала рассмотрим особенность моноурального восприятия слышимых изменений тембра, возникающих при сложении сигнала с его повторением. Пусть на один из входов слухового анализатора воздействует сложный сигнал вида

$$f(t) = a\varphi(t) + a\varphi(t - \Delta\tau). \quad (5.34)$$

Если процесс обработки такого сигнала в сенсорном аппарате слушателя аналогичен тому, который осуществляется в механизме локализации, то слуховые сигналы, определяющие ощущение тембральных особенностей звука, запишутся различным образом, если уменьшается уровень опережающей или задержанной компонент, т. е.

$$f_1(t) = aq_1\varphi(t) + am'_1\varphi(t - \Delta\tau); \quad (5.35)$$

$$f_2(t) = a\varphi(t) + aq_2m'_2\varphi(t - \Delta\tau), \quad (5.36)$$

где q_1 и q_2 — соответственно коэффициенты ослабления опережающего и задержанного сигналов аттенюаторами экспериментальной установки; m'_1 и m'_2 — коэффициенты, учитывающие ослабление задержанного сигнала слуховой системой при условии, что аттенюаторами экспериментальной установки уменьшается величина опережающего или задержанного сигнала.

Спектральные плотности мощности сигналов (5.35) и (5.36) соответственно равны [54]:

$$\Psi_1(f) = [(aq_1)^2 + (am'_1)^2 + 2a^2q_1m'_1\cos(\omega\Delta\tau)]\omega(f). \quad (5.37)$$

$$\Psi_2(f) = [a^2 + (aq_2m_2')^2 + 2a^2q_2m_2' \cos(\omega\Delta\tau)] \omega(f). \quad (5.38)$$

Здесь $\omega(f)$ — спектральная плотность мощности сигнала $\varphi(t)$.

Рассматривая выражения (5.37) и (5.38), нетрудно видеть, что огибающие спектров мощности суммарного сигнала и любой из двух его компонент различны. Это несоответствие огибающих вызвано наличием интерференционных искажений, возникающих при сложении сигнала с его повторением, и воспринимается на слух как изменение тембра звучания.

Используя изложенный выше метод оценки интерференционных искажений (см. § 5.4) и выбрав в качестве компонент, составляющих канальный сигнал (5.34), равноамплитудный шум в полосе частот от f_1 до f_2 , можно соответствующие слуховым сигналам (5.37) и (5.38) коэффициенты интерференционных искажений записать в виде

$$\eta'_1 = \frac{2m_1' q_1 \frac{1}{\Delta f} \int_{f_1}^{f_2} |\cos(\omega\Delta\tau) - c'| df}{(m_1')^2 + q_1^2 + 2q_1 m_1' c'}; \quad (5.39)$$

$$\eta_2 = \frac{2m_2' q_2 \frac{1}{\Delta f} \int_{f_1}^{f_2} |\cos(\omega\Delta\tau) - c'| df}{1 + (q_2 m_2')^2 + 2q_2 m_2' c'}, \quad (5.40)$$

где c' — постоянная, определяемая как

$$c' = \frac{1}{\Delta f} \int_{f_1}^{f_2} \cos(\omega\Delta\tau) df. \quad (5.41)$$

Заметим, что величины η'_1 и η'_2 представляют собой отношение мощности продуктов интерференционных искажений, характеризующей как положительные, так и отрицательные отклонения огибающей спектра мощности слухового сигнала (5.35) и (5.36) от огибающей спектра мощности любой из его компонент, к мощности неискаженного сигнала. Вполне очевидно, что при разных значениях временного сдвига и опережающей и задержанной компонент канального сигнала (5.34) слушатель будет замечать появление интерференционных искажений, соответствующих порогу слышимых изменений

тембра, всегда при одном и том же соотношении этих мощностей.

Таким образом, если величины q_1 и q_2 соответствуют порогу заметности интерференционных искажений канального сигнала (5.34), то справедливо равенство

$$\eta'_1 = \eta'_2 = \eta'_n. \quad (5.42)$$

Отсюда следует, что если при восприятии интерференционных искажений, возникающих при сложении сигнала с его повторением, величина ослабления запаздывающего сигнала зависит не только от значения Δt , но и от соотношения уровней опережающей и задержанной компонент канального сигнала (5.34), т. е. $m'_1 \neq m'_2$, то выполнение равенства (5.42) возможно, когда $q_1 \neq q_2$.

Если же допустить, что величина ослабления запаздывающего сигнала в сенсорном аппарате является только функцией Δt и не зависит от соотношения уровней опережающей и задержанной компонент канального сигнала (5.34), т. е. $m'_1 = m'_2$ (5.35) и (5.36), то справедливо соотношение

$$(q_1/q_2) = (m')^2, \quad (5.43)$$

которое может быть легко получено из (5.39) и (5.40) с учетом равенства (5.42). При этом если величина $m' \neq 1$, то, как следует из (5.43), всегда $q_1 \neq q_2$.

И, наконец, если при восприятии интерференционных искажений ослабление запаздывающей компоненты канального сигнала (5.34) в сенсорном аппарате отсутствует (механизм иной, чем при локализации), т. е. $m'_1 = m'_2 = 1$, то выполнение равенства (5.42) может быть достигнуто только при условии (5.43), когда $q_1 = q_2$.

Значения величин q_1 и q_2 , соответствующих порогу заметности интерференционных искажений канального сигнала (5.34), легко могут быть найдены экспериментально. Сопоставление этих величин дает возможность ответить на вопрос: следует ли учитывать ослабление запаздывающих сигналов при оценке интерференционных искажений.

Прежде чем перейти к описанию результатов эксперимента, остановимся в необходимой степени на методике проведения экспертиз. Слушатель, определяя значения порогов слышимых изменений тембра, имел возможность попеременно прослушать два сигнала, вос-

производимых с помощью электродинамического телефона, — эталонный и оцениваемый. Эталонное звучание формировалось опережающей компонентой канального сигнала (5.34). Переключение сравниваемых по тембру вариантов звучания производилось самим слушателем. Заметим, что с помощью специального потенциометра слушатель изменял (подбирал) уровень эталонного звучания таким образом, чтобы при каждом значении Δt сравнение эталонного и оцениваемого звучаний производилось при условии ощущения их равногромкими. Величины Δt вводились в случайной последовательности (не известной слушателям) и изменялись в пределах от 0 до 5—10 мс. В остальном методика проведения экспертиз по определению слышимых изменений тембра ничем не отличалась от описанной на с. 167.

Число экспертопоказаний выбрано с учетом получения доверительного интервала, равного 1 дБ при достоверности 0,99.

Результаты выполненных исследований показывают, что величина порога слышимых изменений тембра для каждого из выбранных значений Δt не зависит от того, ослабляется ли аттенуатором экспериментальной установки опережающая или задержанная компонента канального сигнала, т. е. найдено, что $q_1 = q_2 = q$. Напомним, что выполнение этого равенства возможно только, если $m'_1 = m'_2 = m' = 1$, причем величина m' и отношение q_1/q_2 связаны зависимостью (5.43). Например, если бы величина $m' = 0,9$, то отношение $q_1/q_2 = 0,81$ и $20 \lg(q_1/q_2) = -1,9$ дБ, т. е. различие порогов q_1 и q_2 при постоянном значении временной разности между компонентами канального сигнала (5.43) должно было бы составлять в этом случае 1,9 дБ. При $m' = 0,8$ различие порогов q_1 и q_2 при постоянном значении Δt равнялось бы уже приблизительно 3,9 дБ. Из приведенных примеров следует, что даже незначительное отличие значений m' от 1 должно при экспериментальных исследованиях вызывать уверенное различие порогов q_1 и q_2 . Заметим, что при наличии тренированных экспертов разница экспертопоказаний в определении величин q_1 и q_2 , соответствующих одному и тому же значению Δt , как правило, не превышает 1 дБ, что соответствует изменению m' в пределах 0,94—1,06.

Кроме того, было установлено, что появление экспертопоказаний, удовлетворяющих условиям $q_1 > q_2$ и $q_1 < q_2$, равновероятно. Данные этих исследований (ус-

редненные по всей совокупности экспертов) представлены на рис. 5.15 и 5.16 (пунктирные кривые). Здесь по оси абсцисс отложены значения временной разности

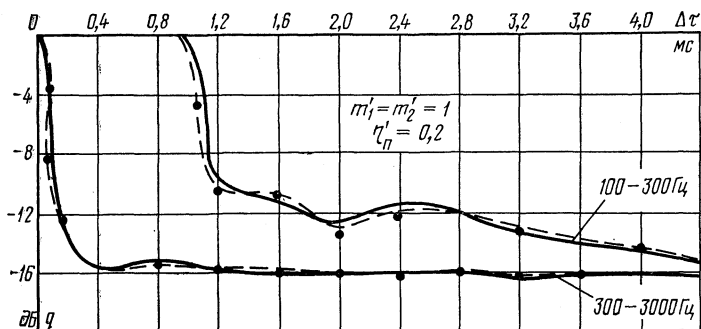


Рис. 5.15. Пороги слышимых изменений тембра для полос равноамплитудного шума при моноуральном восприятии сигнала и его повторения

$\Delta\tau$, мс, между опережающей и задержанной компонентами канального сигнала (5.34), по оси ординат — величины порога слышимых изменений тембра в децибелах

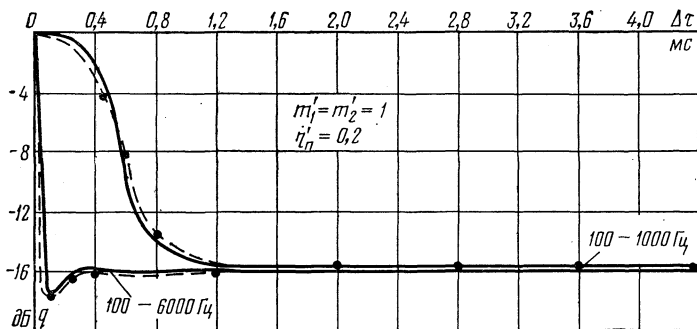


Рис. 5.16. Пороги слышимых изменений тембра для полос равноамплитудного шума при моноуральном восприятии сигнала и его повторения

лах, найденные как среднее арифметическое величин q_1 и q_2 . В качестве испытательного сигнала послужили полосы равноамплитудного шума. Здесь же для удобства

ва сравнения приведены аналогичные зависимости (сплошные линии), полученные теоретическим путем с помощью выражения (5.39) или (5.40) при условии, что $m'_1 = m'_2 = m' = 1$ и $\eta'_n = 0,2$. При выполнении этих условий теоретически вычисленная величина порога заметности интерференционных искажений отличается от экспериментально найденной не более чем на 10%.

Для получения еще более убедительных результатов описанные выше исследования были дополнены еще двумя сериями опытов. В первой серии слушателю предлагалось попеременно прослушать и оценить различие в тембре пар сигналов

$$f'(t) = a\varphi(t) + aq\varphi(t - \Delta\tau); \quad f''(t) = aq\varphi(t) + a\varphi(t - \Delta\tau) \quad (5.44)$$

при различном соотношении уровней их компонент, т. е. при $q = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$. Во второй серии экспертиз предлагались для сравнения по тембру два сигнала: сигнал, полученный суммированием двух идентичных компонент, отличающихся по времени задержки и по уровню (5.34), и эталонный сигнал, предварительно прошедший через фильтр с косинусоидальной амплитудно-частотной характеристикой, соответствующей огибающей оцениваемого сигнала.

Эксперты в обоих случаях не заметили разницы в тембре каждого из сигналов сравниваемых пар воздействий. Это возможно только при условии, если слуховой анализатор человека при моноуральном слушании не ослабляет по интенсивности запаздывающие компоненты воспроизводимого сигнала.

Кроме того, были проведены также экспертизы по определению порога заметности интерференционных искажений при восприятии сигналов, имеющих более сложные временные структуры. Например, для случая, когда воспроизводимый сигнал представлял собой сумму трех идентичных по спектру, но различных по времени запаздывания компонент. Слушатель имел возможность изменять уровень одной из компонент, в то время как параметры двух других компонент, образующих эталонный сигнал, не изменялись. И для этих условий проведения эксперимента значения величин q отличались от теоретически вычисленных не более чем на 10%, если принять, что $\eta'_n = 0,2$ и $m' = 1$.

Перечислим основные результаты, полученные для моноурального слушания.

1. Величина порога заметности интерференционных искажений (или слышимых изменений тембра) не зависит от того, ослабляется ли опережающая или задержанная компонента канального сигнала.

2. При формировании впечатления о тембральных особенностях звучания слуховой анализатор не способен разделять коррелированные сигналы, составляющие реверберационный процесс канального сигнала, с последующим ослаблением m' по интенсивности задержанных компонент.

3. Если в качестве каждой из двух компонент, составляющих канальный сигнал, выбраны полосы равноамплитудного шума и воспроизведение сравниваемых сигналов осуществляется с помощью головного телефона, то при всех значениях $\Delta\tau < \Delta\tau_p$ (где $\Delta\tau_p$ — минимальное значение временной разности, соответствующее раздельному восприятию передаваемых сигналов) теоретически вычисленная величина порога заметности интерференционных искажений при условии, что $\eta'_n = 0,2$ и $m' = 1$, отличается от экспериментально полученной не более чем на 10%.

Что же касается бинаурального восприятия, то здесь картина оказывается намного сложнее. Прежде всего необходимо учитывать, что орган слуха компенсирует имеющийся во входных сигналах $f_1(t)$ и $f_2(t)$ временной сдвиг таким образом, чтобы функция взаимной корреляции этих сигналов приняла бы максимальное значение, т. е.

$$\overline{f_1(t)f_2(t)} = \max, \quad (5.45)$$

и ослабляет по интенсивности (причем в одинаковой степени) все компоненты запаздывающего сигнала $f_1(t)$ или $f_2(t)$. Величина этого ослабления зависит от введенного в слуховой системе временного сдвига $\Delta\tau$ для выполнения условия (5.45). Последняя операция является отражением существующего в слуховой системе торможения, когда опережающий сигнал уменьшает чувствительность другого уха к восприятию запаздывающего сигнала. Далее, в соответствии с корреляционной природой слуха [71, 72] полная мощность сигнала, вызывающего слуховое ощущение при бинауральном воздействии коррелированных сигналов,

$$P = P_a + P_{пр} + P_{вз}, \quad (5.46)$$

где P_a и $P_{пр}$ — соответственно полные мощности сигнала

лов, формирующих слуховое ощущение при возбуждении только левого или только правого уха; $P_{вз}$ — мощность, обусловленная взаимной корреляцией входных сигналов и связанная с так называемым эффектом слияния. Значения величин $P_{л}$, $P_{пр}$, $P_{вз}$ находятся с учетом памяти слуха. Очевидно, что каждое из этих сла-

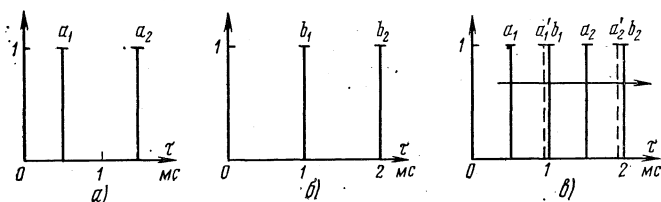


Рис. 5.17. Временные структуры сигналов, возбуждающих левую (а), правую (б) и центральную (в) концептуальные поверхности слухового анализатора при воздействии на его входы сигналов с одинаковыми временными структурами

гаемых содержит продукты интерференционных искажений. Для их выделения и последующего вычисления коэффициента интерференционных искажений (5.33) пригоден метод, изложенный в § 5.4.

Как показывают выполненные расчеты, лишь в одном случае, когда на левый и правый входы слухового

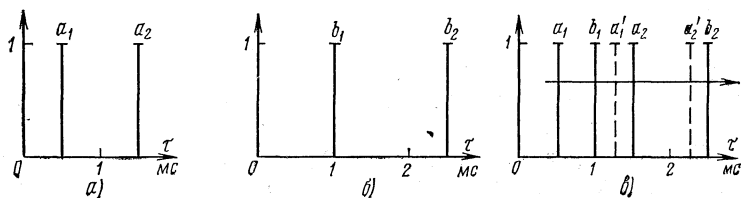


Рис. 5.18. Временные структуры сигналов, возбуждающих левую (а), правую (б) и центральную (в) концептуальные поверхности слухового анализатора при воздействии на его входы сигналов с разными временными структурами

анализатора воздействуют тождественные сигналы, величина порога заметности интерференционных искажений равна значению, полученному для моноурального слушания в идентичных экспериментальных условиях. При бинауральном восприятии сигналов, имеющих различные временные структуры, величина интерференци-

онных искажений всегда меньше, чем при моноуральном слушании. Причем это различие проявляется особенно резко при небольшом числе компонент, составляющих входной сигнал. Например, для пар сигналов, представленных на рис. 5.17 и 5.18, коэффициенты интерференционных искажений, найденные с учетом вышеизложенного, составляют соответственно 0,382 и 0,17, т. е. уменьшаются более чем в 2 раза для сигналов (см. рис. 5.18), имеющих различные временные структуры. Отсюда следует, что при бинауральном слушании орган слуха использует различие временных структур воздействующих сигналов для уменьшения интерференционных искажений суммарного сигнала, формирующего слуховое ощущение.

5.6. Интерференционные искажения при одноканальной и двухканальной звукопередачах

Поясним причины более правильной передачи тембров при стереовоспроизведении по сравнению с монофонической звукопередачей. Прежде всего оценим интерференционные искажения, возникающие в каналах передачи сигналов. Для большей простоты рассуждений не будем учитывать различие в частотных и полярных характеристиках микрофона и уха, маскирующее влияние головы слушателя. Кроме того, не будем принимать во внимание затухание звука в воздухе с расстоянием, а громкоговорители будем считать ненаправленными. Еще более упрощая рассуждения, примем, что реверберация как в первичном, так и во вторичном помещениях отсутствует и источник звука создает простое гармоническое колебание.

Допустим, что из первичного помещения во вторичное осуществляется монофоническая передача по схеме рис. 5.19а. Пусть сигнал от источника звука S_1 поступает на микрофоны M_1 и M_2 , после суммирования общий сигнал поступает на усилитель и затем воспроизводится одним громкоговорителем. Сложение колебаний, воспринятых двумя микрофонами, приведет к появлению частотных искажений для суммарного сигнала:

$$K(\omega, \tau) = \sqrt{2 \left(1 + \cos \frac{\omega \Delta r}{c}\right)}, \quad (5.47)$$

где $\Delta r = r_1 - r_2$ — разность расстояний от источника звука до микрофонов; c — скорость звука в воздухе.

Величина $K(\omega, \tau)$ не зависит от частоты только при условии симметричного положения источника звука по отношению к микрофонам M_1 и M_2 ($r_1=r_2$). Однако это условие при реальной монофонической передаче может

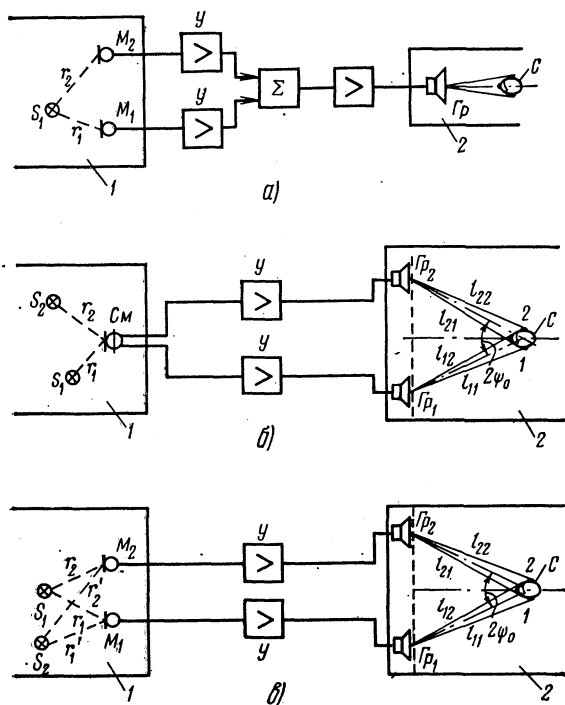


Рис. 5.19. Простейший случай монофонической и стереофонической передач

быть выполнено только для незначительного количества реальных источников звука. Если же $r_1 \neq r_2$ и воспринятые микрофонами сигналы одинаковы по уровню, то в линии передачи наблюдаются спады до нуля на частотах

$$f_{1,2,\dots,n} = \frac{(2n+1)c}{2\Delta r}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (5.48)$$

Отсюда следует, что степень изрезанности частотной характеристики является функцией Δr . При полосе воспроизведения 20—20 000 Гц общее число подавленных

частот при $\Delta r = 2,0$ м составляет 120, при $\Delta r = 1,0$ м — 60 и при $\Delta r = 0,5$ м около 30. Кроме того (и это весьма важно), при монофонической передаче в сигналах, воздействующих как на левое, так и на правое ухо слушателя, всегда отсутствуют одни и те

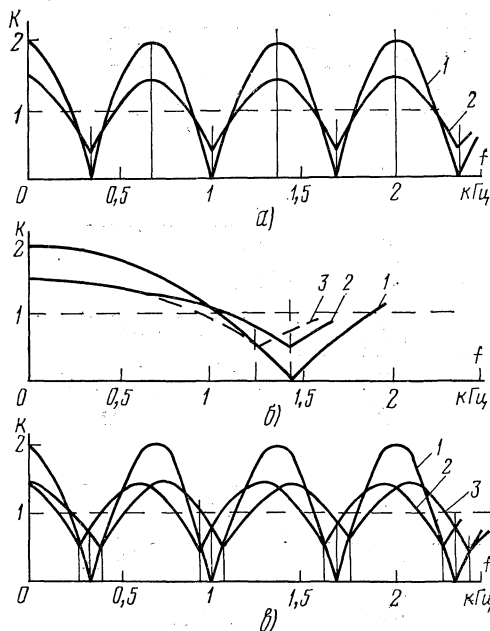


Рис. 5.20. Интерференционные искажения сигналов, воздействующих на уши слушателя:

а — монофоническая звукопередача ($\Delta r = 0,5$ м); б — интенсивностная стереофония ($2\psi_0 = 60^\circ$); в — временная стереофония ($\Delta r = 0,5$ м, $2\psi_0 = 60^\circ$).

Кривая 1 получена при равенстве амплитуд суммируемых сигналов и $\Delta l_1 = \Delta l_2$; кривые 2 и 3 — при их соотношении, равном 0,5 и $\Delta l_1 \neq \Delta l_2$

же частоты. Например, при неудачном выборе Δr может наблюдаться такой случай, когда основная частота музыкального инструмента совпадает с первым нулем (5.48). При этом в суммарном сигнале будут отсутствовать как основной тон, так и все нечетные гармоники. Заметим, что в реальных условиях при наличии направленных микрофонов и вследствие затухания звуковых колебаний в воздухе в суммарном сигнале не будет полного подавления частот $f_{1,2,3,\dots,n}$ (5.48), но степень изрезанности амплитудно-частотной характеристики останется достаточно велика. Типичные интерференционные искажения для монофонической звукопередачи представлены на рис. 5.20а.

С учетом принятых ранее допущений для интенсивностной стереофонии (см. рис. 5.19б) при наличии в пер-

вичном помещении только одного источника звука (S_1 на рис. 5.19б) сигналы, воздействующие на левое [$f_1(t)$] и правое [$f_2(t)$] ухо слушателя, запишутся как

$$f_1(t) = a_1 \sin\left(\omega t - \frac{\omega l_{11}}{c}\right) + a_2 \sin\left(\omega t - \frac{\omega l_{21}}{c}\right);$$

$$f_2(t) = a_1 \sin\left(\omega t - \frac{\omega l_{12}}{c}\right) + a_2 \sin\left(\omega t - \frac{\omega l_{22}}{c}\right). \quad (5.49)$$

Здесь a_1 и $a_2 = a_1 q$ — амплитуды сигналов, воспринятых стереомикрофонами; l_{11} , l_{12} , l_{21} , l_{22} — расстояния от громкоговорителей до соответствующих (см. рис. 5.19б) ушей слушателя. При этом частотные искажения для каждого из этих сигналов определяются выражениями:

$$K_1(\omega, \Delta l_1) = \sqrt{1 + 2q \cos\left(\frac{\omega \Delta l_1}{c}\right) + q^2};$$

$$K_2(\omega, \Delta l_2) = \sqrt{1 + 2q \cos\frac{\omega \Delta l_2}{c} + q^2}, \quad (5.50)$$

где $\Delta l_1 = l_{21} - l_{11}$ и $\Delta l_2 = l_{12} - l_{22}$ — различие расстояний от каждого уха до левого (Γp_1) или правого (Γp_2) громкоговорителей.

Так как интерференционные искажения на пути ухо — кора головного мозга отсутствуют, то следует рассматривать эти сигналы (5.49) и выражения, определяющие частотные искажения (5.50) последних, отдельно. Очевидно (5.50), что в случае симметричного положения слушателя относительно громкоговорителей ($\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l$) и отсутствия разности интенсивностей ($q=1$) интерференционные искажения для сигналов, воздействующих на уши слушателя, идентичны и определяются выражением, отличающимся от полученного ранее для монофонической передачи (5.47) только тем, что вместо Δr следует подставить Δl . При этом, как и ранее, полное отсутствие интерференционных искажений возможно, если $\Delta l = 0$. Это условие не может быть выполнено при двухканальной стереофонии. Так как величина угла (см. $2\psi_0$ на рис. 5.19б) между направлениями на громкоговорители из точки расположения слушателя, определяющая отношение $\Delta l/c$ (5.48), обычно не превышает 60° , то количество подавленных частот здесь будет значительно меньше, чем при монофонической передаче. Число последних (для полосы пропускания 20—20 000 Гц) при $2\psi_0 = 10^\circ$ составляет значение, равное 2, при $2\psi_0 = 20^\circ$ — 3, при $2\psi_0 = 30^\circ$ — 5 и при $2\psi_0 =$

= 60° лишь 9. Типичная картина интерференционных искажений для интенсивностной стереофонии показана на рис. 5.20б. Отметим лишь, что для большинства источников звука $q \neq 1$. При этом для симметричного положения слушателя по-прежнему $K_1 = K_2$ (5.50), однако полного подавления отдельных спектральных составляющих уже не будет. При асимметричном положении слушателя относительно громкоговорителей всегда $\Delta l_1 \neq \Delta l_2$, поэтому $K_1 \neq K_2$ (5.50) и, следовательно, отсутствует одновременное ослабление одних и тех же спектральных составляющих на обоих ушах слушателя.

В отличие от этого, для временной стереофонии (см. рис. 5.19в) при наличии в первичном помещении только одного источника звука S_1 интерференционные искажения воздействующих на уши слушателя сигналов определяются выражениями:

$$K_1(\omega, \Delta l_1, \Delta r) = \sqrt{2 \left(1 + \cos \frac{\omega(\Delta r - \Delta l_1)}{c} \right)};$$

$$K_2(\omega, \Delta l_2, \Delta r) = \sqrt{2 \left(1 + \cos \frac{\omega(\Delta r - \Delta l_2)}{c} \right)}. \quad (5.51)$$

Очевидно (5.51), что при симметричном расположении источника звука по отношению к микрофонам ($\Delta r = 0$) выражения (5.51) приводятся к (5.50), если q положить равным 1. В этом случае оказывается справедливым все изложенное выше для интенсивностной стереофонии. Кроме того, из (5.51) следует, что одновременное подавление одних и тех же частот в обоих суммарных сигналах будет наблюдаться, если $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l$. При этом подавленные частоты могут быть найдены по формуле

$$f_{1,2,3,\dots,n} = \frac{(2n+1)c}{2(\Delta r - \Delta l)}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, n. \quad (5.52)$$

Количество подавленных частот n_f , подсчитанное для разных значений угла $2\psi_0$ и величин Δr (см. рис. 5.19в), приведено в табл. 5.1.

При выполнении этих расчетов

$$\Delta l = \frac{D'}{2} (\psi + \sin \psi), \quad (5.53)$$

причем значение D' было принято равным 16,3 см.

Из (5.52) следует, что при временной стереофонии источники звука в первичном помещении необходимо

Таблица 5.1

**Количество подавленных частот
при временной стереофонии**

| $2\psi_0=10^\circ$ | | $2\psi_0=30^\circ$ | | $2\psi_0=60^\circ$ | |
|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
| $\Delta r, \text{ м}$ | n_f | $\Delta r, \text{ м}$ | n_f | $\Delta r, \text{ м}$ | n_f |
| 0,5 | 28 | 0,5 | 24 | 0,5 | 20 |
| 1,0 | 57 | 1,0 | 54 | 1,0 | 49 |
| 2,0 | 115 | 2,0 | 112 | 2,0 | 109 |

размещать таким образом, чтобы для каждого из них, по возможности, выполнялось условие $(\Delta r - \Delta l) \rightarrow 0$. Для наиболее часто встречающегося случая ($\Delta r \neq 0$ и $\Delta l_1 \neq \Delta l_2$) здесь, так же как и при интенсивностной стереофонии, отсутствует идентичное подавление одних и тех же частот в левом и правом воспринимаемых сигналах. Однако степень изрезанности частотной характеристики при временной стереофонии все же значительно больше, чем при интенсивностной. Интерференционные искажения для временной стереофонии изображены на рис. 5.20в.

Итак, выполненный выше анализ интерференционных явлений, возникающих в стереофонических системах звукопередачи, позволяет утверждать, что

1) в общем случае частотные зависимости звукового давления возле правого и левого уха слушателя не одинаковы; местоположения максимумов и минимумов последних не совпадают. Поэтому если какая-либо частотная составляющая сложного сигнала на входе одного уха оказывается ослабленной, то через другое ухо (другой канал слуховой системы) эта составляющая проходит со значительно меньшим ослаблением или вообще без него;

2) при возрастании уровня громкости, например, от левого громкоговорителя уменьшится неравномерность частотной характеристики звукового давления для сигнала левого уха, а для правого — увеличится. Это явление изменится в обратную сторону, если большим по уровню окажется сигнал, излучаемый правым громкоговорителем. При любом соотношении уровней излучаемых громкоговорителями сигналов одновременного

усиления интерференционных эффектов сигналов, воздействующих на левое и правое ухо слушателя, никогда не произойдет.

Именно это отличие частотных зависимостей интерферирующих сигналов и является одной из причин более естественного восприятия тембров при стереовоспроизведении по сравнению с монофонической передачей, где интерференционные искажения сигналов, воздействующих на левое и правое ухо слушателя, всегда идентичны (см. рис. 5.20а).

Несколько усложним рассмотрение. Допустим, что в первичном помещении находится несколько источников звука. Очевидно, что в этом случае можно говорить также об интерференционном взаимодавлении отдельных спектральных составляющих соответствующих этим источникам сигналов. Это явление удобно рассмотреть на примере двух звуковых образов (S_1 и S_2) отдельно для интенсивностной (см. рис. 5.19б) и временной (см. рис. 5.19в) стереофонии. Опуская все промежуточные выкладки, приведем для обоих случаев окончательные выражения, определяющие интерференционные искажения суммарных сигналов, действующих на левом и правом входах ушей слушателя:

$$\begin{aligned} K_1(\omega, \Delta l, \Delta r, \Delta r') &= K'_1(\omega, \Delta l, \Delta r) \times \\ &\times \sqrt{2 \left(1 + \cos \frac{\omega \Delta r'}{c} \right)}; K_2(\omega, \Delta l, \Delta r, \Delta r') = \\ &= K'_2(\omega, \Delta l, \Delta r) \sqrt{2 \left(1 + \cos \frac{\omega \Delta r'}{c} \right)}. \end{aligned} \quad (5.54)$$

Здесь $K'_1(\omega, \Delta l, \Delta r)$ и $K'_2(\omega, \Delta l, \Delta r)$ вычисляются соответственно по ф-ле (5.50) или (5.51), величина $\Delta r' = r_1 - r_2$ (см. рис. 5.19б, интенсивностная стереофония) или

$$\Delta r' = (r_1 + r_2) - (r'_1 + r'_2) \quad (5.55)$$

(см. рис. 5.19в, временная стереофония).

Итак, при наличии нескольких источников звука в первичном помещении возникновение интерференционных искажений обусловлено уже двумя причинами: а) сложением сигналов, пришедших от одного и того же источника звука по разным путям; б) сложением сигналов, принадлежащих разным источникам звука.

Искажения, вызванные первой причиной [$K'_1(\omega, \Delta l, \Delta r)$] и $K'_2(\omega, \Delta l, \Delta r)$, оцениваются, как и ранее, для интенсивностной и временной стереофонии соответственно выражениями (5.51) и (5.52). При этом оказываются справедливыми все относящиеся к этим формулам пояснения.

Второй сомножитель в выражениях (5.54) оценивает интерференционные явления, вызванные второй причиной. При этом оказывается, что положение слушателя во вторичном звуковом поле не оказывает никакого влияния на величину взаимного подавления частот двух источников. Это утверждение кажется вполне логичным, так как сквозная частотная характеристика электроакустической системы, состоящей из линейных элементов (в пределах принятых допущений), может быть представлена в виде произведения частотных характеристик каждого из ее элементов:

$$K(\omega) = K_1(\omega) K_2(\omega) \cdot \cdot \cdot K_n(\omega). \quad (5.56)$$

Кроме того, в случае интенсивностной стереофонии интерференционные искажения, определяемые вторым сомножителем выражений (5.54), могут быть значительно уменьшены и в пределе сведены к нулю, если $r_1 = r_2 = \dots = r_n$, т. е. при размещении источников звука на одинаковом расстоянии от стереомикрофона. При временной стереофонии минимум интерференционных искажений, обусловленных второй причиной, будет достигнут, если разности расстояний от каждого источника до микрофонов окажутся приблизительно одинаковыми.

И, наконец, следует помнить, что сигналы, создаваемые разными источниками звука, некогерентны, разность фаз между ними и соотношение амплитуд непрерывно меняются. Поэтому будет не только изменяться во времени глубина провалов частотной характеристики, но также и местоположение ее максимумов и минимумов на оси частот. Это явление вследствие наличия слуховой памяти, по-видимому, способствует уменьшению заметности интерференционных явлений, вызванных сложением сигналов от разных источников звука, и, при-суще, конечно, в равной степени как монофоническому, так и стереофоническому способам звукопередачи.

Еще более усложним рассмотрение. Учтем маскирующее действие головы слушателя и наличие отзвуков первичного помещения. Благодаря экранирующему дей-

ствию головы слушателя интерференционные эффекты, обусловленные сложением сигналов от громкоговорителей, оказываются значительно ослабленными на средних и верхних частотах. В качестве примера на рис. 5.21¹ изображены частотные характеристики результирующего звукового давления для левого (сплошные линии) и правого (пунктирные кривые) уха при симмет-

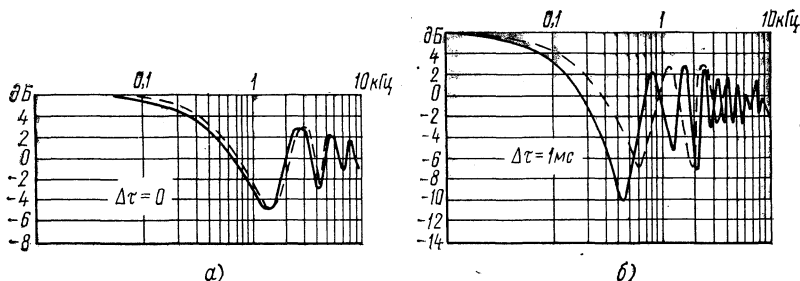


Рис. 5.21. Частотные характеристики результирующего звукового давления для левого (сплошная линия) и правого (пунктирная линия) уха слушателя при $x=0$ для разных временных сдвигов излучаемых сигналов

ричном расположении слушателя относительно громкоговорителей для $\psi = 30^\circ$ и значениях временного сдвига между излучаемыми сигналами: $\Delta\tau = 0$ мс (рис. 5.21а) и $\Delta\tau = 1,0$ мс (рис. 5.21б). Общая закономерность, присутствующая этим зависимостям, — уменьшение неравномерности частотной характеристики в области средних и высоких частот. Эта величина на частотах выше 500 Гц уменьшается до 3—10 дБ. По данным ранее опубликованных работ, например [29], интерференционные искажения на речевом сигнале не замечаются половиной слушателей, если неравномерность частотной характеристики при преобразовании двухканальной стереофонотграммы в одноканальную не превышает 5—6 дБ. Можно сказать, что при стереофонии в значительной степени сохраняется взаимонезависимость двух сквозных каналов от входа (микрофоны первичного поля) до выхода (входы слухового анализатора). Если учесть, что временные структуры ревербирующих сигналов, образующих стереопару, не одинаковы (вследствие различия

¹ Эти данные заимствованы из статьи Г. К. Клименко [29].

в расположении микрофонов левого и правого каналов в первичном помещении и в форме и ориентации в пространстве полярных характеристик последних), то из-за экранирующего влияния головы слушателя это различие сохраняется и для сигналов, возбуждающих левое и правое ухо слушателя. В отличие от этого, при одноканальной звукопередаче входные сигналы практически идентичны. Как было показано (см. § 5.5), различие временных структур, воздействующих на левый и правый входы слуховой системы совокупностей коррелированных сигналов, используется последней для уменьшения интерференционных искажений суммарного сигнала, формирующего слуховое ощущение. Это явление является второй причиной, способствующей более правильной передаче тембров инструментов и голосов при стереовоспроизведении.

И, наконец, пространственное разнесение звуковых образов, присущее стереовоспроизведению, уменьшает их взаимное маскирующее действие (см. гл. 4), которое, как известно, является частотозависимым. Последнее также должно способствовать улучшению условий для более правильного восприятия тембров при стереовоспроизведении.

Г л а в а 6

Двухканальные акустические системы

6.1. Зона стереоэффекта двухканальных систем воспроизведения

Рассмотрим наиболее распространенную акустическую систему стереофонии, состоящую из двух монофонических громкоговорителей, разделенных расстоянием базы, причем акустические оси громкоговорителей будем считать перпендикулярными к линии базы. Такую систему для краткости в дальнейшем будем называть «обычной системой воспроизведения».

Как отмечалось выше, отдельные места в помещении прослушивания далеко не равноценны с точки зрения предпочтительности. Зону, в пределах которой преимущества стереофонии проявляются в достаточно полной мере, назовем зоной стереоэффекта. Однако такое опре-

деление требует количественных уточнений. Для того чтобы иметь возможность сравнивать различные места в помещении прослушивания с точки зрения стереоэффекта, а также различные воспроизводящие системы между собой, необходим количественный критерий, характеризующий качество воспроизводимого стереоэффекта. Учитывая тесную связь между предпочтительностью и точностью передачи системой пространственной информации, назовем зоной стереоэффекта акустической системы ту часть площади помещения прослушивания, в пределах которой пространственные искажения не превышают определенной допустимой величины. Учитывая взаимосвязь пространственных искажений для различных КИЗ в стереопанораме (см. рис. 3.11б), а также то, что центральный источник в стереопанораме наиболее сильно подвержен пространственным искажениям, боковые границы зоны стереоэффекта будем определять по величине изменения положения только одного центрального источника. Пусть, например, 10-процентное изменение в положении центрального источника будет считаться предельно допустимым. Тогда ширину зоны стереоэффекта можно найти из условия

$$|\Delta S_{\text{доп}}| \leq 0,1B. \quad (6.1)$$

Определим, в какой области помещения прослушивания пространственные искажения не превышают 10%. Если считать, что излучатели системы на средних частотах не обладают направленностью (для упрощения вывода), то действием интенсивностной разности $\Delta I_{x,y}$ по сравнению с временной $\Delta \tau_{x,y}$ можно пренебречь, особенно при малых смещениях x . Смещение центрального источника на величину $0,1B$ (или $0,2\frac{B}{2}$) произойдет при значении $\Delta \tau_{x,y} = 0,2$ мс (согласно рис. 2.4). Очевидно, что зона, в пределах которой $|\Delta \tau_{x,y}| \leq 0,2$ мс, ограничена парой гипербол, построенных для разности хода $l_1 - l_2 = c\Delta \tau_{x,y} = 340 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 6,8$ см относительно центров излучателей. С учетом координат слушателя и громкоговорителей, а также допустимой величины временной разности $[\Delta \tau_{x,y}]_{\text{доп}}$ уравнение гипербол может быть представлено в явной форме

$$x_{\text{доп}} = \pm [\Delta \tau_{x,y}]_{\text{доп}} c \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{y^2}{B^2 - \{[\Delta \tau_{x,y}]_{\text{доп}} c\}^2}}, \quad (6.2)$$

где $x_{\text{доп}}$, м — допустимое смещение слушателя от оси симметрии (при котором пространственные искажения равны допустимым); y , м — расстояние от точки слушания до линии базы, $c=340$ м/с — скорость звука в воздухе; $[\Delta\tau_{x,y}]_{\text{доп}}$ — допустимая величина временной разности (в соответствии с допустимой величиной пространственных искажений).

Считая, что $[\Delta\tau_{x,y}]_{\text{доп}}=0,2$ мс, а $B^2 \gg 4,6 \cdot 10^{-3}$, последнее выражение можно несколько упростить:

$$x_{\text{доп}} \approx \pm 6,8 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{y^2}{B^2}}. \quad (6.3)$$

Уравнение (6.3) определяет границы, т. е. ширину зоны стереоэффекта для систем воспроизведения со слабо выраженной направленностью. Из уравнения следует, что ширина этой зоны увеличивается при удалении слушателя от базы и при уменьшении базы. Последнее наглядно показано на рис. 6.1. Если направленностью

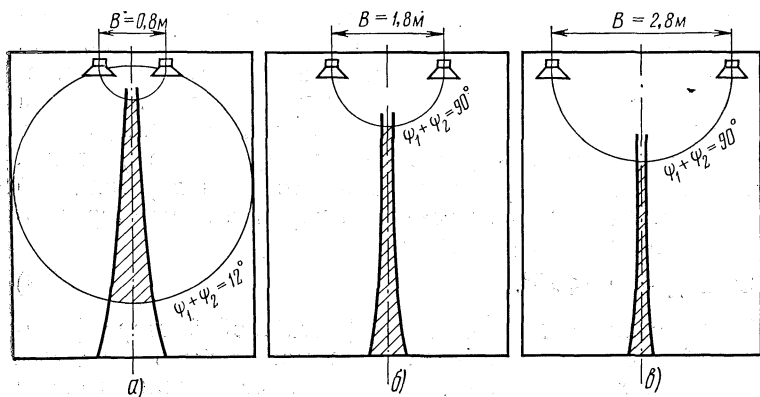


Рис. 6.1. Зона стереоэффекта при различных базах громкоговорителей:

а — $Q=1,2$ м²; б — $Q=0,9$ м²; в — $Q=0,4$ м²

громкоговорителей пренебречь нельзя, то выражение для боковых границ зоны стереоэффекта становится значительно более сложным [см. выражение (6.17)], а ширина зоны стереоэффекта еще более узкой, чем показано на рис. 6.1.

Следует, однако, заметить, что не вся область помещения прослушивания, удовлетворяющая условию (6.1), характеризуется одинаковой предпочтительностью. При

слишком малом и слишком большом удалении слушателя от линии базы y предпочтительность заметно падает. Оптимальным принято считать такое удаление от линии базы, при котором угол между направлениями на громкоговорители $\psi_1 + \psi_2 = 40 \div 60^\circ$.

В работе [95] указывается, что наибольший процент предпочтительности наблюдается при значении $\psi_1 + \psi_2 = 90^\circ$. Однако некоторые авторы считают такую величину угла предельно допустимой [83], [108]. Следует также заметить, что при малых y (т. е. при $\psi_1 + \psi_2 > 90^\circ$) наблюдается кажущийся подъем центральной части стереопанорамы над линией базы [73]. Это обусловлено тем, что при близком расположении слушателя бинауральные сигналы практически не зависят от поворота головы; при слушании реального источника это бывает лишь в том случае, когда последний расположен над слушателем.

Максимальное удаление слушателя определяется разрешающей способностью слуха по углу, приблизительно равному 4° . Если считать, что слушатель должен иметь возможность четко выделить хотя бы три направления, то угол между направлениями на громкоговорители не должен быть меньше 12° , в противном случае восприятие приближается к монофоническому. Однако случай $\psi_1 + \psi_2 < 12^\circ$ — маловероятен в условиях жилой комнаты. Будем считать, что при перемещении слушателя вдоль оси симметрии глубина зоны стереоэффекта определена условием

$$12^\circ \leq \psi_1 + \psi_2 \leq 90^\circ. \quad (6.4)$$

Следовательно, зона стереоэффекта любой стереофонической системы воспроизведения может быть определена из двух условий, определяющих ее ширину (6.3) и глубину (6.4).

Заштрихованная область рис. 6.1 соответствует зоне стереоэффекта для обычных стереофонических систем при различных базах (0,8; 1,8; 2,8 м). Из этого рисунка видно, что в условиях жилой комнаты с размерами 4×5 м все места в зоне стереоэффекта находятся на оси симметрии. Слишком малая зона стереоэффекта является весьма существенным недостатком обычных воспроизводящих систем. Во-первых, это создает значительные неудобства для слушателя, вынуждая его располагаться на оси симметрии системы. Во-вторых, при коллективном прослушивании стереоэффект создается

для весьма малого числа слушателей (1—2), для других мест восприятие мало отличается от монофонического ввиду больших пространственных искажений.

6.2. Пространственные характеристики двухканальных акустических систем

Для сравнения и оценки различных систем воспроизведения по точности передачи пространственной информации удобно пользоваться пространственными характеристиками — семейством кривых, характеризующих положения трех кажущихся источников ($-B/4$, центр, $+B/4$) в зависимости от координат слушателя при определенной базе. Пространственные характеристики поз-

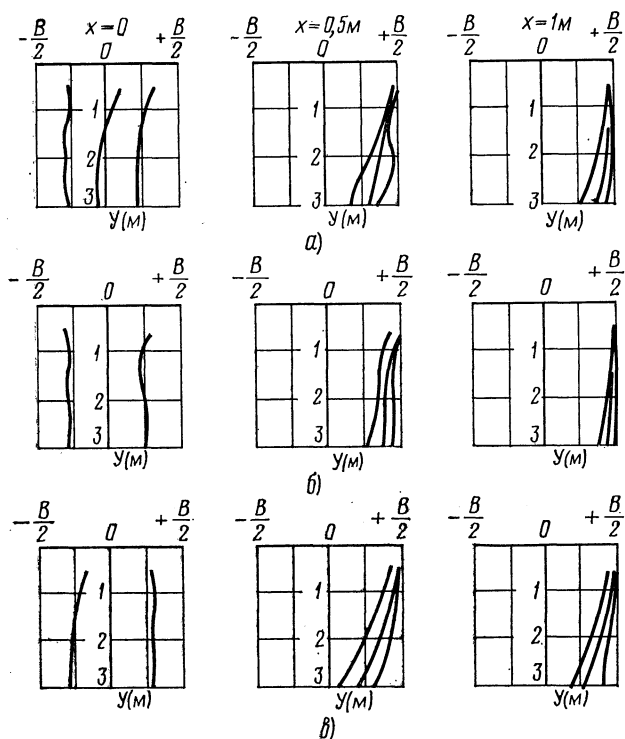


Рис. 6.2. Пространственные характеристики акустических систем при $B=2,4$ м:
 а — стереорадиолы «Симфония-2»; б — радиокомплекса «Нева-70»; в — стереорадиолы «Ригонда-стерео»

воляют не только определить зону стереоэффекта, но и выявить возможные аномалии локализации, вызванные местными условиями, несовершенством громкоговорителей и т. п. Существует два способа представления пространственных характеристик. Один из них характеризует смещение трех кажущихся источников в зависимости от удаления слушателя y при фиксированных значениях x (рис. 6.2).

Другой способ дает зависимость положений тех же трех источников от величины бокового смещения слушателя x при фиксированных значениях y (см., например, кривые 2, 3, 4 на рис. 3.11б).

Первый способ удобнее для подробной количественной оценки зоны стереоэффекта в тех случаях, когда нужно анализировать пространственные искажения для всех мест помещения прослушивания. Этот способ требует проведения весьма трудоемких и продолжительных субъективно-статистических экспертиз. Второй способ более удобен для оперативной оценки пространственных искажений и не требует большого числа экспертопоказаний. В ряде случаев практики (например, при отработке новой стереофонической системы воспроизведения) достаточно при одном значении y проследить за положением лишь одного центрального источника, чтобы составить представление о зоне стереоэффекта данной системы воспроизведения.

На рис. 6.2 для иллюстрации представлены пространственные характеристики для стереорадиол «Симфония-2» и «Ригонда-стерео», а также радиокомплекса «Нева-70».

Следует отметить, что характер приведенных зависимостей является общим для всех существующих стереофонических громкоговорителей как отечественных, так и зарубежных [исключение составляют так называемые системы с расширенной зоной (СРЗ) стереоэффекта, в которых приняты специальные меры по снижению пространственных искажений. Вопросы проектирования СРЗ и их оценка будут рассмотрены ниже].

6.3. О выборе оптимальной базы громкоговорителей

Длина базы B громкоговорителей является весьма важным параметром системы воспроизведения. Чтобы определить оптимальную длину базы, рассмотрим влияние этого параметра на отдельные аспекты стереовоспроизведения.

1. Общая ширина пространственной панорамы в обычных условиях не может превышать длину базы. Изменение B , как отмечалось раньше, приводит к изменению масштаба пространственной панорамы. При выборе оптимальной длины B необходимо знать, что важнее для слушания — угловая ширина базы $2\psi_0$ или линейная B . Если справедливо первое предложение, то достаточно при любой базе определить оптимальное удаление слушателя y , если второе — важным окажется выбор B и y . Для ответа на этот вопрос ав-

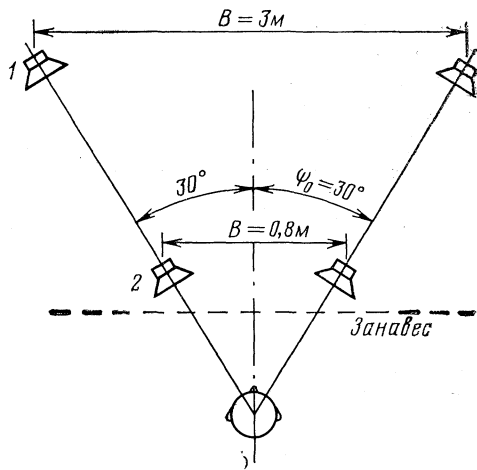


Рис. 6.3. Расположение слушателя при оценке предпочтительности систем с разными B и y

торы провели следующий эксперимент. Слушатель, находящийся на оси симметрии двух одинаковых систем воспроизведения с разными базами рис. 6.3, поз. 1 и 2, должен выбрать наилучший вариант звучания. Важным условием эксперимента было совпадение угловых положений громкоговорителей обеих систем (угол $2\psi_0$) и уровней громкости в точке расположения слушателя при переключении системы. Все эксперты уверенно различали системы и отдавали предпочтение системе с большей базой. Следовательно, для слушателя важнее не угловая, а линейная протяженность звучащего ансамбля. Благодаря наличию реверберации вторичного помещения слушатель уверенно определяет на слух расстояние до линии базы, а следовательно, и линейную протяженность стереопанорамы и отдельных ее элементов. При малых базах эти элементы воспринимаются неестественно «мелкими», что приводит к ухудшению стереоосприятия. Объясняется это явление, по-видимому, причинами психологического характера — подобно тому, как телезрители предпочитают телеэкран с большими размерами, хотя объем передаваемой информации (число элементов изображения) остается неизменным, а четкость даже уменьшается.

2. Размер базы оказывает значительное влияние на зону стереоэффекта, так как определяет расстояние между фокусами гипербол, построенных для допустимой разности хода. При уменьшении базы от 3 до 0,8 м пло-

щадь зоны стереоэффекта возрастает (согласно рис. 6.1) от 0,4 до 1,2 м².

3. «Прозрачность» звучания для боковых и центральных источников стереопанорамы увеличивается при увеличении базы (так как увеличивается угловое расстояние между выделяемым и мешающим источниками). Однако при $B > 2,5$ м происходит преимущественное увеличение «прозрачности» боковых источников (см. § 4.3) за счет уменьшения громкости центрального источника по сравнению с боковыми (так называемый «провал центра»). Значительное уменьшение базы приводит к относительно более громкому звучанию центральных источников, что ухудшает «прозрачность» звучания боковых. Исходя из этих соображений размер базы при воспроизведении должен соответствовать базе контрольных агрегатов при записи программы (обычно 2,5—3 м).

4. С увеличением размера базы локализация центральных источников становится менее четкой (для симметрично расположенного слушателя) из-за интерференционных явлений. С этой точки зрения базы более 3 м — нежелательны.

5. От величины базы зависит предпочтительность стереовоспроизведения. Работы, проведенные в ЛЭИС [19], показали, что большинство слушателей предпочитает воспроизведение при значении $B = 2 \div 3$ м. Предпочтительность стереовоспроизведения (по сравнению с моновоспроизведением) при большой базе (3 м) оказалась в несколько раз выше, чем при малой базе ($B = 1,2$ м); эти результаты справедливы как для симметричного, так и для асимметричного положений слушателя [113]. Проведенные прослушивания стереопрограмм при базах 0,8, 1,8 и 2,8 м привели к таким же выводам.

Таким образом, изменение размера базы громкоговорителей при воспроизведении стереофонических программ приводит к противоречивым результатам, поэтому при выборе оптимальной базы следует, по-видимому, руководствоваться характером изменения предпочтительности как суммарной оценки качества стереовоспроизведения.

В существующей литературе нет единых рекомендаций по выбору базы. Некоторые авторы рекомендуют устанавливать базу, равную ширине комнаты прослушивания [83], хотя чаще рекомендуется база, равная 70% ширины комнаты [63]. В работе [108] оптимальной базой для симфонической музыки рекомендовано значение $B = 3$ м, а для речи и эстрадной музыки — $B = 2$ м. Выводы последней наиболее близки к данным в этой работе, однако с мнениями,

изложенными в [63] и [83], также можно согласиться, если учесть, что современные жилые помещения редко имеют ширину более 4 м. Многие авторы сходятся на том, что оптимальная величина базы зависит от вида воспроизводимой программы [83], [108]. В связи с этим существует достаточно много заявок и патентов, в которых описываются способы электрической регулировки «действующей базы» — подобно тому, как регулируют ширину стереопанорам при записи (см. § 3.3), или с помощью третьего громкоговорителя в центре базы, из которого подается суммарный сигнал $U_m = m_1(U_1 + U_2)$. Регулируя m_1 , можно менять ширину стереопанорамы от значения B до нуля.

Из приведенного обзора можно сделать вывод о том, что оптимальный размер базы в системах воспроизведения находится в пределах 2—3 м.

В заключение рассмотрим акустическую систему, состоящую из одного громкоговорителя особой конструкции

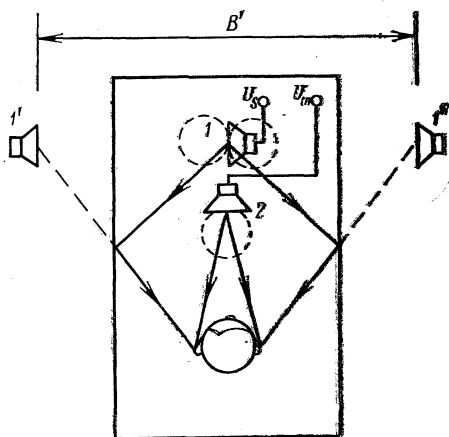


Рис. 6.4. Система воспроизведения с акустическим суммарно-разностным преобразованием

ции, которая позволяет создавать стереопанораму значительной протяженности [70]. Эта акустическая система состоит из двух излучателей — 1 и 2, расположенных один над другим; их ориентация и характеристики направленности видны из рис. 6.4. На головку громкоговорителя 1 подается разностный сигнал $U_s = m_2(U_1 - U_2)$. Так как головка 1 установлена без экрана, ее характеристика направленности («восьмерка», $\mathcal{D}(\psi) = \cos \psi$) на средних и высоких частотах исключает непосредственное восприятие слушателем разностного сигнала. Разностный сигнал может достигать ушей слушателя только после отражения от стен помещения (см. рис. 6.4). Головка 2, питающаяся суммарным сигналом

$U_m = m_1 (U_1 + U_2)$, создает практически ненаправленное излучение.

С учетом отражений от стен помещения такая система эквивалентна системе, состоящей из головок $1'$ и $1''$, излучающих разностный сигнал в противофазе, и центральной головки 2, излучающей суммарный сигнал. Рассмотрим опережающую пару бинауральных сигналов (для перекрестных лучей нужно было бы учесть величины τ_1 , τ_2 , ρ_1 и ρ_2 , как и при обычном воспроизведении). Сигнал, воспринимаемый левым ухом (от головок $1'$ и 2):

$$p_{\text{л}} \approx (U_s + U_m) = U_1(m_1 + m_2) + U_2(m_1 - m_2). \quad (6.5)$$

Сигнал (звуковое давление), воспринимаемый правым ухом слушателя (от головок $1''$ и 2):

$$p_{\text{п}} \approx (-U_s + U_m) = U_1(m_1 - m_2) + U_2(m_1 + m_2). \quad (6.6)$$

Если принять, что $m_1 = m_2$, то $p_{\text{л}} \approx U_1$ и $p_{\text{п}} \approx U_2$, как в обычной разнесенной системе воспроизведения. При изменении соотношения m_1 и m_2 производится регулирование ширины стереопанорамы от B' (при $m_1 = m_2$) до нуля (при $m_2 = 0$). Величина B' , как ясно из рис. 6.4, определяется шириной помещения прослушивания.

Недостатком рассмотренной системы является зависимость стереопанорамы от формы, размеров и акустической обработки стен помещения прослушивания.

6.4. Методы увеличения зоны стереоэффекта при двухканальном воспроизведении

Проблема увеличения зоны стереоэффекта уже давно привлекает внимание исследователей, о чем свидетельствует большое число заявок и патентов, авторы которых в соответствии с определенными представлениями о природе стереоэффекта предлагают те или иные решения. Предпринимаются попытки, если не уменьшить сами пространственные искажения, то уменьшить их заметность, снижая четкость локализации. Последнее достигалось поворотом излучателей к стене помещения или к специальному экрану — рассеивателю [116] для ослабления прямых звуков по отношению к отраженным.

Более эффективные меры борьбы с пространственными искажениями можно условно разделить на следующие категории.

1. Системы со «скользящей» базой. Принцип действия таких систем понятен из рис. 6.5а. Слушатель, перемещающийся вдоль линии df , при всех положениях оказывается вблизи оси симметрии какой-либо пары излучателей, например в точке A_0 — излучатели Γ_1 и Γ_2 ,

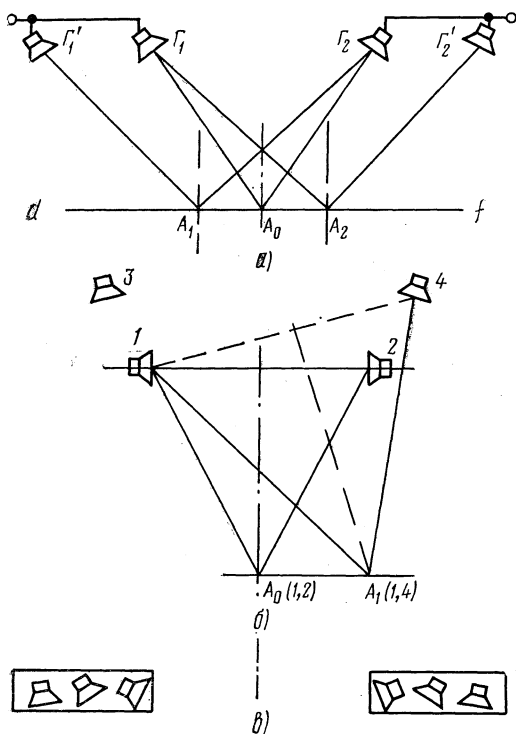


Рис. 6.5. Воспроизводящая система со «скользящей» базой (а) и ее разновидности: (б) — [117]; (в) — [118]

в точке A_1 — излучатели Γ_1' и Γ_2 , в точке A_2 — излучатели Γ_1 и Γ_2' . Взаимное влияние отдельных громкоговорителей в каждом из каналов ослаблено их разнесением в пространстве и направленностью.

Два варианта воспроизведения систем, запатентованных в ФРГ [117] и [118] (см. рис. 6.5б, в), можно рассматривать как частные случаи вышерассмотренной системы.

Такие системы воспроизведения явно не пригодны для жилых помещений как из-за требуемой большой

площади для их размещения, так и по экономическим соображениям. Тем не менее такие системы могут оказаться пригодными для стереофонического звукоусиления в небольших концертных залах. Важным моментом при разработке воспроизводящих систем рассматриваемого типа является выбор характеристик направленности громкоговорителей, хотя никаких сведений об этом в существующей литературе не имеется.

2. Системы с противофазным излучением [69], [119]. Действие систем этого типа основано на том, что влияние $\Delta\tau_{x,y}$ проявляется в значительно меньшей степени (приблизительно в 2 раза) при противофазном излучении стереосигналов (см. § 2.6). В системах с простым изменением фазировки отсутствует локализация центральных источников и ухудшается воспроизведение низких частот. Поэтому на практике чаще обеспечивают противофазное излучение только среднечастотных сигналов [119] всех кажущихся источников, кроме центрального и крайних. Это достигается изменением соотношения между суммарным (U_1+U_2) и разностным сигналами (U_1-U_2) после первого СРП (подобно функциональной схеме рис. 3.5). Пусть, например, это соотношение больше двух (как рекомендуется в [139]), т. е.

$$\frac{U_s}{U_m} = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} > 2. \quad (6.7)$$

Решая это неравенство относительно соотношения канальных сигналов U_1/U_2 , получим

$$1 < -\frac{U_1}{U_2} < 3. \quad (6.8)$$

Знак «минус» означает, что сигналы U_1 и U_2 в противофазе. Условие (6.8) удовлетворяется для всех кажущихся источников, кроме центрального ($\left|\frac{U_1}{U_2}\right| = 1$) и крайних ($\left|\frac{U_1}{U_2}\right| > 3$, т. е. $\Delta L > 10$ дБ). Для рассматриваемых систем воспроизведения зона стереоэффекта оказывается несколько шире, чем в системах обычного типа. Эффект расширения зоны здесь ограничен действием другого фактора — ΔL_{xy} , который при противофазном питании громкоговорителей оказывает значительно большее влияние на смещение КИЗ (см. § 2.6). Проведенные субъективные испытания (прослушивания) подобных систем воспроизведения показали, что даже

при больших смещениях слушателя от оси симметрии центральная часть стереопанорамы смещается несколько меньше чем на $B/2$. Благодаря этой особенности большинство образов стереопанорамы, несмотря на большие пространственные искажения, воспринимаются раздельно. Тем не менее этот тип воспроизводящих систем дает лишь частичный эффект, который не оправдывает усложнения усилителей (или громкоговорителей).

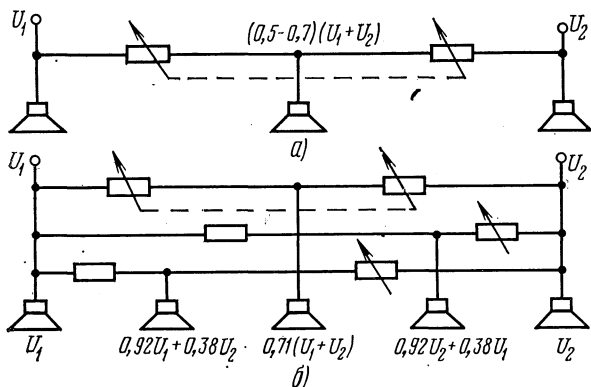


Рис. 6.6. Распределение сигналов в трехканальной (а) и пятиканальной (б) системах воспроизведения с «фантомными» каналами

3. Системы с «фантомными» каналами. Громкоговорители «фантомных» каналов, расположенные между основными громкоговорителями, питаются суммарными сигналами $U_m = U_1 + U_2$, причем их соотношение (U_1/U_2) и уровень зависят от положения соответствующего громкоговорителя. Так, например, для трех- и пятиканальных систем ([63], [134]) рекомендуемое соотношение сигналов, подаваемых на громкоговорители, показано на рис. 6.6. Следует подчеркнуть, что системы с «фантомными» каналами занимают промежуточное положение между монофоническими и стереофоническими системами. В самом деле, увеличение суммарной (монофонической) информации U_m в воспроизводимом сигнале приводит к уменьшению ширины стереопанорамы и уменьшению пространственных искажений при асимметричном расположении слушателя. Однако эти особенности характерны и для монофонических систем, где ширина звуковой перспективы равна нулю, а положение кажущихся источников совсем не зависит от положения

слушателя. Таким образом, система с «фантомными» каналами позволяет плавно переходить от монофонического воспроизведения к стереофоническому, если изменять относительный уровень сигналов, подаваемых на излучатели «фантомных» каналов. Применение подобных систем для расширения зоны нецелесообразно, так как такой же эффект можно получить при уменьшении размера базы в системе обычного типа. Кроме того, предпочтительность воспроизведения стереопрограмм для систем с «фантомными» каналами значительно ниже, чем для обычных систем [113].

4. Системы воспроизведения с направленными излучателями. Действие таких систем основано на возможности компенсации действия $\Delta L'_{xy}$ *) и $\Delta \tau_{xy}$ величиной разности уровней, обусловленной характеристиками направленности громкоговорителей. И хотя идея создания такой системы возникла около 40 лет назад и не раз упоминалась в работах некоторых исследователей (например, [130], [86]), до настоящего времени нет каких-либо конкретных сведений о ее практической реализации, нет также сведений о форме требуемых характеристик направленности. В то же время имеется довольно много патентов, в которых предполагаются направленные громкоговорители для стереовоспроизведения — в основном для поддержания постоянного уровня прямого звука [64], для озвучения больших помещений. Имеется также патент на специальные электростатические громкоговорители, которые предполагается использовать для создания направленного излучения для расширения зоны стереоэффекта [115].

В [101] описана акустическая система, позволяющая увеличить зону стереоэффекта путем применения комбинации направленных боковых громкоговорителей и двух центральных («фантомные» каналы). Однако и в этой работе нет сведений о направленности громкоговорителей.

Применение направленных громкоговорителей для расширения зоны стереоэффекта позволяет, как это будет показано ниже, сравнительно простыми техническими средствами обеспечить хороший стереоэффект на большей части помещений прослушивания.

*) $\Delta L'_{xy} = 20 \lg(l_1/l_2)$ — интенсивностная разность, обусловленная различием расстояний до громкоговорителей.

6.5. Оптимальные характеристики направленности громкоговорителей в двухканальной системе воспроизведения

До недавнего времени при проектировании стереофонических воспроизводящих систем к ним предъявлялись те же требования, что и к монофоническим. Предполагалось, что идеальная стереофоническая система воспроизведения должна состоять из двух идеальных монофонических систем. При этом игнорировалась специфическая особенность стереофонической передачи — наличие пространственной информации. Наиболее важными характеристиками монофонического громкоговорителя являются частотная характеристика по звуковому давлению, определяющая диапазон воспроизводимых частот, и характеристика направленности, определяющая зону, в пределах которой слушатель может воспринимать весь спектр воспроизводимого сигнала без существенных частотных искажений. С этой точки зрения идеальный монофонический громкоговоритель должен быть практически ненаправленным во всем диапазоне частот. Стереофоническая система, состоящая из ненаправленных громкоговорителей, как показано в § 6.1, обладает очень малой зоной стереоэффекта.

Как следует из расчетов, приведенных в § 3.7, соотношение громкостей отдельных элементов стереопанорамы при асимметричном приеме зависит от способа формирования кажущихся источников (введением Δt или ΔL), т. е. от типа микрофонной системы при записи. Поэтому в общем случае невозможно выбрать такую форму характеристик направленности громкоговорителей, при которой соотношение громкостей отдельных источников для любой стереопрограммы и при любом расположении слушателя оставалось бы постоянным.

Под оптимальной характеристикой направленности будем понимать такую, при которой расположение отдельных звуковых образов на линии базы практически не зависит от расположения слушателя относительно громкоговорителей системы воспроизведения. Пользуясь известными сведениями о количественных закономерностях бинаурального слуха, определим форму оптимальных характеристик направленности, соответствующих максимально возможной зоне стереоэффекта.

Прежде всего уточним те факторы, действие которых на величину пространственных искажений подле-

полнительную разность $\Delta L(\psi)$, которая вызовет смещение центрального КИЗ из положения S в центр базы. Так как требуемое смещение кажущегося источника ΔS относительно малó (т. е. $\Delta S < 0,7 \frac{B}{2}$), величина $\Delta L(\psi)$ пропорциональна величине этого смещения, т. е.

$$\Delta L(\psi) = K_0 \frac{\Delta S}{B/2}, \quad (6.9)$$

где K_0 — коэффициент пропорциональности, характеризующий крутизну начального (линейного) участка кривых смещения $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$ (см. рис. 2.2а). Для большинства вещательных сигналов $K_0 \approx 9,3$ дБ. Величину ΔS легко определить, если известны l_1 и l_2 :

$$\Delta S = \frac{B}{2} \frac{l_1 - l_2}{l_1 + l_2}. \quad (6.10)$$

Следовательно, оптимальная характеристика направленности должна обеспечивать такую интенсивную разность, чтобы нейтрализовать действие на бинауральный слух величин $\Delta L'_{xy}$, $\Delta \tau_{xy}$, а также устранить смещение кажущегося источника ΔS , вызванное несоответствием направления биссектрисы и направления на центр базы. Такая компенсация, при которой центральный кажущийся источник звуковой панорамы всегда остается в центре базы, является необходимой и достаточной для того, чтобы вся звуковая панорама воспринималась без искажений слушателем, находящимся в любой точке помещения (это следует из того факта, что наклон кривых, характеризующих относительное смещение КИЗ при различных ΔL и $\Delta \tau$, не зависит ни от базы, ни от расположения слушателя).

Стабилизация положения центрального кажущегося источника осуществляется при выполнении условия

$$\Delta L_{xy} + K_x \Delta \tau_{xy} + \Delta L(\psi) = 0. \quad (6.11)$$

Если каждый громкоговоритель системы создает на расстоянии 1 м в направлении акустической оси одно и то же звуковое давление p_0 (условие, при котором центральный образ стереопанорамы локализуется в центре базы), то общую интенсивностную разность в произвольной точке A с координатами x , y (см. рис. 6.7) можно выразить в децибелах следующим образом:

$$\begin{aligned}
\Delta L_{xy} &= 20 \lg \frac{\mathcal{D}_2(\psi_2) \rho_0 l_1}{\mathcal{D}_1(\psi_1) \rho_0 l_2} = 20 \lg \mathcal{D}_2(\psi_2) - 20 \lg \mathcal{D}_1(\psi_1) + \\
&+ 20 \lg \frac{l_1}{l_2} = 20 \lg \mathcal{D}_2(\psi_2) - 20 \lg \mathcal{D}_1(\psi_1) + \\
&+ 10 \lg \frac{\left(\frac{B}{2} + x\right)^2 + y^2}{\left(\frac{B}{2} - x\right)^2 + y^2}, \tag{6.12}
\end{aligned}$$

где величины l_1 , l_2 , B , x и y — выражены в метрах.

Для сокращения записи в дальнейшем будем заменять $20 \lg D_1(\psi_1)$ и $20 \lg D_2(\psi_2)$ соответственно на $D_1(\psi_1)$ и $D_2(\psi_2)$ — факторы направленности в логарифмическом масштабе.

Выразим величину $\Delta \tau_{xy}$ через координаты точки A :

$$\begin{aligned}
\Delta \tau_{xy} &= \frac{1}{c} (l_1 - l_2) = \frac{1}{c} \left[\sqrt{\left(\frac{B}{2} + x\right)^2 + y^2} - \right. \\
&\left. - \sqrt{\left(\frac{B}{2} - x\right)^2 + y^2} \right]. \tag{6.13}
\end{aligned}$$

С помощью построений на рис. 6.7 величины ψ_1 , ψ_2 и $\Delta L(\psi)$ также можно выразить через координаты точки A :

$$\left. \begin{aligned}
\psi_1 &= \arctg \frac{\frac{B}{2} + x}{y}; \quad \psi_2 = \arctg \frac{\frac{B}{2} - x}{y}; \\
\Delta L(\psi) &= K_0 \frac{\sqrt{\left(\frac{B}{2} + x\right)^2 + y^2} - \sqrt{\left(\frac{B}{2} - x\right)^2 + y^2}}{\sqrt{\left(\frac{B}{2} + x\right)^2 + y^2} + \sqrt{\left(\frac{B}{2} - x\right)^2 + y^2}}. \tag{6.14}
\end{aligned} \right\}$$

Подставляя (6.12), (6.13), (2.3) и (6.14) в (6.11), получим

$$\begin{aligned}
D_2(\psi_2) - D_1(\psi_1) &= \frac{10^3}{c} \left\{ \sqrt{\left(\frac{B}{2} + x\right)^2 + y^2} - \right. \\
&\left. - \sqrt{\left(\frac{B}{2} - x\right)^2 + y^2} \right\} [5,5 (|x| + 1) e^{-9,2|x|} + 4,8] e^{-1,3|x|} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 10 \lg \frac{\left(\frac{B}{2} + x\right)^2 + y^2}{\left(\frac{B}{2} - x\right)^2 + y^2} + K_0 \times \\
& \times \frac{\sqrt{\left(\frac{B}{2} + x\right)^2 + y^2} - \sqrt{\left(\frac{B}{2} - x\right)^2 + y^2}}{\sqrt{\left(\frac{B}{2} + x\right)^2 + y^2} + \sqrt{\left(\frac{B}{2} - x\right)^2 + y^2}}. \quad (6.15)
\end{aligned}$$

Множитель 10^3 в первом слагаемом введен для согласования размерности, так как размерность K_x , дБ/мс, а $\Delta\tau_{xy}$, с.

Выражение (6.15) определяет разность уровней, создаваемую парой излучателей с оптимальными характеристиками направленности для произвольной точки помещения. Так как условие (6.15) при идентичных громкоговорителях каналов всегда выполняется на оси симметрии (и с некоторой погрешностью вблизи от нее), будем искать такую форму характеристики направленности, которая обеспечивала бы выполнение равенства (6.15) для слушателя, занимающего произвольное положение на линии, перпендикулярной оси симметрии (например, линия df на рис. 6.7, находящаяся на расстоянии y_0 от линии базы). Для того чтобы обеспечить стабилизацию звуковой панорамы при смещении как влево, так и вправо от оси симметрии, очевидно, что характеристика направленности левого громкоговорителя должна соответствовать зеркальному отражению характеристики правого. Из выражения (6.15) следует, что существует множество различных форм оптимальной характеристики направленности (так как задается разность факторов направленности).

Однако не следует забывать, что в результате этих расчетов должна быть создана акустическая система с характеристиками направленности, по возможности близкими к оптимальным, а далеко не всякая форма оптимальной характеристики направленности может быть реализована на практике. Для того чтобы искомая характеристика направленности была по возможности монотонной функцией ψ и не имела резких перегибов в районе ψ_0 , желательно, чтобы требуемая величина разности $D_2(\psi_2) - D_1(\psi_1)$ создавалась в равной мере увеличением $D_1(\psi_1)$ и уменьшением $D_2(\psi_2)$ для каждого за-

данного направления ψ относительно направлений ψ_{10}^1 или ψ_{20} , т. е.

$$D_1(\psi_1) - D_1(\psi_{10}) = -[D_2(\psi_2) - D_2(\psi_{20})].$$

Считая, что характеристики направленности обоих излучателей идентичны по форме, т. е. $D_1(\psi) = D_2(\psi) = D(\psi)$, получаем $D(\psi_1) + D(\psi_2) = 2D(\psi_0)$ или $D(\psi_0) = \frac{1}{2} [D(\psi_1) + D(\psi_2)]$. Если для удобства построения характеристики направленности величину $D(\psi_0)$ принять за 0 дБ², то $D(\psi_1) = -D(\psi_2)$. Окончательное выражение для оптимальной характеристики направленности (в логарифмическом масштабе) принимает вид

$$D_{\text{опт}}(\psi) = 5 \lg \frac{\left(\frac{B}{2} + x\right)^2 + y_0^2}{\left(\frac{B}{2} - x\right)^2 + y_0^2} + 4,65 \times \\ \times \frac{\sqrt{\left(\frac{B}{2} + x\right)^2 + y_0^2} - \sqrt{\left(\frac{B}{2} - x\right)^2 + y_0^2}}{\sqrt{\left(\frac{B}{2} + x\right)^2 + y_0^2} + \sqrt{\left(\frac{B}{2} - x\right)^2 + y_0^2}} + \\ + \frac{10^3}{2c} \left\{ \sqrt{\left(\frac{B}{2} + x\right)^2 + y_0^2} - \sqrt{\left(\frac{B}{2} - x\right)^2 + y_0^2} \right\} \times \\ \times [5,5(|x| + 1)e^{-9,2|x|} + 4,8]e^{-1,3|x|}. \quad (6.16)$$

Следует заметить, что угол ψ , зависящий от координат произвольной точки A , отсчитывается от линий, перпендикулярных линии базы, причем положительное направление отсчета этого угла для каждого громкоговорителя отмечено стрелками на рис. 6.7.

С помощью выражения (6.16) были рассчитаны оптимальные характеристики направленности для различных баз и различных расстояний до линии базы (т. е. для различных положений линии df на рис. 6.7). Результаты расчетов представлены на рис. 6.8 (для наглядности кривые перестроены таким образом, что их

¹ Величины ψ_{10} и ψ_{20} — направления на громкоговорители из точки на оси симметрии (с координатами 0, y_0).

² Обычно за 0 дБ принимают максимальное значение характеристики направленности; в данном случае положение максимума выясняется в процессе построения.

максимальные значения соответствуют 0 дБ. Из последнего рисунка следует, что акустические оси громкоговорителей должны пересекаться на оси симметрии под углом $80\text{--}120^\circ$ в зависимости от выбора базы и расстояния до линии полной компенсации (линии df). От этих величин зависит также и форма оптимальных характеристик.

При выводе формы оптимальных характеристик направленности рассматривалась только направленность громкоговорителей в горизонтальной плоскости, направленность в вертикальной плоскости не учитывалась. Последнее будет справедливо, если громкоговорители рас-

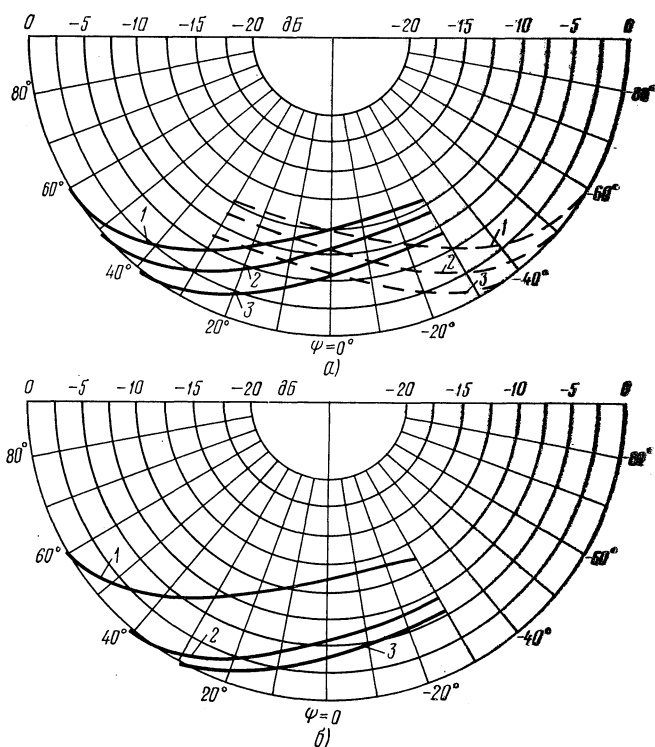


Рис. 6.8. Оптимальные характеристики направленности для правого (сплошные линии) и левого (пунктирные линии) громкоговорителей двухканальной акустической системы: а — для разных баз при $y_0 = 2$ м: 1 — $B = 2,8$ м; 2 — $B = 2,4$ м; 3 — $B = 1,8$ м; б — для разных y_0 при $B = 1,8$ м: 1 — $y_0 = 1$ м; 2 — $y_0 = 2$ м; 3 — $y_0 = 3$ м

положены на высоте головы слушателя или не обладают заметной направленностью в вертикальной плоскости. В общем случае разность интенсивностей в заданной точке поля может быть обеспечена за счет разности факторов направленности громкоговорителей не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскостях. В этом случае методика вывода сохраняется, однако расчет становится более громоздким и эффект расширения зоны будет зависеть от высоты установки громкоговорителей.

6.6. Зона стереоэффекта и баланс громкости в системах с оптимальной направленностью

Оптимальные характеристики направленности (см. рис. 6.8) обеспечивают полную компенсацию пространственных искажений только на линии df (см. рис. 6.7). Для всех остальных точек звукового поля происходит неполная компенсация, в результате чего в этих точках неизбежно существуют пространственные искажения, однако их величины значительно меньше, чем в системах обычного типа. Преобразовав выражение (6.11), можно определить зону стереоэффекта для воспроизводящих систем любого типа. Для этого, задавшись допустимой величиной пространственных искажений (например, $\pm 10\% B$), что соответствует разбалансу интенсивностей $\Delta L_{\text{ЭКВ}} = 3$ дБ), определим координаты точек, в которых эквивалентный разбаланс $|\Delta L_{\text{ЭКВ}}| = 3$ дБ, или

$$\left| D_2(\psi_2) - D_1(\psi_1) + \Delta L'_{xy} + K_x \Delta \tau_{xy} + K_0 \frac{2\Delta S}{B} \right| = 3 \text{ дБ.} \quad (6.17)$$

Решая это уравнение относительно x (подставляя различные значения y и соответствующих факторов направленности), получим координаты точек, ограничивающих зону стереоэффекта для любой двухканальной системы воспроизведения.

На рис. 6.9а для сравнения представлены границы зоны стереоэффекта для системы обычного типа 1 и системы с оптимальной направленностью 2. Как видно, зона стереоэффекта последней системы во много раз больше, чем для обычной, причем соотношение площадей этих зон в значительной мере определяется размерами помещения, выбором величин B и y_0 — расстояния до линии полной компенсации. Интересно отметить, что

для слушателей, расположенных на расстоянии $y < y_0$, кажущиеся источники смещены в том же направлении от центра базы, что и слушатель, т. е. имеем область

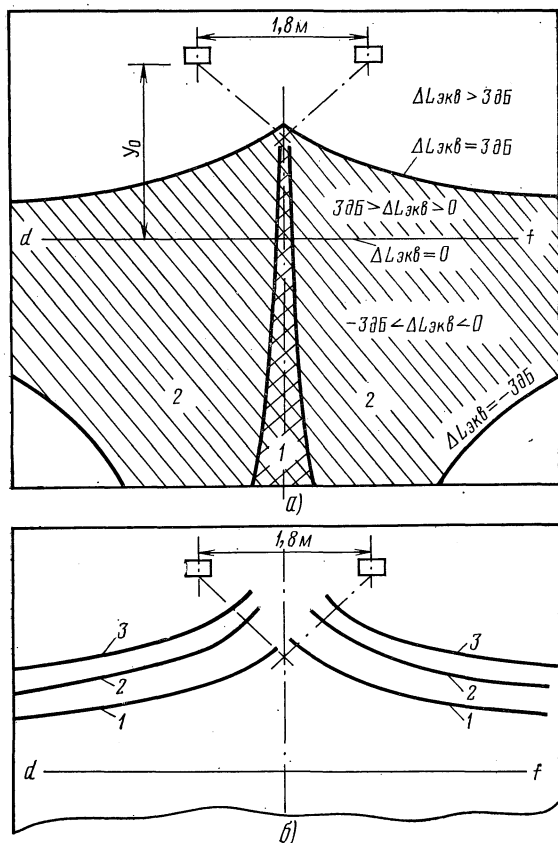


Рис. 6.9. Зоны пространственных искажений:
 а — зона 10-процентных пространственных искажений ($\Delta L_{\text{экв}} = 3$ дБ) для обычной 1 и оптимальной 2 систем воспроизведения; б — ближние границы зон с различными величинами пространственных искажений для оптимальной системы:
 1 — $\Delta L_{\text{экв}} = 3$ дБ; 2 — $\Delta L_{\text{экв}} = 6$ дБ; 3 — $\Delta L_{\text{экв}} = 12$ дБ

недостаточной компенсации ($0 < \Delta L_{\text{экв}} < 3$ дБ); для $y > y_0$ кажущиеся источники смещены в противоположную сторону — область избыточной компенсации

($0 > \Delta L_{\text{экв}} > -3$ дБ). Последняя область занимает наибольшую часть зоны стереоэффекта.

Если допустима большая величина пространственных искажений, то для расчета границ зоны стереоэффекта следует правую часть выражения (6.17) заменить соответствующей величиной эквивалентного разбаланса $\Delta L_{\text{экв}}$. Таким образом можно рассчитать, как меняется

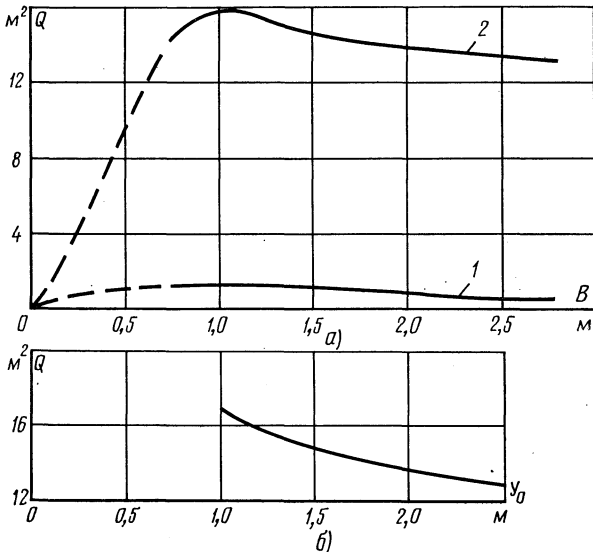


Рис. 6.10. Площадь зоны стереоэффекта [с учетом (6.4) и (6.17) в зависимости от параметров системы воспроизведения (в помещении 20 м^2):

a — влияние базы для системы обычного типа 1 — и оптимальной 2 при $y=2$ м; *б* — влияние y_0 (при $B=2,4$ м) для оптимальной системы

форма зоны стереоэффекта в зависимости от величины допустимых пространственных искажений. На рис. 6.9б представлены границы зон, в пределах которых $\Delta L_{\text{экв}}$ не превышает ± 3 , ± 6 и ± 12 дБ, что соответствует максимальным смещениям центрального источника на $\pm 0,2 B/2$, $\pm 0,5 B/2$, $\pm 0,8 B/2$.

Влияние величины y_0 при расчете оптимальных характеристик направленности (при $B=\text{const}$) иллюстрируется рис. 6.10б. Уменьшение y_0 приводит к почти пропорциональному увеличению площади зоны стерео-

эффекта, однако для этого потребуется существенное увеличение направленности излучателей, как следует из рис. 6.8. Лучше всего величину y_0 выбирать из условия $y_0 \approx 0,86B$, что соответствует условиям оптимального слушания (угол $2\varphi_0 \approx 60^\circ$ при расположении слушателя на оси симметрии).

Рассмотрим зависимость зоны стереоэффекта от размера базы (при $y_0 = \text{const}$). Приведенные на рис. 6.10а кривые показывают, что с увеличением базы площадь зоны стереоэффекта несколько уменьшается. Такая же тенденция наблюдалась и для систем обычного типа, однако в последнем случае зона стереоэффекта была несоизмеримо меньше.

При рассмотрении стереофонических свойств воспроизводящих систем обычного типа отмечалось, что при асимметричном положении слушателя нарушается соотношение интенсивностей отдельных кажущихся источников [см. выражение (3.18)]. Расчеты, проведенные для тех же условий, но при оптимальных характеристиках направленности, показали следующее. При интенсивной стереофонии различия по интенсивности для прямого звука между отдельными КИЗ незначительны, например для крайних источников они составляют менее 4 дБ, в то время как для систем обычного типа эти различия возрастают до 10 дБ. Для временной стереофонии различия по интенсивности между отдельными кажущимися источниками остаются такими же, как и в системах обычного типа, однако интенсивности всех источников звука меньше отличаются от соответствующих интенсивностей при симметричном положении слушателя (так как абсолютное значение δL меньше, чем для систем обычного типа, — соответственно 6 и 10 дБ согласно рис. 6.11). Во всех остальных случаях, т. е. при воспроизведении программ, записанных по системе XY или по комбинированной системе, гипотетическая оптимальная система воспроизведения¹ по сравнению с системой обычного типа будет обладать явно выраженным преимуществом с точки зрения музыкального баланса.

Представленные выше числовые данные и графики (рис. 6.11), полученные с помощью (3.19) и (3.20) с

¹ Оптимальной системой воспроизведения в дальнейшем для краткости будем называть акустическую систему, обеспечивающую максимально возможную зону стереоэффекта (т. е. оптимальной с точки зрения передачи пространственной информации).

учетом рис. 6.8, приведены в качестве примера и относятся к определенному расположению слушателя и излучателей, для которого в системах обычного типа пространственные искажения и изменение баланса громко-

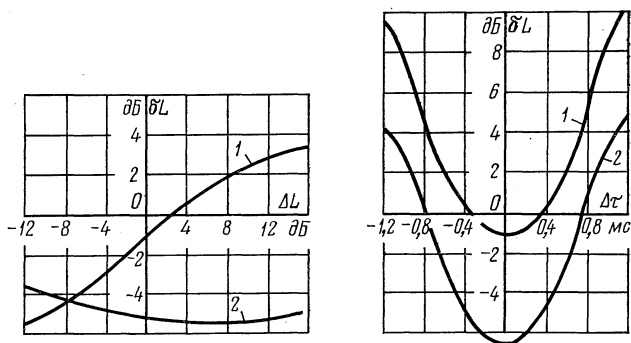


Рис. 6.11. Изменение интенсивности КИЗ при асимметричном положении слушателя: слева — для интенсивностной, справа — для временной стереофонии; 1 — система обычного типа; 2 — система с оптимальной направленностью

сти достигают максимальных значений ($x=B/2$; $y \approx \approx 0,86B$). При всех других значениях x при $y = \text{const}$ различие по интенсивности звучания кажущихся источников будет меньше; при уменьшении y при $x = \text{const}$ различие возрастает.

6.7. Пути создания излучателей с оптимальной направленностью

В качестве одного из методов создания излучателей с оптимальной направленностью весьма простым представляется использование подходящего участка характеристики направленности существующего громкоговорителя. Практически это может быть достигнуто выбором угловых положений акустических осей обоих громкоговорителей. Для экспериментальной проверки этого метода излучатели макетной системы типа 4ГД-28 в прямоугольном оформлении были ориентированы так, что их акустические оси пересекались под углом 100° при базе 2,4 м (в соответствии с рис. 6.8). Испытания такой системы при воспроизведении музыкальных программ показали следующее.

1. Для некоторых звучаний КИЗ сохраняет свое положение при асимметричном положении слушателя, однако для большинства источников компенсация оказывается или недостаточной (для звучаний нижнего регистра и речи), или избыточной (для звучаний верхнего регистра). В соответствии с этим часть кажущихся источников смещалась в направлении смещения слушателя, другая часть — в противоположном направлении.

2. При асимметричном положении слушателя центральные КИЗ локализованы весьма неопределенно, в ряде случаев наблюдалось «раздвоение» звучания, когда звучания верхней и нижней частей спектра локализовались в разных направлениях. Сильно искажался баланс громкости — дальние источники были громче ближних. Уменьшение угла, под которым пересекались акустические оси громкоговорителей, вызывало некоторые количественные изменения, но качественно картина осталась той же. Большинство слушателей отмечали, что локализация при асимметричном приеме сильно зависит от частоты (как при псевдостереофоническом воспроизведении). Причиной всех этих недостатков является сильно выраженная частотная зависимость характеристик направленности существующих громкоговорителей. Объективные испытания рассмотренного выше макета показали, что направленность, близкая к оптимальной, достигается только на частотах порядка 1000 Гц; на более низких и более высоких частотах направленность заметно отличается от оптимальной.

Создание излучателей с частотонезависимой характеристикой направленности является весьма сложной задачей. Однако известно, что не все области натуральных звучаний в одинаковой мере влияют на положение кажущегося источника. Так как энергия спектра любого натурального звучания распределена по частоте неравномерно (как правило, основная ее часть сосредоточена в диапазоне 200—1500 Гц), то естественно, что наибольшая интенсивностная разность (и соответственно смещение КИЗ) будет наблюдаться в том же диапазоне частот. Поэтому задача создания громкоговорителей с оптимальной направленностью несколько упрощается за счет снижения требований к форме характеристики направленности на самых низких и высоких частотах. Не следует при этом забывать, что значительное расхождение характеристик направленности на средних и высоких частотах приводит к нечеткой локализации и даже

может вызвать «раздвоение» КИЗ. Направленность на низких частотах, меньших 250 Гц, мало сказывается на стабилизации стереопанорамы еще и потому, что сигналы этих частот не локализируются.

Естественная направленность существующих головок (например, типа 1ГД-36, 2ГД-19М, 3ГД-1, 4ГД-45) громкоговорителей (с акустическим экраном) приближается к оптимальной только на частотах порядка 1—2 кГц. В связи с этим рассмотрим возможные методы получения заданной направленности на возможно более низких частотах.

Известно, что направленность излучения является результатом интерференции звуковых волн, приходящих от различных участков излучающей поверхности в рассматриваемую точку с запаздыванием, определяемым разностью пройденных путей. Поэтому для значительного ослабления суммарного сигнала в рассматриваемой точке звукового поля необходимо, чтобы величины этих запаздываний были соизмеримы с половиной периода излучаемого колебания. Иначе говоря, излучатель (или совокупность излучателей) обладает направленностью излучения в том случае, когда размер излучающей поверхности (или протяженность совокупности нескольких излучателей) соизмерим с длиной волны излучаемого сигнала. Так, например, излучатель будет направленным на частоте 250 Гц ($\lambda \approx 1,36$ м) в том случае, если размер излучающей поверхности имеет порядок около 1 м. Естественно, что такие громкоговорители обладали бы недопустимо большими габаритами. Поэтому на практике приходится ограничивать направленное излучение частотами порядка 350—400 Гц ($\lambda \approx 0,8$ м). Так как даже на этих частотах существующие громкоговорители практически не обладают направленностью, в системе с расширенной зоной (СРЗ) стереоэффекта приходится применять дополнительные фокусирующие устройства.

1. Фокусирующие отражатели параболической формы, аналогичные применяемым в технике СВЧ. Наличие громоздких отражателей не позволяет использовать этот принцип для построения бытовых стереоустановок. Тем не менее имеются сведения [120] о практическом использовании таких конструкций в акустических системах.

2. Головка громкоговорителя без экрана, эквивалентная так называемому дублету, т. е. противофазной паре

точечных равномошных источников. Интересно отметить, что в этом случае на низких и средних частотах (где источник можно считать точечным) характеристика направленности $\mathcal{D}(\psi) = \cos \psi$ и не зависит от частоты. Получающаяся при этом направленность близка к оптимальной для баз $B = 1,5 \div 1,8$ м. Применять такие устройства для низких частот не следует из-за акустического «короткого замыкания», сильно снижающего эффективность излучения звука.

3. Рупорные громкоговорители, обладающие достаточно высокими качественными показателями при использовании их в относительно узком диапазоне частот. Возможно создание излучателей этого типа с характеристикой направленности, мало изменяющейся в диапазоне средних частот. Важным преимуществом рупорных излучателей является возможность уменьшать их габариты в 2—3 раза, сохранив прежнюю направленность (так называемые свернутые рупоры). Этот тип излучателей является весьма перспективным для создания многополосных акустических систем с оптимальной направленностью, однако для этого необходима разработка практических конструкций рупорных излучателей.

4. Групповые излучатели, представляющие собой распределенную в пространстве совокупность головок громкоговорителей. В том случае, когда все головки расположены вдоль линии и в одной плоскости, имеем так называемую линейную группу излучателей (ЛГИ). Формула расчета характеристик направленности ЛГИ на гармоническом сигнале широко известна, однако для реального вещательного сигнала моногармонический сигнал является слишком грубым приближением. Поэтому выведем общую формулу для ЛГИ на шумовом сигнале, которой и будем пользоваться при дальнейшем изложении.

Исходные данные. Линейная группа из n излучателей, расположенных с постоянным шагом d_0 . Каждый излучатель питается шумовым сигналом в полосе частот $\Delta f = f_2 - f_1$, причем спектральная плотность мощности постоянна в этой полосе частот:

$$\omega_0(f) = P_0/(f_2 - f_1) \text{ при } f_2 > f > f_1; \omega_0(f) = 0 \text{ при } f_1 > f > f_2.$$

Все излучатели питаются синфазно, но значения напряжений, подаваемых на каждый излучатель, зависят от координат последнего:

$$U_x = U_0 \Phi(x) f(t),$$

где $\varphi(x)$ — нормализованная функция, характеризующая распределение напряжения на излучателях ЛГИ; $f(t)$ — воспроизводимый сигнал (нормализованная функция); U_0 — действующее значение напряжения, подаваемого на ЛГИ. В дальнейшем предполагается сле-

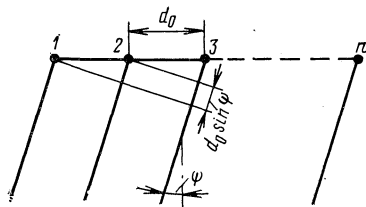


Рис. 6.12. Линейная группа излучателей

довать функцию φ , зависящей не только от x , но и от частоты, с тем, чтобы форма характеристики направленности оставалась постоянной при возрастании частоты. Отметим, что в ЛГИ x меняется дискретно, с шагом d_0 (рис. 6.12):

$$x = id_0,$$

где i — порядковый номер излучателя (первому излучателю удобно присваивать номер 0).

Если частотная характеристика звукового давления линейна в полосе частот $f_1 - f_2$, звуковое давление в любой точке наблюдения (создаваемое любым источником) пропорционально действующему напряжению U_x . На расстоянии l от линейной группы, где выполняется условие $l \gg nd_0$, линии, связывающие точку наблюдения с каждым излучателем, можно считать параллельными. Суммарное звуковое давление, создаваемое всей группой в точке наблюдения (на расстоянии l от центра группы):

$$p_{\Sigma} = \frac{p_0}{l} \sum_{i=0}^{n-1} a_i f(t - i \Delta\tau),$$

где p_0 — звуковое давление, создаваемое каждым из элементов ЛГИ на расстоянии 1 м (в направлении его акустической оси) при подаче на него напряжения U_0 ; a_i — значения $\varphi(x) = \varphi(id_0)$; $\Delta\tau$ — запаздывание сигналов k -го источника относительно источника с номером $k-1$.

Спектральная плотность амплитуд воспроизводимого сигнала (для любого элемента ЛГИ)

$$G_0(f) = p_0 \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt.$$

Спектр амплитуд суммарного сигнала в точке наблюдения

$$G(f) = \frac{p_0}{l} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^{n-1} a_i f(t - i\Delta\tau) e^{-i\omega t} dt = G_0(f) \frac{1}{l} \sum_{i=0}^{n-1} e^{-i\omega i\Delta\tau} a_i.$$

Спектр мощности сигнала в точке наблюдения

$$\begin{aligned} \omega(f) &= \overline{G(f) G^*(f)} = \frac{G_0(f)}{l} \sum_{i=0}^{n-1} a_i e^{-i\omega i\Delta\tau} \frac{G_0(f)}{l} \sum_{j=0}^{n-1} a_j e^{+i\omega j\Delta\tau} = \\ &= \frac{G_0^2(f)}{l^2} \sum_{i=0}^{n-1} a_i e^{-i\omega i\Delta\tau} \sum_{j=0}^{n-1} a_j e^{+i\omega j\Delta\tau} = \frac{\omega_0(f)}{l^2} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} a_i a_j \times \\ &\times \cos[\omega\Delta\tau(i-j)]. \end{aligned}$$

Спектральная мощность в точке наблюдения

$$\begin{aligned} P(f) &= \int_{f_1}^{f_2} \omega(f) df = \frac{P_0}{l^2 \Delta f} \int_{f_1}^{f_2} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} a_i a_j \cos[\omega_0\Delta\tau(i-j)] df = \\ &= \frac{P_0}{l^2} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} a_i a_j \frac{\sin[\pi\Delta\tau\Delta f(i-j)]}{\pi\Delta\tau\Delta f(i-j)} \cos[\omega_0\Delta\tau(i-j)], \end{aligned}$$

где $\omega_0 = \pi(f_1 + f_2)$.

Если точка наблюдения находится на нормали, проведенной через середину ЛГИ, то $\Delta\tau = 0$ и спектральная мощность достигает максимума

$$P_{\text{макс}}(f) = \frac{P_0}{l^2} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} a_i a_j.$$

По определению характеристики направленности

$$\mathcal{D}_{\text{гр}}(\psi) = \left| \sqrt{\frac{P(f)}{P_{\text{макс}}(f)}} \right| =$$

$$= \left| \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} a_i a_j \frac{\sin [\pi \Delta f \Delta \tau (i-j)]}{\pi \Delta f \Delta \tau (i-j)} \cos [\omega_0 \Delta \tau (i-j)]}{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} a_i a_j}} \right|. \quad (6.18)$$

Здесь величина угла ψ связана с $\Delta \tau$ (см. рис. 6.12)

$$\Delta \tau = \frac{d_0}{c} \sin \psi.$$

Обозначим выражение

$$\frac{\sin [\pi \Delta f \Delta \tau (i-j)]}{\pi \Delta f \Delta \tau (i-j)} \cos [\omega_0 \Delta \tau (i-j)] = R[\Delta \tau (i-j)] = \xi |i-j|,$$

так как эта функция четная.

С учетом принятых обозначений ф-ла (6.18) принимает окончательный вид:

$$\mathcal{D}_{\text{гр}}(\psi) = \left| \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} a_i a_j \xi |i-j|}{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} a_i a_j}} \right|. \quad (6.19)$$

Для частного случая равномоного питания излучателей линейной группы $\varphi(x) = 1$, $a_i = 1$ и выражение (6.19) несколько упрощается:

$$\mathcal{D}_{\text{гр}}(\psi) = \left| \frac{1}{n} \sqrt{n + 2 \sum_{k=1}^n (n-k) \xi(k)} \right|, \quad (6.20)$$

где

$$\xi(k) = \frac{\sin \left[k \pi \Delta f \frac{d_0}{c} \sin \psi \right]}{k \pi \Delta f \frac{d_0}{c} \sin \psi} \cos \left[k \omega_0 \frac{d_0}{c} \sin \psi \right].$$

С помощью последнего выражения были проведены расчеты характеристик направленности ЛГИ для случаев, представляющих практический интерес, т. е. для диапазона средних частот, приемлемых по конструктивным соображениям размеров ЛГИ, значений d_0 , выбранных с учетом размеров реальных головок. Расчеты проводились для равномоной группы именно потому,

что при этом получается наибольшая направленность. Целью этих расчетов было получить семейства кривых $\mathcal{D}_{гр}(\psi)$ в зависимости от конструктивных параметров

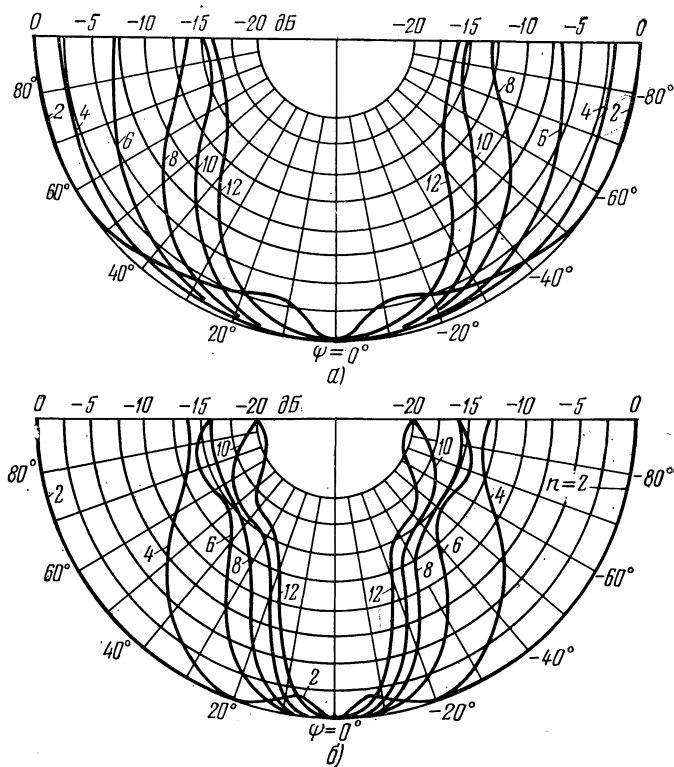


Рис. 6.13. Характеристики направленности ЛГИ для различного числа излучателей (шумовой сигнал в полосе 500—1000 Гц):
 а — при $d_0=0,05$ м; б — при $d_0=0,1$ м

группы, на основании которых можно было бы проектировать акустические системы с оптимальной направленностью.

Рассмотрим результаты проведенных расчетов.

А. Влияние протяженности линейной группы nd_0 при фиксированном частотном спектре сигнала.

На рис. 6.13а и б представлены характеристики направленности ЛГИ для значений $d_0=0,05$ м и $d_0=0,1$ м

при излучении шумового сигнала в полосе 0,5—1 кГц; для частот на октаву выше — 1—2 кГц при $d_0=0,1$ м — рис. 6.14. Влияние d_0 при $n=6$ иллюстрирует рис. 6.15 (полоса частот 500—1000 Гц).

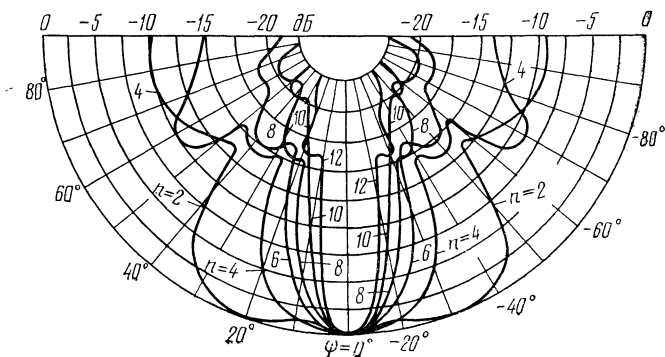


Рис. 6.14. Характеристики направленности ЛГИ для шумовой полосы 1—2 кГц при $d_0=0,1$ м

Из приведенных кривых видно, что с увеличением n при $d_0=\text{const}$ или d_0 при $n=\text{const}$ направленность группы увеличивается, причем этот эффект сильно зависит от частоты сигнала.

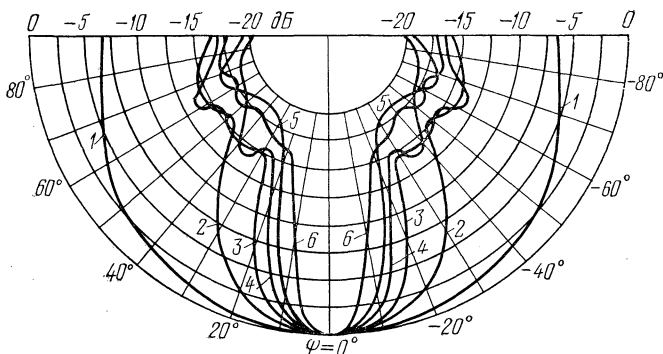


Рис. 6.15. Влияние шага d_0 в ЛГИ на характеристику направленности ($n=6$, полоса шума 500—1000 Гц):
 1 — $d_0=0,05$ м; 2 — $d_0=0,1$ м; 3 — $d_0=0,15$ м; 4 — $d_0=0,2$ м; 5 — $d_0=0,25$ м; 6 — $d_0=0,3$ м

Б. Частотная зависимость характеристики направленности ЛГИ иллюстрируется рис. 6.16 для $n=6$ и $d_0=0,1$ м.

В. Влияние числа излучателей группы при фиксированной длине группы ($nd_0 = \text{const}$) иллюстрируется рис. 6.17а и б.

Из всех рассмотренных случаев следует, что при минимальном числе излучателей ($n=2$) велик уровень бо-

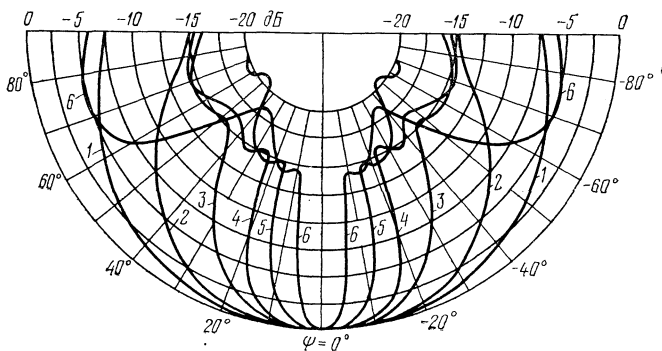


Рис. 6.16. Частотная зависимость направленности ЛГИ ($n=6$, $d_0 = 0,1$ м) для октавных полос шума:

1 — 250—500 Гц; 2 — 350—700 Гц; 3 — 500—1000 Гц; 4 — 700—1400 Гц; 5 — 1—2 кГц; 6 — 2—4 кГц

ковых лепестков диаграммы направленности. При $n > 4$ и $nd_0 = \text{const}$ форма главного лепестка характеристики направленности практически остается постоянной. Поэтому целесообразно выбирать $n = 3 \div 5$.

Обеспечив требуемую (оптимальную) направленность группового излучателя на нижней границе среднечастотного диапазона (300—350 Гц) определенным выбором значения nd_0 , следует затем принять меры к уменьшению направленности ЛГИ на более высоких частотах.

5. Акустические фокусирующие линзы типа «заполнителей поля» [24] в данном случае неприемлемы как из-за сложности конструктивного исполнения, так и из-за того, что требуемый эффект может быть достигнут только на определенном расстоянии от апертуры линзы, так как форма характеристики направленности зависит от расстояния до точки наблюдения.

Для практической реализации среднечастотного излучателя с оптимальной направленностью была предложена конструкция, состоящая из группового излучателя и пластинчатой акустической линзы (рис. 6.18в).

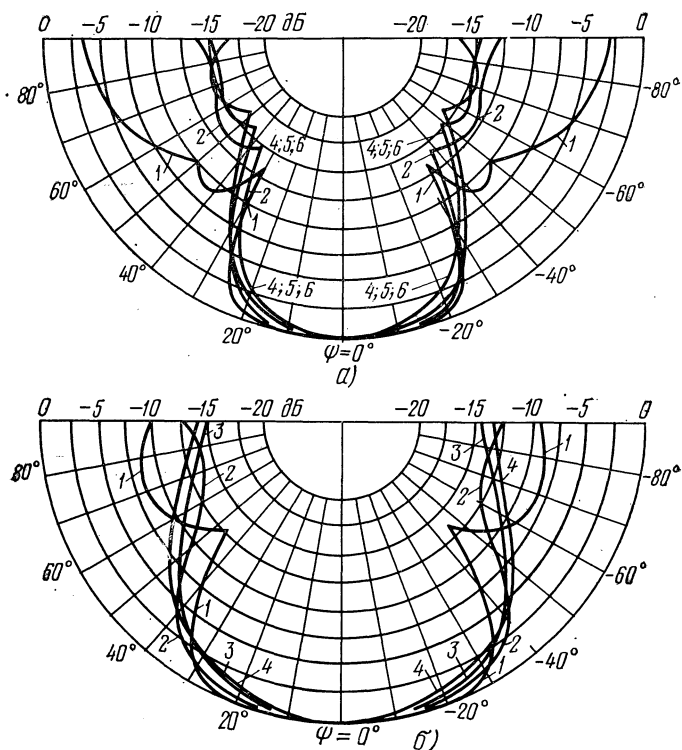


Рис. 6.17. Характеристики направленности ЛГИ при $nd_0=0,6 \text{ м} = \text{const}$:

а — для полосы шума 500—1000 Гц; б — 350—700 Гц:

1 — $n=2$, $d_0=0,3 \text{ м}$; 2 — $n=4$, $d_0=0,15 \text{ м}$; 3 — $n=6$, $d_0=0,1 \text{ м}$; 4 — $n=8$, $d_0=0,075 \text{ м}$;
5 — $n=10$, $d_0=0,06 \text{ м}$; 6 — $n=12$, $d_0=0,05 \text{ м}$

Общая направленность такой конструкции зависит от характеристик направленности отдельных элементов, а именно

$$\mathcal{D}_\Sigma(\psi) = \mathcal{D}_0(\psi) \mathcal{D}_{\text{гр}}(\psi) \eta(\psi), \quad (6.21)$$

где $\mathcal{D}_0(\psi)$ — характеристика направленности головки громкоговорителя (одиночного излучателя) с учетом оформления; $\mathcal{D}_{\text{гр}}(\psi)$ — характеристика направленности ЛГИ, состоящей из точечных (ненаправленных) излучателей, совпадающих с центрами реальных головок громкоговорителей; $\eta(\psi)$ — коэффициент направленности линзы.

Рассмотрим более подробно действие пластинчатой акустической линзы, установленной перед группой точечных равномошных источников звука (см. рис. 6.18а, точки 1—5). Для направления, совпадающего с направ-

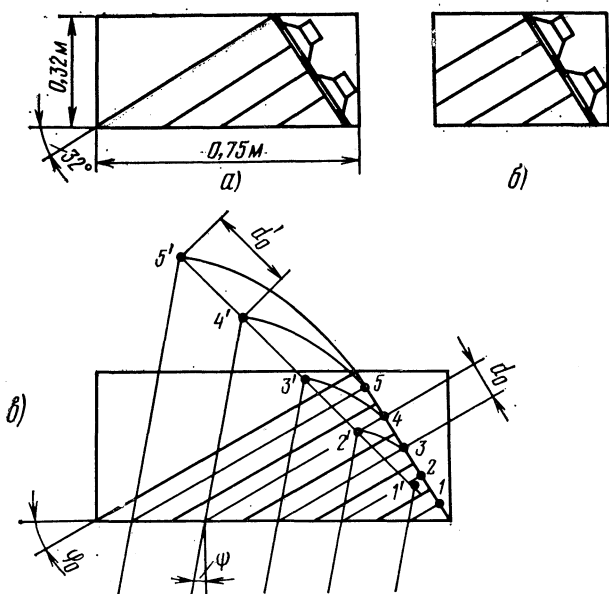


Рис. 6.18. Среднечастотное звено промкоговорителя с пластинчатой акустической линзой

лением пластин, последние не оказывают никакого воздействия на формирование суммарного сигнала в удаленной точке звукового поля¹. Для прочих направлений сигналы, поступающие из различных каналов, образованных соседними пластинами линзы, имеют сдвиг во времени, тем больший, чем больше угол ψ отклонения от нормали, проведенной через середину группового излучателя. Для наглядности такую конструкцию можно представить в виде эквивалентной линейной группы излучателей 1'—5', расположение которой в пространстве зависит от угла наблюдения ψ (см. рис.

¹ Для средних частот резонансные явления в полостях, ограниченных соседними пластинами линзы, можно не учитывать.

6.18в). Эквивалентные источники 1'—5' построены на том же расстоянии от апертуры линзы, что и реальные источники 1—5, но в направлении ψ , проведенном через точку наблюдения. Следует отметить, что расстояние между соседними эквивалентными источниками d'_0 превышает исходное значение d_0 , что и обуславливает увеличение направленности.

Таким образом, данная конструкция пластинчатой линзы как бы трансформирует длину ЛГИ в зависимости от угла, под которым расположена точка наблюдения.

Из геометрических построений на рис. 6.18в можно определить связь между величинами d_0 и d'_0 :

$$\frac{d'_0}{d_0} = \frac{1}{\sin \varphi_0} \sqrt{1 + \cos^2 \varphi_0 - 2 \cos \varphi_0 \sin \psi}, \quad (6.22)$$

где φ_0 — направление пластины линзы; ψ — направление на рассматриваемую точку звукового поля. Записать характеристику направленности ЛГИ с линзой [без учета собственной направленности $\mathcal{D}_0(\psi)$] можно следующим образом. Уже отмечалось, что эта конструкция эквивалентна ЛГИ с шагом d'_0 , зависящим от ψ . С учетом (6.22) выражение (6.20)¹ для случая синфазного и равномошного возбуждения излучателей примет вид

$$\mathcal{D}(\psi) = \left| \sqrt{n + 2 \sum_{k=1}^n (n-k) \frac{\sin \left[\frac{\pi \Delta f k d_0}{c \sin \varphi_0} (\cos \varphi_0 - \sin \psi) \right]}{\frac{\pi \Delta f k d_0}{c \sin \varphi_0} (\cos \varphi_0 - \sin \psi)}} \right| \times \cos \left[k \omega_0 d_0 \frac{\cos \varphi_0 - \sin \psi}{c \sin \varphi_0} \right]. \quad (6.23)$$

Зная направленность группового излучателя с линзой $\mathcal{D}(\psi)$ и без линзы $\mathcal{D}_{\text{гр}}(\psi)$, согласно (6.20) определим коэффициент направленности собственно линзы

$$\eta(\psi) = \frac{\mathcal{D}(\psi)}{\mathcal{D}_{\text{гр}}(\psi)} =$$

¹ При этом следует учесть, что в данной конструкции линейная группа излучателей повернута на угол $90^\circ - \varphi_0$.

$$\begin{aligned}
 &= \left\{ \frac{n+2 \sum_{k=1}^n (n-k) \frac{\sin \left[\frac{\pi \Delta f k d_0}{c \sin \varphi_0} (\cos \varphi_0 - \sin \psi) \right]}{\frac{\pi \Delta f k d_0}{c \sin \varphi_0} (\cos \varphi_0 - \sin \psi)} \times \rightarrow \right. \\
 &\quad \left. \frac{n+2 \sum_{k=1}^n (n-k) \frac{\sin \left[\frac{\pi \Delta f k d_0}{c} \cos (\varphi_0 + \psi) \right]}{\frac{\pi \Delta f k d_0}{c} \cos (\varphi_0 + \psi)} \times \rightarrow \right. \\
 &\quad \left. \rightarrow \times \cos \left[k \omega_0 d_0 \frac{\cos \varphi_0 - \sin \psi}{c \sin \varphi_0} \right] \right\} \cdot \\
 &\quad \left. \rightarrow \times \cos \left[k \omega_0 d_0 \frac{1}{c} \cos (\varphi_0 + \psi) \right] \right\}^{1/2} \cdot \quad (6.24)
 \end{aligned}$$

Величина $\eta(\psi)$ характеризует изменение в направленности ЛГИ при добавлении линзы. При расчете **общей** характеристики направленности $\mathcal{D}_\Sigma(\psi)$ [см. выражение

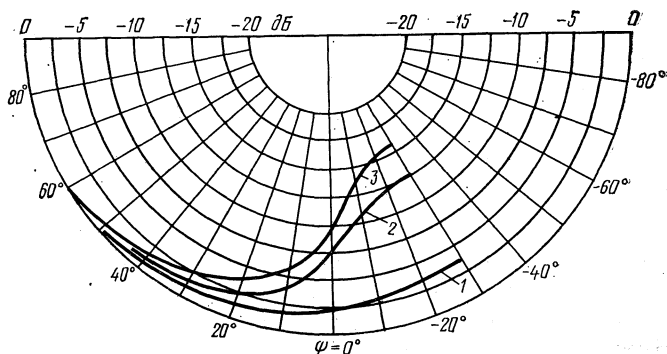


Рис. 6.19. Характеристики направленности на полосе шума 350—700 Гц:

1 — группового излучателя из двух головок, $d_0=0,1$ м; 2 — линзы — $\eta(\psi)$ ($\varphi_0=30^\circ$, $n=6$); 3 — общая характеристика направленности

(6.21)] при малых размерах линейной группы наиболее важным является множитель $\eta(\psi)$. Для наглядности на рис. 6.19 представлены характеристики $\mathcal{D}_{гр}(\psi)$, $\eta(\psi)$ и $\mathcal{D}_\Sigma(\psi)$, полученные для частного случая на шумовом сигнале. Такое сочетание пары головок громкогово-

9—221 257

рителей с линзой (размеры конструкции приводятся на рис. 6.18а) позволяет существенно уменьшить глубину конструкции за счет увеличения ее ширины. Другой вариант конструктивного решения (см. рис. 6.18б) позволяет существенно уменьшить и ширину конструкции, практически не ухудшая его направленные свойства. Последние объясняются тем, что при такой конструк-

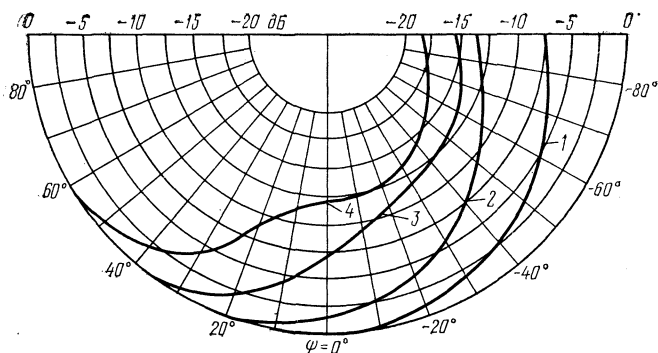


Рис. 6.20. Влияние угла наклона пластин на характеристику направленности линзы — $\eta(\psi)$ (при $n=6$; $d_0=0,05$ м, полоса шума 350—700 Гц):

1 — $\varphi_0=60^\circ$; 2 — $\varphi_0=45^\circ$; 3 — $\varphi_0=30^\circ$; 4 — $\varphi_0=20^\circ$

ции для произвольной точки наблюдения временные сдвиги между сигналами соседних каналов усеченной линзы остаются почти такими же, как в прежней конструкции.

Для выяснения количественной связи $\eta(\psi)$ с конструктивными параметрами линзы была приведена серия расчетов $\eta(\psi)$ по ф-ле (6.24) для различных значений n , d_0 , φ_0 и частотных свойств воспроизводимого сигнала. Ниже приводятся некоторые результаты этих расчетов.

А. Влияние угла наклона пластин φ_0 . Как следует из рис. 6.20, φ_0 определяет не столько направление максимального излучения, сколько форму характеристики направленности. Эффективное «обострение» характеристики направленности может быть достигнуто только при $\varphi_0 \leq 30^\circ$ (желательно $20\text{—}30^\circ$). Применение пластинчатых линз подобной конструкции при $\varphi_0 > 40^\circ$ неэффективно.

Б. Влияние размеров линзы иллюстрируется рис. 6.21. С увеличением nd_0 эффективность линзы возрастает, однако при $\varphi_0=30^\circ$ и для полосы шума 350—700 Гц увеличение $nd_0 > 0,3$ м нецелесообразно, так как для диапазона углов ψ , охватывающих область расположения слушателей ($\psi = -30 \div +60^\circ$), характеристика направленности изменяется незначительно.

В. Влияние числа пластин линзы n (рис. 6.22) определялось при $nd_0 = \text{const} = 0,3$ м при подаче шумового

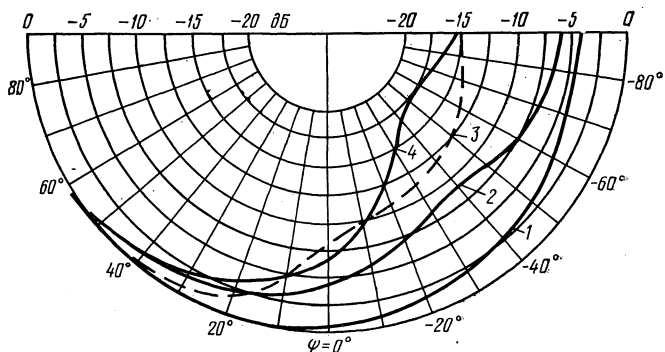


Рис. 6.21. Влияние размеров линзы (nd_0) на характеристику направленности — $\eta(\psi)$ (полоса шума 350—700 Гц):

1 — $d_0=0,016$ м, $n=6$, $nd_0=0,1$ м; 2 — $d_0=0,032$ м, $n=6$, $nd_0=0,2$ м; 3 — $d_0=0,063$ м, $n=3$, $nd_0=0,5$ м; 4 — $d_0=0,05$ м; $n=6$, $nd_0=0,3$ м

сигнала с частотой 500—1000 Гц. При увеличении числа пластин от 2 до 6 уменьшаются уровни боковых лепестков и направленность линзы при этом несколько увеличивается. При дальнейшем увеличении n (от 6 до 12) форма характеристики направленности практически не меняется.

Г. Влияние ширины спектра сигнала на форму характеристики направленности линзы иллюстрируется рис. 6.23. Для шумового сигнала в 1/3 октавы, рекомендуемого ГОСТ для измерения характеристик направленности, последние обладают значительной неравномерностью, обусловленной наличием боковых лепестков (см. рис. 6.23, кривая 1). Так как расположение и форма боковых лепестков сильно зависят от центральной частоты, применение столь узкополосных сигналов для оценки эффективности работы линзы нецелесообразно. Сигналы с очень широким спектром также непригодны,

так как отсутствие направленности в области низких частот сильно искажает форму характеристики направленности (см. рис. 6.23, кривая 5 для полосы шума

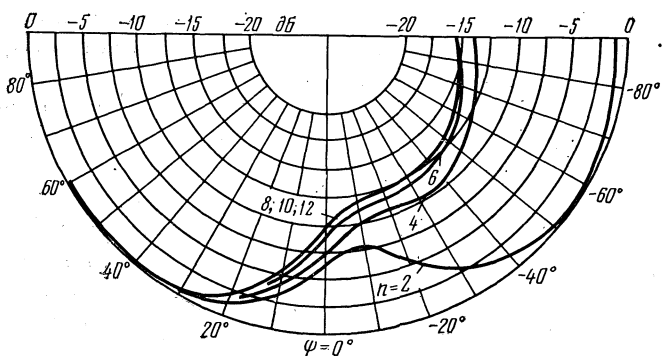


Рис. 6.22. Влияние числа пластин на характеристику направленности линзы $\eta(\psi)$ (для полосы шума 500—1000 Гц, $\varphi_0=30^\circ$; $nd_0=0,3$ м)

40—12 000 Гц). Наиболее удобно применение шумовых полос октавной ширины (см. рис. 6.23, кривая 3).

Д. Частотная зависимость характеристики направленности линзы иллюстрируется рядом кривых, постро-

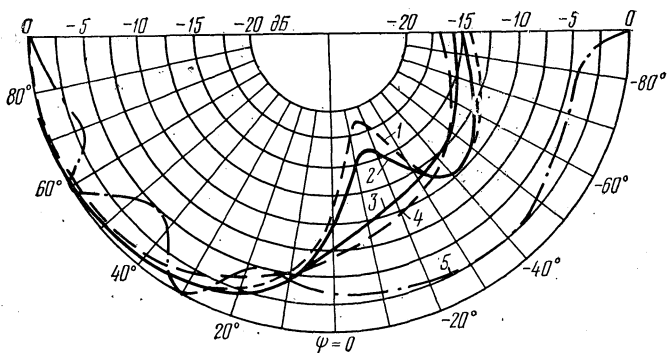


Рис. 6.23. Влияние ширины полосы частот на форму характеристики направленности линзы ($f_0=500$ Гц, $n=6$, $d_0=0,05$ м, $\varphi_0=30^\circ$):

1 — 1/3 октавы (445—560 Гц); 2 — 1/2 октавы (425—600 Гц); 3 — 1 октава (350—700 Гц); 4 — 2 октавы (250—1000 Гц); 5 — 9 октав (20—12 000 Гц)

енных для октавных полос шума с различными центральными частотами (f_0), рис. 6.24. С увеличением частоты от 140 до 500 Гц спад характеристики направлен-

ности в области $\psi = 0 \div 10^\circ$ увеличивается от 1 до 10 дБ, при дальнейшем увеличении частоты от 500 до 4200 Гц форма характеристики направленности в области $\psi = 0 \div \pm 60^\circ$ практически не изменяется. Таким образом, при воспроизведении большинства вещательных сигналов локализация кажущихся источников почти не будет зависеть от частоты. Для конструкции с большими габаритами форма характеристик направленности стабилизируется при более низких частотах. Однако не следует забывать, что с увеличением частоты более 600—800 Гц одиночная головка громкоговорителя уже не является точечным излучателем, а также увеличивается

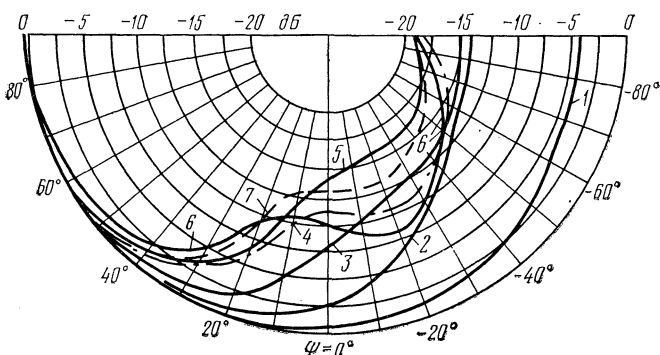


Рис. 6.24. Частотная зависимость характеристики направленности линзы ($\varphi_0 = 30^\circ$; $n = 6$; $d_0 = 0,05$ м) для октавных полос белого шума: 1 — 140—280 Гц; 2 — 280—540 Гц; 3 — 350—700 Гц; 4 — 550—1100 Гц; 5 — 700—1400 Гц; 6 — 1125—2250 Гц; 7 — 2100—4200 Гц

направленность группового излучателя $\mathcal{D}_{гр}(\psi)$. Поэтому с ростом частоты появляется новая проблема — уменьшение избыточной направленности. Первым и наиболее простым способом, позволяющим уменьшать частотную зависимость $\mathcal{D}_{\Sigma}(\psi)$, является создание многополосных систем, в которых излучатели каждой из частотных полос имели бы направленность, близкую к оптимальной (при различной конструкции для каждой из частотных полос). Однако на практике из экономических соображений не применяются акустические системы с числом полос более пяти (наиболее распространены двух- и трехполосные системы). Но даже для трехполосной системы не удается обеспечить постоянство формы характеристик направленности в области средних частот, особенно вблизи верхней границы. Поэтому прихо-

дится искать компромиссное решение (создать оптимальную направленность только на частотах порядка 500 Гц, что практически обеспечит стабилизацию стереопанорамы для большинства натуральных звучаний) или принимать дополнительные меры по снижению направленности на более высоких частотах.

Уменьшение частотной зависимости характеристик направленности может быть достигнуто следующими способами:

1) разработкой новых специальных типов излучателей звука (например, рупорных или электростатических [115] громкоговорителей). Этот способ, по-видимому, является наиболее перспективным;

2) применением групповых излучателей (в том числе с линзой), возбуждаемых неравными сигналами, соотношение которых меняется с частотой. Для практической реализации указанного метода пригодны существующие головки громкоговорителей, поэтому он может быть использован уже в ближайших разработках акустических систем.

Возможны две разновидности этого метода.

1. Изменение с частотой числа работающих синфазных и равномошных источников. Например, для реализации оптимальной характеристики направленности на частотах 360—700 Гц требуется $n=6$, $d_0=0,1$ м (см. рис. 6.17а, кривая 3). В полосе частот 500—1000 Гц эта конструкция обладает большей направленностью (см. кривую при $n=6$ на рис. 6.13б). Однако если отключить два крайних излучателя (т. е. положить $n=4$), то характеристика направленности не будет отличаться от требуемой (оптимальной) и в диапазоне частот 500—1000 Гц (кривая при $n=4$ на рис. 6.13б). При дальнейшем увеличении частоты число излучателей должно еще уменьшаться таким образом, чтобы характеристика направленности оставалась постоянной.

Однако такой метод применять нежелательно по двум причинам: во-первых, при плавном изменении частоты сигнала на граничных частотах характеристика направленности группы будет изменяться скачкообразно (вследствие изменения числа n); во-вторых, для обеспечения постоянства характеристик направленности на верхних частотах размер d_0 должен быть достаточно малым, что повлечет за собой значительное увеличение числа громкоговорителей n [при переменном шаге группы $d_0 \neq \text{const}$ последнее замечание несущественно, однако расчетная ф-ла (6.19) для такого случая не годится].

2. Более удобно изменять не число работающих излучателей с частотой (тем более, что их число ограничено значением $n=3 \div 5$), а плавно уменьшать величины напряжений, подаваемых на отдельные излучатели с повышением частоты. Для этого можно предложить неравномошное питание группового излучателя с тем, чтобы закон распределения напряжения $\varphi(x)$ зависел и от частоты. Тогда с помощью фильтров можно добиться того, чтобы

с ростом частоты уменьшались напряжения, подаваемые на крайние головки, что можно считать эквивалентным уменьшению длины ЛГИ. В этом случае, зная закон $\varphi(x)$, можно по ф-ле (6.18) рассчитать характеристику направленности. Задача аналитического определения $\varphi(x, f)$ в общем виде с тем, чтобы $\mathcal{D}_\Sigma(\psi)$ не зависела от частоты, лишена смысла, так как необходимо учитывать естественную направленность головок применяемого типа.

Создание высокочастотного звена с оптимальной направленностью упрощается благодаря тому, что на частотах 5000—6000 Гц требуемая направленность обеспечивается определенной ориентацией акустической оси одиночного излучателя ($\varphi_0 = 50 \div 60^\circ$ для головок ЗГД-31 и ЗГД-15М). Избыточное увеличение направленности на более высоких частотах (8000—16 000 Гц) может быть устранено применением, например, рассеивающей акустической линзы, состоящей из нескольких расходящихся пластин [9].

6.8. Эффективность метода компенсации

Возможность стабилизации пространственной панорамы в системах с направленным излучением была проверена на ряде различных макетов и не вызвала сомнений. Однако оставалась необходимость комплексной проверки данного метода (с точки зрения не только локализации, но и других особенностей стереовосприятия), так как существовали опасения, что направленное излучение может вызвать какие-либо аномалии при восприятии реальных стереопрограмм.

Для этого были проведены субъективные прослушивания двух макетных стереосистем, моделирующих систему обычного типа в систему с оптимальной направленностью. В процессе этих испытаний были проверены не только стабилизирующие свойства систем (которые оценивались по пространственным характеристикам), но и изменения в балансе громкости отдельных источников при различных положениях слушателей. В качестве критерия комплексной оценки качества стереовосприятия была принята предпочтительность звучания одной из систем.

Субъективное прослушивание разработанной макетной системы проводилось при непосредственном сравнении ее с аналогичной (но применяемым громкоговорителем) системой обычного типа. Для уменьшения тембральных различий обе системы (в дальнейшем для краткости будем именовать их как «обычную» и «опти-

мальную») имели общие звенья высоких и низких частот, но различные по конструкции среднечастотные звенья.

Для «обычной» системы это звено состояло из двух громкоговорителей типа 1ГД-28, расположенных фронтально (акустические оси ориентированы перпендикулярно линии базы). Среднечастотное звено «оптимальной» системы состояло из двух таких же громкоговорителей с линзой, акустическая ось которой была ориентирована под углом 30° к линии базы (см. рис. 6.18а). Для того чтобы направленность на верхних частотах в данной серии экспериментов не влияла на получаемые результаты, соответствующие излучатели (общие для обеих систем) были выполнены практически ненаправленными до частот порядка 10—12 кГц. Каждое из звеньев макетных систем конструктивно было выполнено в виде отдельного ящика с соответствующими громкоговорителями и разделительными фильтрами. Последние имели две частоты разделения: 250 Гц (низкие и средние) и 3000 Гц (средние и высокие), причем крутизна скатов частотных характеристик составляла 9—12 дБ на октаву. Все звенья, относящиеся к одному каналу, устанавливались по вертикали (одно над другим) с тем, чтобы сравниваемые системы имели общую базу. Переключение систем «обычная» — «оптимальная» производилось экспериментатором дистанционно. При этом схема коммутации обеспечивала переключение среднечастотных звеньев в обоих каналах и лампочек цветовой индикации.

В качестве испытательных программ использованы шесть музыкальных отрывков длительностью от 2 до 3 мин, различающихся по жанру и по характеру пространственной панорамы. Кроме того, для определения пространственных характеристик применялась речевая программа. Эксперты, участвовавшие в прослушивании, располагались как на оси симметрии, так и по обе стороны от нее (напротив воспроизводящих агрегатов).

I серия экспертиз. Целью проведения этой серии было определение положений кажущихся источников при слушании в различных точках поля. Эти данные использовались для построения пространственных характеристик системы.

II серия экспертиз. Определялось расположение на линии базы наиболее громких КИЗ.

III серия экспертиз. Для каждой из воспроизводимых программ эксперты должны были выбрать лучший вариант воспроизводящей системы (экспертизы на предпочтительность звучания).

IV серия экспертиз. Ознакомившись с особенностями звучания обоих вариантов систем, эксперты должны были при выключенной цветовой индикации решить, какая из систем включена в данный момент (экспертизы на опознавание). Результаты, полученные в этой серии, позволяют контролировать степень различия в звучании обеих систем, в значительной мере увеличивая достоверность данных, полученных в экспертизах на предпочтительность.

Для каждого из шести мест расположения экспертов на всех шести программах было получено по 50—60 экспертопоказаний. Лица, знакомые с особенностями сравниваемых систем, в экспертизах на предпочтительность и опознавание не участвовали.

Обработка результатов I серии экспертиз показала следующее. Несмотря на то что обе системы различаются по направленности только в диапазоне частот 300—3000 Гц, их пространственные характеристики резко расходятся (рис. 6.25).

Как видно из приведенных кривых, для сравнительно низкочастотного сигнала (речь) все три источника при «оптимальной» системе тоже смещаются в сторону смещения слушателя, однако в значительно меньшей степени, чем при «обычной». Неполная стабилизация положения источников в «оптимальной» системе объясняется отсутствием требуемой направленности на высоких частотах, ибо среднечастотные звенья «оптимальной» системы, включенные отдельно, обеспечивали в тех же условиях полную стабилизацию.

Результаты II серии экспертиз представлены в виде гистограмм, характеризующих среднее распределение громкости звучания по линии базы для различных мест и различных программ. Наиболее характерные гистограммы представлены на рис. 6.25.

Анализ всех полученных гистограмм позволяет сделать следующие выводы.

1. Для центральных мест (на оси симметрии) обе системы не имеют различий в распределении громкости источников вдоль линии базы. Этого и следовало ожидать при правильной установке стереобаланса.

2. Для слушателей на боковых местах (напротив излучателей) различие в балансе громкости оказалось весьма существенным. Так, для «обычной» системы на-

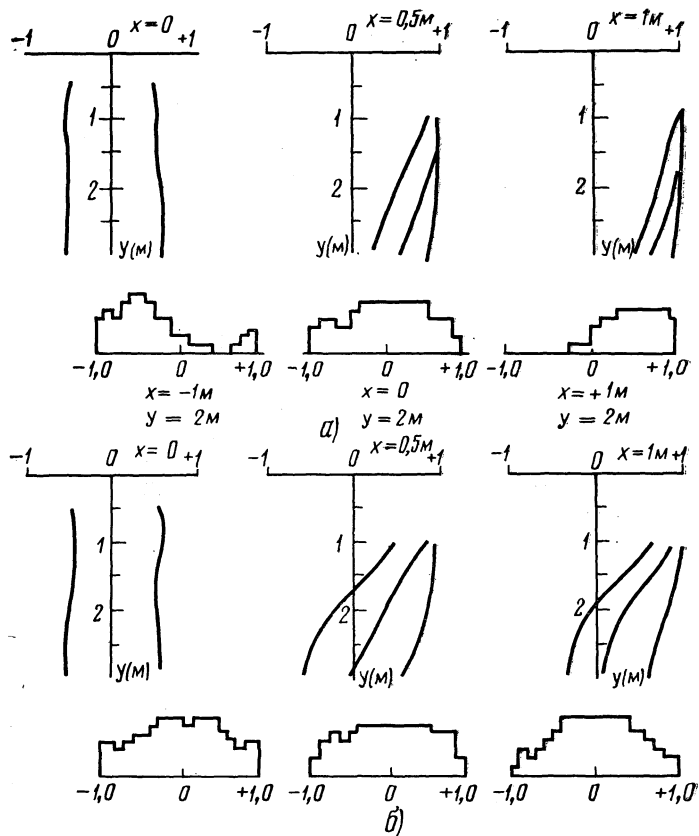


Рис. 6.25. Пространственные характеристики макета системы (вверху) и распределение громкости кажущихся источников на линии базы при различном расположении слушателей:

a — для «обычной» системы; *б* — для «оптимальной» системы

иболее громкими источниками оказались те, которые локализовались в районе ближайшего к слушателю края базы. В случае «оптимальной» системы распределение громкости источников по базе оставалось практи-

чески постоянным при любом местоположении слушателя.

Результаты экспертиз на предпочтительность и опознавание зависят как от мест расположения слушателей, так и от воспроизводимой программы. Результаты этой серии экспертиз позволяют сделать следующие выводы:

Исследуемая система с уменьшенными пространственными искажениями при непосредственном сравнении ее звучания с «обычной» системой предпочитается подавляющим числом экспертов на всех программах и на всех местах, исключая места на оси симметрии, где обе системы оказались равноценными (предпочтительность 56% и 55% правильных опознаваний).

Различие между системами наиболее сильно проявляется для мест, находящихся напротив громкоговорителей системы ($x = \pm 1$ м, $y = 2$ м), в этих случаях предпочтительность «оптимальной» системы и процент правильных опознаваний достигают максимальных значений (соответственно 73 и 79%).

Эксперты, предпочитавшие «обычную» систему на боковых местах, отмечали, что их выбор обусловлен тембральным различием систем. Это было вызвано тем, что при подготовке экспертиз уровень сигнала, подаваемого на среднечастотные звенья «оптимальной» системы, несколько снижался для того, чтобы слушатели на оси симметрии не ощущали различий по тембру и громкости при переключении систем.

Проведенные экспертизы показали следующее.

1. Рассматриваемая воспроизводящая система создает устойчивую стереофоническую панораму при воспроизведении реальных вещательных программ. По мнению большинства слушателей нет заметного различия между восприятием на оси симметрии и в стороне от нее.

2. Восстановление пространственной звуковой панорамы для мест, находящихся вне оси симметрии, не ограничивается только локализационной стороной стереоэффекта, а проявляется и в других его особенностях, что находит свое выражение в значительном увеличении предпочтительности.

3. Предлагаемый метод стабилизации пространственной панорамы позволяет существенно увеличить зону стереоэффекта, не вызывая каких-либо изменений в качестве звучания.

6.9. Испытание образцов стереофонических систем с оптимальной направленностью

Испытание макета стереофонической системы с направленным излучением в области только средних частот (см. § 6.8) показало, что даже в этом случае наблюдается существенное улучшение качества стереовосприятия. Для получения необходимых рекомендаций для конструирования лабораторных образцов стереофонических систем был создан ряд промежуточных макетных систем, с помощью которых производилась отработка звеньев на высоких, средних и низких частотах по направленности и тембру.

При разработке низкочастотного звена к последнему предъявлялись те же требования, что и при проектировании систем обычного типа и монофонических систем; никаких специфических требований не предъявлялось.

Было испытано среднечастотное звено с укороченной линзой и исследована возможность применения такой конструкции излучателей не только в области средних, но и верхних частот (двухполосный вариант). В этом случае для уменьшения направленности звена на верхних частотах один из громкоговорителей пары (расположенный дальше от передней панели) был шунтирован емкостью ($C_{ш}$ на рис. 6.26). В этом случае на приведенной схеме отсутствуют высокочастотное звено и элементы фильтра C_3L_3 , препятствующие проникновению высокочастотных сигналов на громкоговорители Gr_2 и Gr_3 .

При отработке конструкции высокочастотного звена в первую очередь определялась минимальная частота, при которой выбранный излучатель обладает направленностью, близкой к оптимальной. Эта частота и выбиралась в качестве верхней частоты разделения. Далее, изменяя ориентацию акустических осей высокочастотных излучателей, определялось их положение, при котором наблюдается наилучшая стабилизация центрального источника при подаче реального вещательного сигнала.

На основании графиков рис. 6.13—6.24 с учетом рис. 6.8 можно выбирать параметры конструкции среднечастотного звена. Применение нескольких малогабаритных головок громкоговорителей ($n=3-4$) дает возможность обеспечить меньшую зависимость характеристики направленности от частоты, если питать каждую из головок (кроме первой) через отдельные фильтры с различными частотами среза. В простейшем случае можно или шунтировать каждую из головок (кроме первой) различными конденсаторами (подобно $C_{ш}$ на рис. 6.26), если применено последовательное включение головок, или включать различные индуктивности последовательно с головками при их параллельном соединении.

В результате проведенных экспериментов по отработке звеньев акустических систем были разработаны три рабочих образца систем с расширенной зоной стереоэффекта. Непременным условием при конструировании систем было использование серийных головок громкоговорителей, что в значительной мере ограничивало качественные показатели систем (особенно в области нижних частот). Это также было вызвано необходимостью сравнения разработанных образцов с серийно выпускаемыми системами.

Все три образца громкоговорителей (условно назовем их № 1, № 2, № 3) конструктивно выполнены в прямоугольных корпусах, облицованных ореховым шпоном, с декоративной деревянной решеткой на фронтальной поверхности. Для уменьшения модуля-

ционных искажений все звенья в каждом из агрегатов разделены фанерными перегородками. Устройство отдельных звеньев показано на рис. 6.27. Разделительные фильтры выполнены в виде отдельного блока, помещенного внутри низкочастотного звена. Прин-

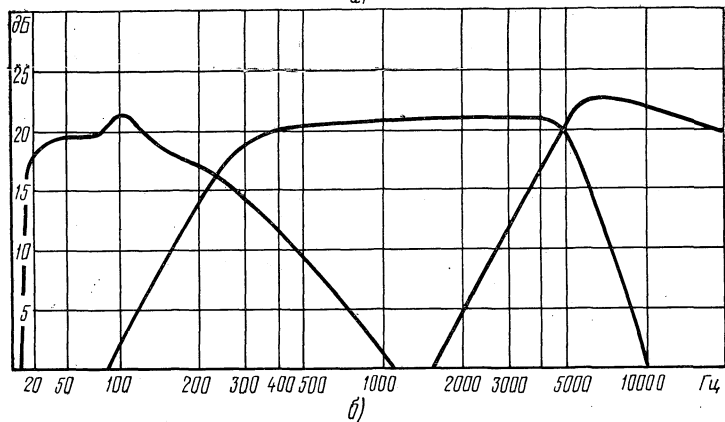
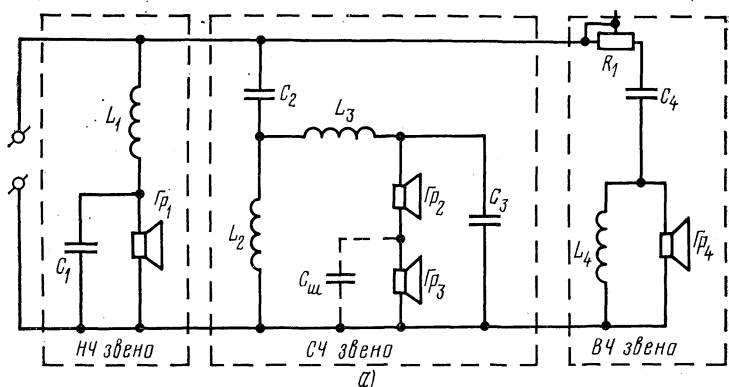


Рис. 6.26. Принципиальная электрическая схема громкоговорителя системы с расширенной зоной стереоэффекта (а) и частотные характеристики разделительных фильтров (б)

ципиальная электрическая схема разделительных фильтров и их частотные характеристики представлены на рис. 6.26.

Субъективные испытания разработанных систем производились непосредственным сравнением по звучанию с существующими промышленными образцами соответствующих классов качества, выбранными в качестве эталонных.

Основные характеристики разработанных систем и систем, применяемых в качестве эталонных, даны в табл. 6.1.

Характеристика акустических систем

Таблица 6.1

| Системы разработанные и эталонные | Номинальная электрическая мощность, Вт. | Тип корпуса | Габариты, мм | Наружный объем, л | Типы разделительных фильтров | Частоты разделения, Гц | Диапазон частот по звуковому давлению, Гц | База, м | Типы головок громкоговорителей |
|-----------------------------------|---|-------------|--------------|-------------------|------------------------------|------------------------|---|---------|---------------------------------|
| № 1 | 10 | Закрытый | 570×390×240 | 53 | LC | 250 5000 | 80—20 000 | 3 | 10ГД-29 2ГД-19М×2 3ГД-15М |
| «Нева-70» | 10 | Закрытый | 540×400×200 | 45 | (одноэлементный) | 4000 | 80—18 000 | 3 | 10ГД-29 2ГД-19М 3ГД-15М×3 |
| № 2 | 4 | Закрытый | 580×360×225 | 46 | LC | 250 5000 | 80—12 500 | 2,5 | 4ГД-28 2ГД-19М×2 1ГД-28 |
| «Ригонда-стерео» | 3 | Открытый | 640×355×270 | 61 | (одноэлементный) | 5000 | 63—12 500 | 2,5 | 4ГД-28×2 1ГД-28×2 |
| СА-5 («Корвет-стерео») | 6 | Открытый | 600×400×220 | 52 | LC | 300 5000 | 63—12 500 | 2,5 | 4ГД-28×2 1ГД-28×2 |
| «Ригонда-стерео» | 3 | Открытый | 640×355×270 | 61 | (одноэлементный) | 5000 | 63—12 500 | 2,5 | 4ГД-28×2 1ГД-28×2 |
| № 3 | 2 | Закрытый | 370×260×190 | 18 | LC | 240 | 125—10 000 | 1,8 | 4ГД-8Б 1ГД-28×2 |
| «Акорд» | 2,5 | Открытый | 360×270×125 | 12 | — | — | 100—10 000 | 1,8 | 4ГД-28 |

Примечание. Диапазоны воспроизводимых частот указаны для неравномерности частотной характеристики 14 дБ без учета коррекции в усилителях.

При сопоставлении результатов субъективно-статистических экспертиз, установлено следующее.

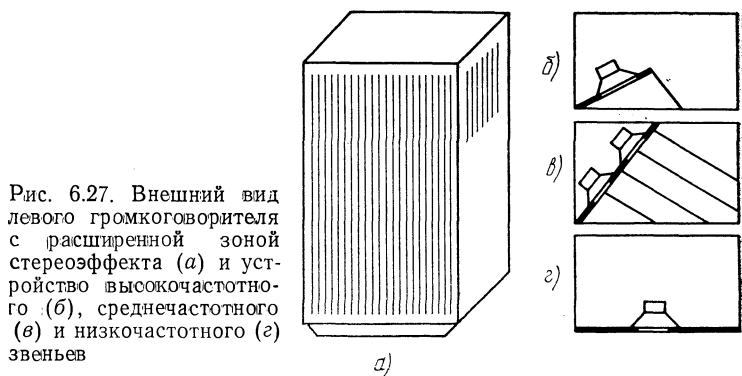


Рис. 6.27. Внешний вид левого громкоговорителя с расширенной зоной стереозффекта (а) и устройство высокочастотного (б), среднечастотного (в) и низкочастотного (г) звеньев

1. Разработанные образцы стереосистем по тембру звучания не уступают существующим промышленным образцам соответствующего класса качества.

2. Для мест на оси симметрии разработанные и промышленные системы воспроизведения практически равноценны по всем показателям.

3. Разработанные образцы резко отличаются от промышленных по передаче пространственной панорамы при асимметричном положении слушателей. Пространственные характеристики сравниваемых систем приведены на рис. 6.28 и 6.2.

4. Различие сравниваемых систем по предпочтительности наиболее сильно проявляется для мест, расположенных напротив громкоговорителей (т. е. там, где в системах обычного типа пространственные искажения максимальны). Это наиболее заметно при воспроизведении программ со сложной пространственной панорамой (симфоническая музыка). По мнению большинства экспертов пространственная панорама, создаваемая разработанными системами, практически не меняется при перемещении слушателя вдоль линии базы.

По данным экспертиз, разработанные системы предпочитают по пространственному впечатлению подавляющим числом слушателей, расположенных вне оси симметрии (от 75 до 100% экспертопоказаний).

5. Результаты экспертиз по общей предпочтительности имеют такую же тенденцию. Для боковых мест предпочтительность разработанных систем максимальна (от 70 до 100%). Следует отметить, что результаты оценки общей предпочтительности тесно коррелированы с результатами оценки предпочтительности по пространственному впечатлению. Эта корреляция объясняется важной ролью восприятия пространственного разделения звучащих объектов в общей оценке качества воспринимаемой стереопрограммы. По данным сравнительных прослушиваний можно сделать выводы.

1. Подтверждены предположения о преобладающей роли локализации в субъективной оценке качества стереовосприятия, что

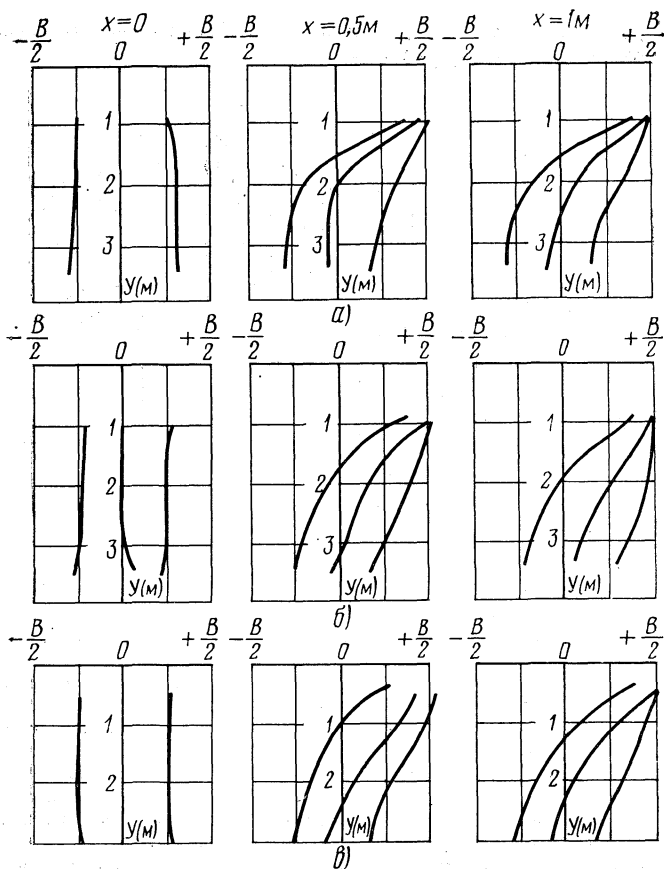


Рис. 6.28. Пространственные характеристики акустических систем с расширенной зоной стереоэффекта:

a — № 1, *б* — № 2, *в* — № 3

следует из резкого увеличения предпочтительности при восстановлении пространственной панорамы для боковых мест.

2. Предлагаемые принципы проектирования стереофонических систем воспроизведения действительно обеспечивают значительное увеличение зоны стереовосприятия.

3. Образцы систем воспроизведения, разработанные на основании этих принципов, значительно превосходят существующие промышленные образцы по зоне стереоэффекта, не уступая им по качеству звучания¹.

¹ В настоящее время разрабатываются более совершенные акустические системы с расширенной зоной на базе новых головок промкоговорителей.

6.10. Особенности эксплуатации систем воспроизведения с расширенной зоной стереоэффекта

В отличие от систем обычного типа, разработанные стереофонические системы имеют ряд особенностей, с которыми необходимо считаться при эксплуатации.

Так как громкоговорители систем не идентичны по конструкции (левый является как бы зеркальным отражением правого), при эксплуатации данных систем нельзя менять местами громкоговорители (т. е. левый громкоговоритель должен постоянно находиться слева). Учитывая это обстоятельство, заводу-изготовителю следует предусмотреть специальные надписи на задних стенках громкоговорителей.

В отличие от обычных систем, где величина базы определяет лишь масштаб пространственной панорамы и поэтому в значительных пределах может выбираться произвольной, стабилизирующие свойства СРЗ проявляются при определенной величине базы $V_{\text{опт}}$, которая должна быть указана в техническом паспорте. При значении $V > V_{\text{опт}}$ стабилизирующие свойства ухудшаются и появляются пространственные искажения. При $V < V_{\text{опт}}$ наблюдается избыточная компенсация, т. е. кажущиеся источники смещаются в направлении, противоположном смещению слушателя. Замечено, что изменение базы на 15—20% от оптимальной величины вполне допустимо, так как не приводит к заметным пространственным искажениям. Следует заметить, что по тем или иным причинам $V_{\text{опт}}$ может несколько отличаться от величины, рекомендуемой в техническом паспорте. Это может иметь место вследствие погрешностей производства, различия в направленности отдельных партий громкоговорителей и т. д. Поэтому, если в процессе эксплуатации будет замечена недостаточная стабилизация, следует уменьшить, а если избыточная — увеличить длину базы.

При эксплуатации систем обычного типа громкоговорители часто ориентируют так, чтобы их фронтальные панели были обращены в сторону слушателя. Для СРЗ такая установка недопустима, так как приводит к появлению пространственных искажений. Эти системы рассчитаны на установку корпусов громкоговорителей таким образом, чтобы их фронтальные поверхности лежали в одной плоскости.

Как следует из расчетов зон стереоэффекта (см. рис. 6.9), а также из пространственных характеристик (см. рис. 6.28), зона стереоэффекта СРЗ начинается на некотором расстоянии от линии базы. Поэтому среди паспортных данных на систему должно быть указано минимальное расстояние y от слушателей до линии базы (обычно не ближе 1,5—2,0 м при значении $V=1,8 \div 3$ м).

При эксплуатации СРЗ требуется более тщательная установка стереобаланса, чем для систем обычного типа, так как неточная установка центрального источника в центре базы приводит к более заметным пространственным искажениям при асимметричном положении слушателя. Кроме того, при установке стереобаланса слушателю не обязательно находиться точно на оси симметрии системы.

Прослушивания разработанных систем проводились в трех различных помещениях (табл. 6.2).

Характеристики помещений прослушивания

| Помещение | Площадь, м ² | Время реверберации, с |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Зал прослушивания ВНИИРПА | 108 | 0,85 |
| Жилая комната ВНИИРПА | 36 | 0,55 |
| Лабораторное помещение ЛЭИС | 28,5 | 0,5 |

Во всех случаях стабилизирующие свойства систем практически не менялись. Звуки, отраженные стеной, у которой расположены громкоговорители, тоже не влияют на эти свойства. Это было установлено сопоставлением пространственных характеристик, полученных при двух вариантах установки громкоговорителей в зале прослушивания — непосредственно у стены и в 3 м от нее. Оказалось, что расхождение пространственных характеристик для этих случаев не превышает расхождения между показаниями различных экспертов. Это приводит к выводу, что стабилизирующие свойства систем не зависят от акустических свойств помещения прослушивания. Однако это не означает, что громкоговорители системы могут быть установлены в произвольном месте помещения прослушивания. Как и при эксплуатации систем обычного типа, асимметрия звукового поля, вызванная локальным отражением звука от какой-либо поверхности вблизи от одного из агрегатов, вызывает асимметрию пространственной панорамы, которая уже не может быть устранена регулировкой стереобаланса. При этом также ухудшается острота локализации отдельных частей стереопанорамы. Поэтому места установки в помещении прослушивания громкоговорителей СРЗ должны выбираться с учетом тех же рекомендаций, что и для систем обычного типа.

Г л а в а 7**Квадрафонические системы**

Общие сведения. Двухканальные стереофонические системы, явившиеся новым (по сравнению с монофоническими) качественным скачком в развитии техники вещания, записи и воспроизведения звука, все же, как показывают новейшие исследования, обладают целым рядом весьма существенных недостатков: ограниченной областью локализации КИЗ, в основном только на линии базы громкоговорителей и частично в глубину от нее; недостаточно полным восприятием слушателем, находящимся в помещении прослушивания, акустических особенностей первичного помещения (концертный зал, радиовещательная студия и т. д.).

В силу этих особенностей двухканальные стереофонические системы оказываются неспособными создать иллюзию переноса слушателя из обычного жилого помещения в концертный зал, т. е. так называемый «эффект присутствия». Далеко не полностью используются возможности пространственного слуха человека для повышения раздельности звучания и воздействия на слушателя направленностью прихода звуков. Последнее способно усилить эмоциональное воздействие на слушателя звуковой программы, подчеркнуть конфликтность различных тем, их сопоставление, объединение и т. д. Именно поэтому эмоциональное воздействие на слушателя стереопрограммы, воспроизводимой в жилом помещении, существенно ниже, чем при ее непосредственном слушании в хорошем концертном зале.

Все это явилось причиной разработки новых, более совершенных систем передачи и воспроизведения звука, получивших название квадрафонических. В последних звукорежиссер формирует четырехканальный стереофонический сигнал, который затем по четырем или (после выполнения дополнительного функционального преобразования) по двум каналам связи передается слушателям. Воспроизведение принятого сигнала в таких системах осуществляется всегда с помощью четырех громкоговорителей.

Сформулируем требования, которые на современном этапе развития техники вещания следует предъявить к идеальной квадрафонической системе звукопередачи для обеспечения наилучших условий для слухового восприятия звуковой панорамы. Последняя должна обеспечить:

а) возможность локализации звуковых образов не только в пределах всей азимутальной плоскости (т. е. спереди, слева, справа и сзади слушателя), но также и в вертикальной плоскости (например, над слушателем), что позволит в наибольшей степени удовлетворить фантазию звукорежиссера при формировании стереопанорамы и создании звуковых эффектов, недоступных ни естественному слушанию, ни обычному стереовоспроизведению;

б) значительно более лучшую, чем при стереовоспроизведении, передачу акустических особенностей первичного помещения путем воссоздания в помещении прослушивания с очень высокой степенью точности (в пределах всей окружающей слушателя полусферы) про-

странственного реверберационного процесса, свойственного первичному помещению;

в) существенное улучшение прозрачности звучания и естественности передачи тембров инструментов и голосов;

г) совместимость, т. е. возможность воспроизведения квадрафонических программ на стандартном стереофоническом и монофоническом оборудовании и получения при этом полноценного звучания, свойственного этим способам звукопередачи. Это весьма важно на современном этапе развития техники, когда у населения имеется огромный парк моно- и стереоборудования.

Выполнение этих требований в конечном итоге позволяет в зависимости от замысла звукорежиссера создать либо полную иллюзию переноса в концертный зал с теми или иными акустическими особенностями при резком повышении качества звучания (эффект присутствия в первичном помещении) либо окружить слушателя источниками звуков, поместив его, например, в середину оркестра, сделав его не пассивным, а активным участником звукового события, либо создать эффект перемещения отдельных звуковых образов не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскости.

Уже сейчас является очевидным тот факт, что лучшие квадрафонические системы обладают несравненным и весьма серьезным преимуществом по сравнению с обычным стереовоспроизведением. Они создают звукорежиссерам и композиторам поистине неограниченные возможности для создания новых форм музыкальных произведений, требующих значительного обновления методов их деятельности и самой техники записи. Внедрение квадрафонии может явиться новым качественным скачком (по сравнению с двухканальной стереофонией) в развитии техники передачи и воспроизведения вещательных программ. Очевидно, что переход к многоканальному стереовоспроизведению даст возможность оживить сбыт бытовой радиоаппаратуры высшего класса, ибо достигаемое при этом существенное повышение качества звучания заставит потребителей дополнять или менять имеющееся у них оборудование.

Не все известные в настоящее время разновидности квадрафонических систем способны в равной степени удовлетворить изложенным выше требованиям. В соответствии с принятой ранее классификацией и системой

обозначений (см. гл. 1) они разделяются на следующие группы:

псевдоквадрафонические системы (условное обозначение 2-2-4*), имеют два канала приема акустической информации (две группы микрофонов), два канала связи и четыре канала воспроизведения;

квазиквадрафонические системы (4*-2-4*), подразделяются на стереоамбифонические и матричные, имеют четыре канала приема информации, путем преобразований создаются два сигнала для передачи по двум линиям связи, на приемном конце с помощью специального устройства происходит обратное преобразование и восстановление четырех сигналов;

системы дискретной квадрафонии (4-4-4), имеют четыре отдельных канала для приема, передачи и воспроизведения акустической информации.

Ниже рассматриваются особенности построения структурных схем, достоинства и недостатки каждого типа этих систем, а также возможности последних по передаче пространственной информации, определяющей свойственную им предпочтительность.

При этом не излагаются особенности стереоамбифонических систем, так как возможности последних достаточно широко известны из ранее опубликованной литературы [25, 56].

7.1. Псевдоквадрафонические системы

Цель разработки псевдоквадрафонических систем состоит в том, чтобы устранить основной недостаток, присущий двухканальной стереофонии, — весьма слабую передачу акустических особенностей первичного помещения — и тем самым усилить эффект присутствия слушателя в первичном помещении. Составными частями псевдоквадрафонической системы являются: источник стереосигнала (электрофон, стереоприемник, магнитофон); устройство, осуществляющее преобразование сигналов стереопары для получения двух дополнительных составляющих, несущих в основном информацию об акустических особенностях первичного помещения; четырехканальный усилитель и акустическая система воспроизведения, состоящая из четырех громкоговорителей.

Структурные схемы наиболее простых псевдоквадрафонических устройств, а также рекомендуемое для каж-

дого из них расположение громкоговорителей показаны на рис. 7.1—7.3. Здесь $L(t)$ и $R(t)$ — левый и правый стереосигналы; ДБ — attenuаторы; ЛЗ — линии задержки; ф — широкополосный фазовращатель, осуществляющий сдвиг по фазе выходных сигналов на 90° ;

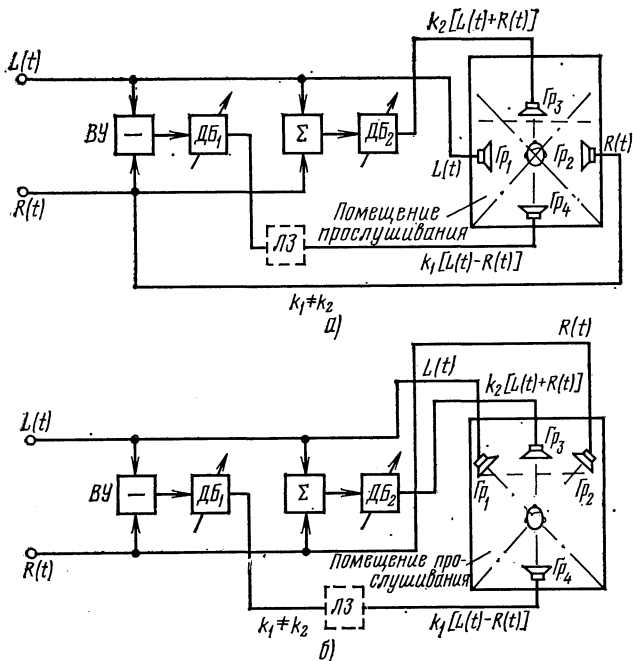


Рис. 7.1. Простейшие структурные схемы псевдоквадрафонических систем

ВУ — вычитающее устройство, на выходе которого возникают противофазные сигналы, полученные путем вычитания исходных сигналов $L(t)$ и $R(t)$, взятых в определенном соотношении по уровню; Σ — сумматор сигналов; $Гр_1, Гр_2, Гр_3, Гр_4$ — громкоговорители акустической системы; С — слушатель. Для большей наглядности показаны также сигналы на выходе каждого элемента схемы. Не изображены усилители: предварительные и оконечные, как не имеющие принципиального значения.

В простейших системах (см. рис. 7.1а и б) левый $L(t)$ и правый $R(t)$ сигналы подаются либо на громко-

говорители Γp_1 и Γp_2 , установленные слева и справа от слушателя на одной линии с ним, либо на некотором удалении от него (см. рис. 7.1б) так же, как и при обычном стереовоспроизведении. Громкоговорители

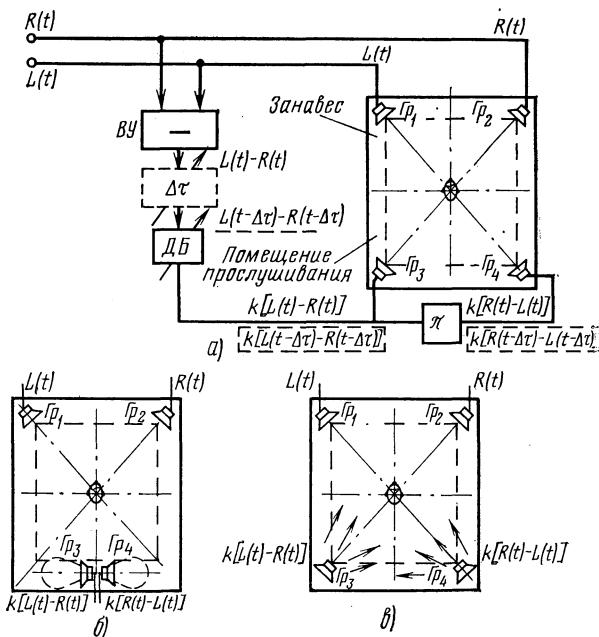


Рис. 7.2. Структурная схема и особенности размещения громкоговорителей в псевдоквадрафонической системе, использующей противофазное питание задних громкоговорителей разностным сигналом

Γp_3 и Γp_4 располагаются на оси симметрии громкоговорителей Γp_1 и Γp_2 спереди (Γp_3) и сзади (Γp_4) слушателя на равном от него удалении и излучают соответственно сигналы $L(t)+R(t)$ и $L(t)-R(t)$. Такое построение системы позволяет создать так называемый «эффект зала». При этом оркестр оказывается приближенным к слушателю. Однако предпочтительность по сравнению с обычным стереовоспроизведением в этом случае является не всегда уверенной. На некоторых программах разница в звучании мало заметна. Заметим, что вариант, приведенный на рис. 7.1б, позволяет получить расширенную зону стереовосприятия и регулируемую протяженность звуковой панорамы на линии базы основных громкоговорителей Γp_1 и Γp_2 . Кроме того, для при-

дания звучанию большой гулкости и объемности, свойственной концертному залу, иногда в цепь питания заднего громкоговорителя (см. рис. 7.1, Гр₄) включается

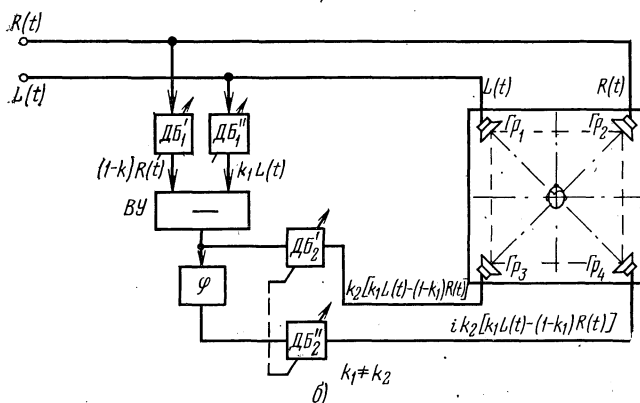
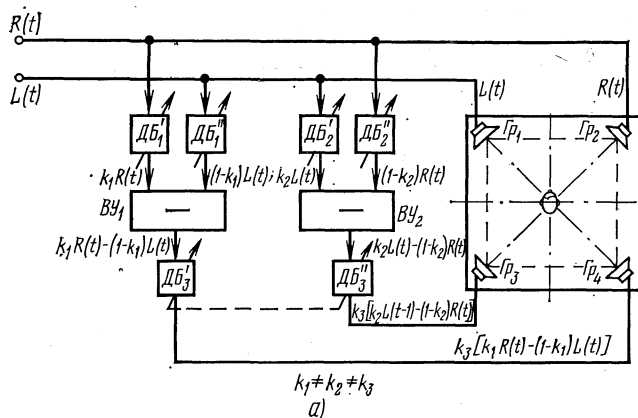


Рис. 7.3. Применение весовых разностных преобразователей и широкополосных фазовращателей в псевдоквадрафонических устройствах

линия задержки ЛЗ с регулируемым временным сдвигом Δt в пределах от 10 до 100 мс и даже более.

Более совершенной следует признать схему, приведенную на рис. 7.2а. Сигналы стереопары подаются на передние громкоговорители, установленные так же, как и при обычном стереовоспроизведении. На два других громкоговорителя — Гр₃ и Гр₄, расположенных сзади слушателя, подается разностный сигнал в противофазе.

При этом аттенуатор $ДБ$ необходим для подбора оптимального соотношения уровней между парами сигналов передних и задних каналов. Противофазное питание громкоговорителей $Гр_3$ и $Гр_4$ размывает задний звуковой образ, расширяет акустическую перспективу в задней полуплоскости, способствуя тем самым улучшению восприятия слушателем акустических свойств первичного помещения. При этом в одних случаях для улучшения пространственного впечатления и создания эффекта «окружения», «обволакивания» слушателя звуком задние громкоговорители располагают либо на общей отражательной панели, так что лицевые стороны этих громкоговорителей направлены соответственно влево и вправо от оси симметрии передних громкоговорителей (см. рис. 7.2б), либо ориентируют их в углы помещения (см. рис. 7.2в). Для усиления свойственной концертным залам гулкости звучания и здесь разностный сигнал $L(t) - R(t)$ иногда предварительно пропускают через линию задержки (см. рис. 7.2а, пунктир). Оптимальное значение Δt также лежит в пределах от 10 до 100 мс и весьма существенно зависит от жанра прослушиваемой программы. Линии задержки могут включаться в цепь питания каждого из задних громкоговорителей $Гр_3$ и $Гр_4$. Их назначение — имитировать первые дискретные отзвуки первичного помещения, несущие обычно информацию о его размерах и гулкости. Введение Δt уменьшает корреляционную связь между основным сигналом и его повторением, способствуя тем самым отдельному восприятию последних. Рядом исследователей прямо отмечается, что повторное звучание основных сигналов с временем запаздывания порядка 35 мс и уровнем пониженным на 10 дБ намного улучшает прозрачность звучания панорамы.

Очень неплохие результаты дает использование в каналах питания задних громкоговорителей (см. рис. 7.2) вместо линий задержки ревербераторов, например, пружинного типа. Последние полностью изменяют временную структуру реверберационного продолжения разностного сигнала и способны создать иллюзию переноса слушателя в помещения с разными акустическими свойствами. Однако применение линий задержки и ревербераторов в псевдоквадрафонических системах пока встречает серьезные трудности вследствие их большой стоимости, хотя качество получаемого при этом эффекта может быть очень высоким.

При чисто интенсивностном способе создания стереопанорамы в продукте разностного преобразования $L(t) - R(t)$ отсутствуют сигналы, соответствующие прямым звукам центрального звукового образа, ибо они равны по уровню и синфазны. Реверберационные же продолжения сигналов, формирующие центральный звуковой образ, для левого и правого стереоканалов не тождественны. Поэтому в продукте разностного преобразования $L(t) - R(t)$ эти различия остаются. При этом исчезающее маскирующее действие сигналов, соответствующих прямым звукам центрального КИЗ, способствует не только появлению некоторой гулкости, свойственной первичному помещению, но и лучшей усвояемости слушателем акустических характеристик последнего. Повышенная гулкость разностного сигнала отмечается всеми экспертами.

Иногда (см. рис. 7.3а) повышение качества воспроизводимого звучания достигается тем, что для питания задних громкоговорителей $Гр_3$ и $Гр_4$ используется противофазный разностный сигнал с неодинаковым соотношением уровней исходных сигналов. Здесь величины коэффициентов k_1 и k_2 , обеспечиваемые аттенюаторами $ДБ_1$ и $ДБ_2$, могут изменяться в пределах от 0 до 1. Двухканальный аттенюатор $ДБ_3$ необходим для подбора соотношения уровней сигналов, излучаемых передней и задней парами громкоговорителей. Обычно $k_1 \neq k_2 \neq k_3$. Изменяя значение коэффициентов k_1 и k_2 , можно устранить в продукте разностного преобразования сигналы, соответствующие прямым звукам любых двух звуковых образов стереопанорамы. В этом случае сигналы, питающие задние громкоговорители, имеют разные реверберационные продолжения и поэтому несут больше информации об акустических свойствах первичного помещения по сравнению со схемой, приведенной на рис. 7.2. Для усиления эффекта окружения, обволакивания слушателя звуком, для создания более полной иллюзии переноса слушателя в первичное помещение, как и ранее, в цепь питания задних громкоговорителей могут быть включены линии задержки или двухканальный ревербератор.

Получают все большее признание псевдоквадрафонические системы, содержащие широкополосные фазовращатели (φ), обеспечивающие постоянный сдвиг по фазе в диапазоне звуковых частот. Пример выполнения такой приставки, дающей очень неплохие результаты, пред-

ставлен на рис. 7.3б. Ее отличие от ранее рассмотренной (см. рис. 7.3а) состоит лишь в том, что задние громкоговорители питаются разностным сигналом $k_2[k_1L(t) - (1-k_1)R(t)]$, сдвинутым по фазе на 90° , т. е. на Γp_3 подается сигнал $k_2[k_1L(t) - (1-k_1)R(t)]$, а на $\Gamma p_4 - ik_2[k_1L(t) - (1-k_1)R(t)]$. Поэтому сигналы задних громкоговорителей оказываются некоррелированными. Следовательно, они обрабатываются в слуховом анализаторе независимо, меньше маскируют друг друга, а потому усваиваются значительно полнее и оказывают большее эмоциональное воздействие на слушателя, способствуя тем самым созданию более полной иллюзии его переноса в первичное помещение. Как показывают экспериментальные исследования, при воспроизведении двумя громкоговорителями (например, Γp_1 и Γp_2) сигналов одинакового уровня, но сдвинутых друг относительно друга по фазе на 90° во всем спектре звуковых частот, в случае симметричного положения слушателя создается впечатление разрыва единого центрального КИЗ на два звуковых образа, локализуемых соответственно вблизи позиций левого (Γp_1) и правого (Γp_2) громкоговорителей. Этот эффект проявляется еще более отчетливо при прослушивании таких сигналов с помощью стереотелефонов.

Большой гибкостью обладает схема псевдоквадрафонического устройства, приведенная на рис. 7.4. Она содержит широкополосные фазовращатели (Φ), разностные преобразователи BY_1 и BY_2 , двухканальные аттенюаторы $ДБ_1, ДБ_2, ДБ_3, ДБ_4$, сумматоры $\Sigma_1 - \Sigma_4$, оконечные усилители $OY_1 - OY_4$ и громкоговорители $\Gamma p_1 - \Gamma p_4$, два из которых установлены перед слушателем, два других — позади него. Здесь каждый из четырех воспроизводимых сигналов — L'_F, R'_F, L'_B, R'_B — представляет собой сумму двух компонент, одна из которых является основным сигналом (для Γp_1 — это сигнал $k_1L(t)$, для $\Gamma p_2 - k_1R(t)$, для $\Gamma p_3 - k_3[L(t) - R(t)]$, для $\Gamma p_4 - k_3[R(t) - L(t)]$; вторая — дополнительным сигналом (для Γp_1 — это $ik_2[L(t) - R(t)]$, для $\Gamma p_2 - ik_2[R(t) - L(t)]$, для $\Gamma p_3 - ik_4L(t)$, для $\Gamma p_4 - ik_4R(t)$). Основной и дополнительный сигналы отличаются по уровню. Соотношение последних устанавливается с помощью аттенюаторов $ДБ_1 - ДБ_4$ путем выбора значений коэффициентов $k_1 - k_4$, изменяющихся в пределах от 0 до 1. Обычно $k_1 \neq k_2 \neq k_3 \neq k_4$, значения этих коэффициентов зависят от вида программы. Кроме отличия по

уровню, основной и дополнительный сигналы, излучаемые каждым громкоговорителем, сдвинуты друг относительно друга на 90° , что делает их статистически независимыми.

Поясним процесс восприятия излучаемых громкоговорителями этого устройства сигналов. Допустим, что

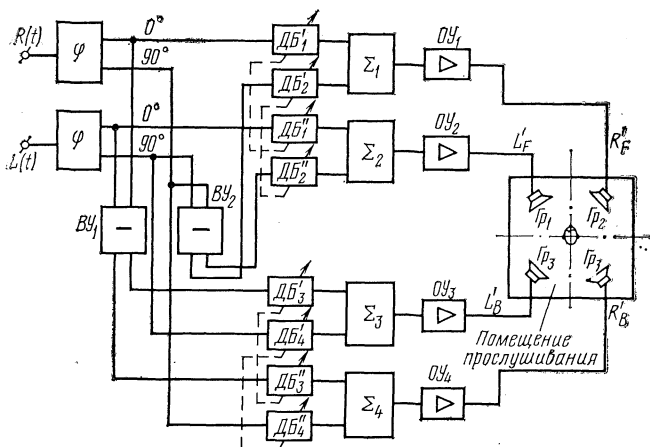


Рис. 7.4. Применение вычитающих, суммирующих устройств и фазовращателей в псевдоквадрафонической системе

включены только передние громкоговорители $Гр_1$ и $Гр_2$. При этом слушатель воспринимает две наложенные друг на друга звуковые пространственные панорамы. Одна из них — результат воздействия на слушателя исходных стереосигналов $k_1L(t)$ и $k_1R(t)$, при этом создается впечатление пространственного распределения инструментов ансамбля по линии базы передних громкоговорителей $Гр_1$ и $Гр_2$, свойственное обычному стереовоспроизведению. Появление второй панорамы есть результат воздействия на слушателя дополнительного разностного сигнала $ik_2[L(t) - R(t)]$, питающего $Гр_1$ и $Гр_2$ в противофазе. Последняя представляет собой единый размытый по всей ширине базы звуковой образ, обладающий к тому же повышенной гулкостью. Меняя соотношение уровней основного и дополнительного сигналов, можно установить наиболее приятную окраску и объемность воспроизводимого передними громкоговорителями звучания. Для задних громкоговорителей $Гр_3$ и $Гр_4$ ос-

новым сигналом уже является разностный, который подается на них в противофазе: $k_3[L(t) - R(t)]$ на Γp_3 и $k_3[R(t) - L(t)]$ на Γp_4 . К нему добавляется также в определенном соотношении исходный стереосигнал $ik_4L(t)$ или $ik_4R(t)$, сдвинутый по фазе относительно основного сигнала на 90° . Процесс восприятия сигналов, воспроизводимых только задними громкоговорителями, аналогичен изложенному выше.

При одновременной работе всех громкоговорителей этого устройства (см. рис. 7.4) слушатели отмечают не только впечатление звучащего объема или простран-

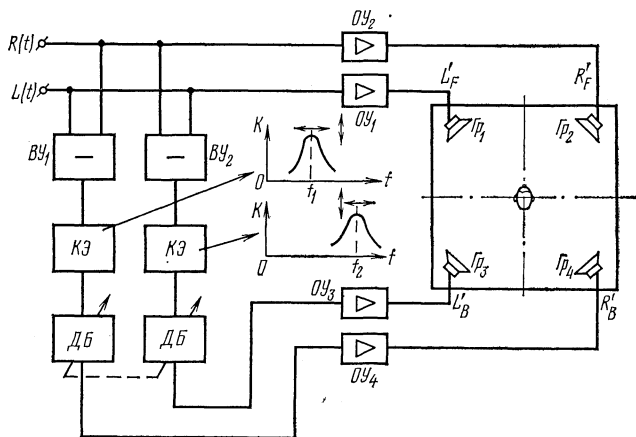


Рис. 7.5. Структурная схема псевдоквадрафонической системы с использованием разностных преобразователей и корректоров эффектов

ва, но также и некоторое расширение кажущейся базы передних громкоговорителей. Звук (особенно при звучании органа) обволакивает, окружает слушателя со всех сторон. Это ощущение резко усиливает эмоциональное впечатление и иллюзию переноса слушателя в первичное помещение.

Весьма интересные результаты дает применение для получения псевдоквадрафонического сигнала корректоров эффектов ($КЭ$), обеспечивающих «гибкую» регулировку формы амплитудно-частотных характеристик каналов воспроизведения, к которым подключены задние громкоговорители. Структурная схема такого устройства представлена на рис. 7.5. Частотные характеристики $КЭ$ приведены также на рис. 7.5. Они позволяют выде-

лить относительно узкие участки спектра в любом месте диапазона слышимых частот при величине подъема, регулируемой в пределах от 0 до 12—15 дБ. Если разнос средних частот f_1 и f_2 друг от друга достаточно ве-

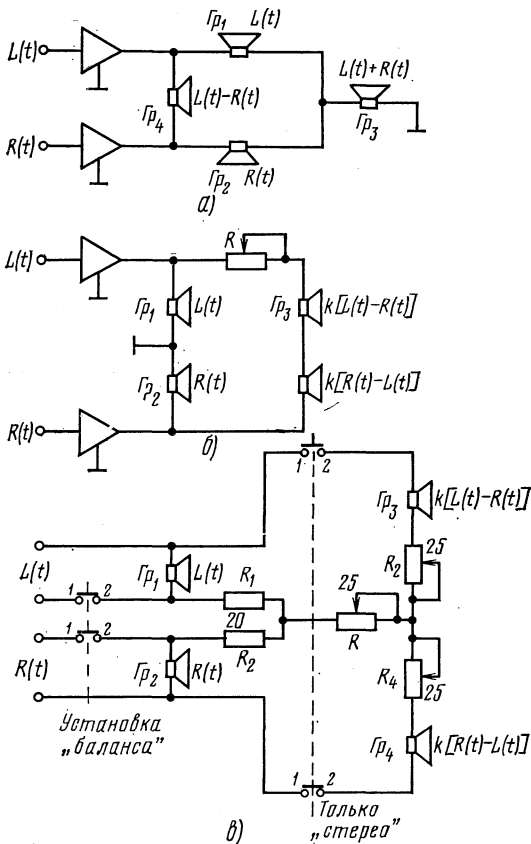


Рис. 7.6. Схема подключения громкоговорителей к выходам стереоусилителя

лик (не менее 800 Гц), то громкоговорители Γp_3 и Γp_4 излучают практически некоррелированные реверberирующие сигналы, в значительной степени освобожденные от маскирующего действия прямых звуков путем предварительно выполненного весового разностного преобразования.

В настоящее время широко распространены два разных способа реализации псевдоквадрафонических систем. Простейший из них заключается в том, что все четыре громкоговорителя определенным образом подключаются к двум выходам обычного стереоусилителя. Возможные варианты подключения громкоговорителей, а также излучаемые ими сигналы показаны на рис. 7.6а, б, в. Потенциометр R позволяет установить оптимальное соотношение уровней сигналов передних и задних громкоговорителей. В более сложных и совершенных системах (см. рис. 7.2—7.5) преобразование стереофонического сигнала в псевдоквадрафонический осуществляется в специальном устройстве, называемом синтезатором. Последний имеет несколько вариантов синтеза псевдоквадрафонического сигнала и выполняется обычно в виде приставки, которая включается между источником стереосигнала и четырехканальным усилителем.

Не следует забывать, что полнота эффекта, обеспечиваемого псевдоквадрафонической системой, зависит не только от выбранной структурной схемы синтезатора, но также в значительной степени от того, как выполнена ее балансировка, как произведена запись и, конечно, от жанра прослушиваемой программы. Внедрение псевдоквадрафонии дает возможность повысить качество при воспроизведении уже имеющихся у населения в огромном количестве стереозаписей и может рассматриваться лишь как дополнение к стереофонической или квадрафонической аппаратуре. Однако даже самые лучшие псевдоквадрафонические системы не способны обеспечить уверенную передачу пространственной информации в пределах всей азимутальной плоскости и поэтому не могут конкурировать с многоканальной стереофонией.

7.2. Матричные квадрафонические системы

Общие сведения. Более совершенными по передаче пространственной информации (по сравнению с псевдоквадрафоническими и стереоамбиофоническими) являются системы матричной квадрафонии [4, 35, 88, 126]. Несмотря на то что первые сообщения об их разработке появились лишь в 1970 г., в настоящее время число известных разновидностей этих систем очень велико. Столь большое внимание исследователей к системам матричной квадрафонии объясняется тем, что они обла-

дают рядом весьма серьезных преимуществ по сравнению с дискретными квадрафоническими системами. К их числу относятся: наличие двух каналов передачи, что не требует разработки специального передающего и записывающего оборудования, так как оказывается возможным использовать уже существующие двухканальные устройства (магнитофоны, электрофоны, передатчики и т. д.); достаточно хорошая совместимость с обычными стерео- и моносистемами, что весьма важно на

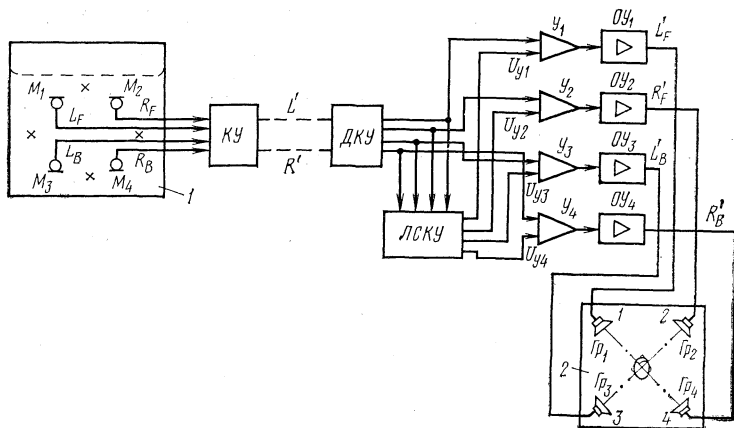


Рис. 7.7. Структурная схема матричной квадрафонической системы

этапе внедрения этого нового вида техники, когда у населения имеется огромный парк двухканальной и одноканальной аппаратуры; существенно лучшее отношение сигнал/помеха при одинаковой полосе каждого из каналов воспроизведения; весьма малое отличие по предпочтительности, по данным ряда авторов [126] эксперты при сравнительном прослушивании звучания дискретной квадрафонической и лучших вариантов систем матричной квадрафонии не замечают разницы; простота используемых здесь дополнительных кодирующих (КУ) и декодирующих (ДКУ) устройств, а также логических схем контроля усиления (ЛСКУ) каналов воспроизведения.

Эти преимущества создают весьма благоприятные предпосылки для внедрения матричных квадрафонических систем в практику радиовещания и звукозаписи.

Структурная схема и общие свойства матричных систем. Наиболее общая структурная схема системы матричной квадрафонии, поясняющая принцип ее работы, приведена на рис. 7.7. Она содержит: группы направленных микрофонов M_1, M_2, M_3 и M_4 , кодирующее устройство $KУ$, декодирующее устройство $ДКУ$, логическую схему контроля усиления каналов $ЛСКУ$, предварительные усилители с управляемым коэффициентом передачи $У_1—У_4$, оконечные усилители $ОУ_1—ОУ_4$ и громкоговорители $Гр_1—Гр_4$.

Воспринятые микрофонами сигналы — левый передний L_F , правый передний R_F , левый задний L_B , правый задний R_B — несут информацию о звуковом поле в соответствующих частях первичного помещения и называются основными (исходными) сигналами. С помощью $KУ$ они преобразуются в два комплексных сигнала вида

$$L' = AL_F + BR_F + CL_B + DR_B; R' = BL_F + AR_F + DL_B + CR_B, \quad (7.1)$$

где L и R' — левый и правый комплексные сигналы, передаваемые к слушателю по двум независимым каналам связи; A, B, C, D — коэффициенты кодирования, изменяющиеся в пределах от -1 до $+1$.

Кодирующее устройство обычно содержит два операционных усилителя, каждый из которых имеет четыре входа и один выход. При этом требование совместности должно быть выполнено уже в процессе кодирования, поскольку предполагается, что слушатели, имеющие монофонические и стереофонические звуковоспроизводящие системы, не захотят добавлять к ним какие-либо приставки с целью получения полноценного звучания при воспроизведении законсервированных сигналов L' и R' , полученных в результате матрицирования.

На приемной стороне оба сигнала L' и R' с помощью $ДКУ$ преобразуются в следующие четыре сигнала:

$$\begin{aligned} L'_F &= EL' + FR'; L'_B = GL' + HR'; \\ R'_F &= FL' + ER'; R'_B = HL' + GR'. \end{aligned} \quad (7.2)$$

Здесь E, F, H, G — коэффициенты декодирования, также изменяющиеся в пределах от -1 до $+1$. Сигналы L'_F, R'_F, L'_B, R'_B называются восстановленными и воспроизводятся соответственно громкоговорителями $Гр_1—Гр_4$.

Логическая схема контроля усиления ЛСКУ вырабатывает управляющие сигналы U_{y1} , U_{y2} , U_{y3} и U_{y4} , с помощью которых осуществляется изменение коэффициента передачи управляемых усилителей $У_1—У_4$. Необходимость введения подобных схем и принцип их действия будут пояснены позже.

В процессе декодирования необходимо получить слуховое впечатление, как можно меньше отличающееся от того, которое возникает при воспроизведении сигналов в своей первоначальной дискретной форме. Следует помнить, что восстановленные сигналы не тождественны основным.

Подставив в (7.2) значения L' и R' из (7.1), получим уравнения матрицирования:

$$\begin{aligned}
 L'_F &= (EA + FB)L_F + (EB + FA)R_F + (EC + FD)L_B + \\
 &+ (ED + FC)R_B; \\
 R'_F &= (EB + FA)L_F + (EA + FB)R_F + (ED + FC)L_B + \\
 &+ (EC + FD)R_B; \\
 L'_B &= (GA + HB)L_F + (GB + HA)R_F + (GC + HD)L_B + \\
 &+ (GD + HC)R_B; \\
 R'_B &= (GB + HA)L_F + (GA + HB)R_F + (GD + HC)L_B + \\
 &+ (GC + HD)R_B.
 \end{aligned}
 \tag{7.3}$$

Анализируя выражения (7.3), можно сделать следующие основные выводы.

1. Каждый из восстановленных сигналов наряду с полезной для него информацией содержит и чужеродную. Например, для сигнала L'_F полезной является $(EA + FB)L_F$, мешающей — $(EB + FA)R_F + (EC + FD)L_B + (ED + FC)R_B$.

2. При воздействии на вход КУ только одного из четырех основных сигналов на выходах ДКУ всегда является несколько сигналов, один из которых является полезным, остальные — мешающими (вредными). Очевидно, если на вход КУ поступает только левый передний сигнал L_F , то полезным будет сигнал $L'_F = (EA + FB)L_F$, воспроизводимый левым передним громкоговорителем $Гр_1$; остальные сигналы — $(EB + FA)L_F$, $(GA + HB)L_F$ и $(GB + HA)L_F$, — подводимые к другим

громкоговорителям, в данном случае должны рассматриваться как мешающие.

Появление мешающих сигналов — основной недостаток систем матричной квадрафонии. Их роль должна быть сведена к минимуму путем рационального выбора коэффициентов матрицирования A, B, C, D, E, F, G, H . Это основная проблема для данного типа систем. Для иллюстрации сказанного приведем два простых примера. Предположим, что все четыре коэффициента кодирования равны $+1$. Тогда комплексные сигналы L' и R' окажутся тождественными и вся стереоинформация будет потеряна, так же как и при обычной монофонической передаче. Если же принять значение $+1$ только для коэффициента A , а значения B, C и D выбрать равными нулю, то окажется (7.1), что $L' = AL_F$ и $R' = AR_F$. При этом будет полностью потеряна информация, воспринятая задними микрофонами M_3 и M_4 . Конечно, это крайние случаи, но они наглядно поясняют, что выбор коэффициентов матрицирования является наиболее ответственным моментом при разработке систем матричной квадрафонии.

Соотношение полезного и мешающих сигналов, получаемых на выходах системы при воздействии на вход $KУ$ любого из основных сигналов, удобно оценивать совокупностью значений коэффициентов разделимости, оценивающих степень изолированности каждого из основных каналов. Последние представляют собой выраженное в децибелах отношение мощностей (или напряжений) полезного сигнала к каждому из мешающих на выходах $ДКУ$. При этом предполагается, что на вход $KУ$ воздействует один из основных сигналов. Например, если на вход $KУ$ поступает сигнал L_F , то изолированность левого переднего канала (см. рис. 7.7, поз. 1) определяет совокупность значений коэффициентов разделимости:

$$K_{1,2} = 20 \lg \frac{EA + FB}{EB + FA}; \quad K_{1,4} = 20 \lg \frac{EA + FB}{GB + HA};$$

$$K_{1,3} = 20 \lg \frac{EA + FB}{GA + HB}, \quad (7.4)$$

где $K_{1,2}$ — коэффициент разделимости левого переднего канала (1) от правого переднего (2); $K_{1,4}$ и $K_{1,3}$ — коэффициенты для каналов 1,4 и 1,3.

Аналогичным образом могут быть записаны выражения для коэффициентов разделимости, определяющие

степень изолированности каждого из остальных каналов. Очевидно, что разделимость каналов в дискретной квадрафонической системе звукопередачи равна бесконечности, так как здесь при появлении любого из основных сигналов работает только один, соответствующий данному каналу, громкоговоритель.

Из (7.3) и (7.4) следует, что для любых разновидностей матричных систем справедливы равенства (на вход КУ поочередно воздействует один из четырех основных сигналов):

$$\begin{aligned} K_{1,2} &= K_{2,1} ; K_{3,1} = K_{4,2} ; \\ K_{1,4} &= K_{2,3} ; K_{3,2} = K_{4,1} ; \\ K_{1,3} &= K_{2,4} ; K_{3,4} = K_{4,3} . \end{aligned} \quad (7.5)$$

Из (7.5) следует, что разделимость передних 1,2, задних 3,4, боковых 1,3 и 2,4, диагональных 1,4 и 2,3 каналов не зависит от того, какой из этих пар основных сигналов воздействует на вход КУ.

Если же на вход КУ поступают одновременно два сигнала, например L_F, R_F или L_B, R_B , формирующие при воспроизведении единый КИЗ, то следует говорить о разделимости пар каналов. В общем случае она может быть неодинаковой.

Выбор коэффициентов матрицирования. В гл. 4 и 5 было показано, что особенности пространственного слуха человека лежат в основе восприятия всех дополнительных ощущений, свойственных многоканальному воспроизведению: более высокой прозрачности звучания, значительно более точной передачи тембров инструментов и голосов, восприятия акустической обстановки первичного помещения и т. д. Иначе, если звуковая система правильно передает информацию о направлениях прихода как прямых, так и отраженных звуков, свойственных первичному помещению, и при этом обладает хорошими электроакустическими показателями, то ей присуща очень высокая степень предпочтительности.

Рациональный выбор коэффициентов матрицирования обычно преследует получение, во-первых, совместности, во-вторых, наилучшей и одинаковой изолированности каждого из четырех каналов (если все они считаются равноценными по передаче направленной информации) или группы каналов (когда предпочтительность отдается какой-либо паре каналов, чаще всего перед-

ней) и, в-третьих, определяет возможности системы по передаче пространственной информации. Одновременное выполнение этих условий вызывает необходимость идти на компромиссы.

Поясним принцип выбора коэффициентов матрицирования в новейших матричных системах QS и SQ, где не отдается предпочтение какой-либо паре каналов. Для этого снова вернемся к уравнениям матрицирования (7.1) и (7.2). Очевидно (7.1), чтобы при кодировании выполнить условие совместимости и в каждом из комплексных сигналов L' и R' получить максимум полезной (AL_F, CL_B для сигнала L' и AR_F, CR_B для сигнала R') и минимум вредной информации, необходимо принять значения коэффициентов A и C равными 1 и положить $B = -D = \Delta$. С учетом этого уравнения кодирования (7.1) переписутся в виде

$$L' = L_F + \Delta R_F + L_B - \Delta R_B; \quad R' = \Delta L_F + R_F - \Delta L_B + R_B. \quad (7.6)$$

В процессе декодирования надо максимально увеличить долю полезного сигнала в каждом из восстановленных (7.2), поэтому следует положить $E = G = 1$. Кроме того, чтобы вредная информация присутствовала, по возможности, в равной доле в каждом из восстановленных сигналов необходимо также, чтобы $|F| = |H|$. Если к тому же желаем обеспечить наилучшие условия для уверенной и четкой локализации КИЗ и для правильной передачи пространственной информации, то необходимо, чтобы $F = -H = \Delta$. Учитывая вышеизложенное, после декодирования получим

$$\begin{aligned} L'_F &= (1 + \Delta^2) L_F + 2\Delta R_F + (1 - \Delta^2) L_B; \\ R'_F &= 2\Delta L_F + (1 + \Delta^2) R_F + (1 - \Delta^2) R_B; \\ L'_B &= (1 - \Delta^2) L_F + (1 + \Delta^2) L_B - 2\Delta R_B; \\ R'_B &= (1 - \Delta^2) R_F - 2\Delta L_B + (1 + \Delta^2) R_B. \end{aligned} \quad (7.7)$$

Нетрудно видеть (7.7), что при воздействии на вход КУ любого из основных сигналов на выходах ДКУ возникают три сигнала, один из которых является полезным, два других — мешающими. Не излучает громкоговоритель, расположенный по диагонали к основному. Для обеспечения равных уровней мешающих сигналов, излучаемых смежными по отношению к основному

громкоговорителями, необходимо выполнение равенства (7.7)

$$2\Delta = 1 - \Delta^2. \quad (7.8)$$

Уравнение (7.8) дает значение $\Delta=0,414$. Даже без проведения соответствующих субъективных исследований ясно, что в данном случае принципиально невозможна локализация КИЗ в центре базы на линии задних гром-

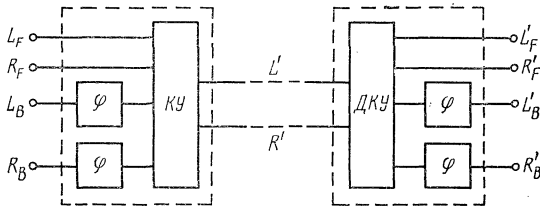


Рис. 7.8. Структурная схема электрического тракта системы QS

коговорителей. Это объясняется тем, что при $L_B=R_B$ и $L_F=R_F=0$ передние громкоговорители излучают сигнал, больший по уровню на 7,65 дБ, чем задние. Последнее следует из выражений (7.7), если положить, что $\Delta=0,414$.

Этот недостаток легко устраняется введением в схемы КУ и ДКУ широкополосных фазовращателей φ , осуществляющих во всем рабочем спектре частот сдвиг по фазе на 90° . Последние должны быть включены так, как показано на рис. 7.8. С учетом введенных фазовращателей уравнения для комплексных и восстановленных сигналов при $\Delta=0,414$ примут вид

$$L' = L_F + 0,414R_F + iL_B + i0,414R_B; \quad R' = 0,414L_F + R_F - i0,414L_B - iR_B, \quad (7.9)$$

$$L'_F = L_F + 0,707R_F + i0,707L_B; \quad L'_B = -i0,707L_F + L_B + 0,707R_B;$$

$$R'_F = 0,707L_F + R_F - i0,707R_B; \quad R'_B = i0,707R_F + 0,707L_B + R_B.$$

(7.10)

Полученные таким образом уравнения (7.9) и (7.10) принадлежат одной из наиболее распространенных мат-

ричных систем — QS [127]. Последняя является модернизацией известной системы П. Шайбера [126] и предложена фирмой «Samsui» США. На рис. 7.9 для системы QS приведены значения коэффициентов разделимости в децибелах полезных сигналов от мешающих, а также сведения о самих излучаемых громкоговорителями сигналах для случаев поочередного воздействия на

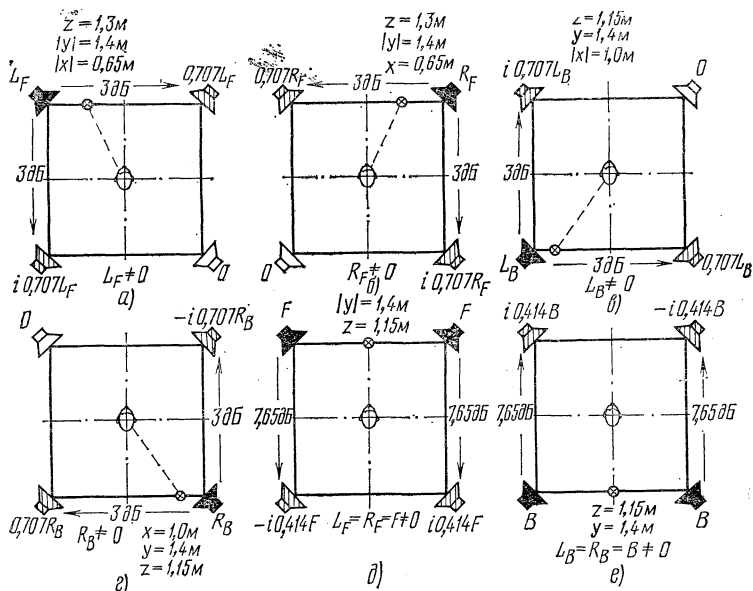


Рис. 7.9. Разделимость каналов и локализация основных КИЗ в системе QS

входы КУ сначала каждого из основных сигналов L_F , R_F , L_B , R_B (рис. 7.9а, б, в, г), а затем одинаковых по уровню и по фазе пар сигналов L_F , R_F и L_B , R_B (рис. 7.7д, е).

В системе QS разделимость каждого основного канала от соседнего мешающего составляет 3 дБ, разделимость диагональных каналов равна бесконечности, разделимость пар одинаковых по уровню полезных сигналов от мешающих равна 7,65 дБ.

Недостаточная разделимость соседних каналов (3 дБ) приводит, как будет показано ниже, к неуверенной локализации боковых КИЗ и к ощутимому суже-

нию величин кажущихся баз для передней и задней пар громкоговорителей.

Попытаемся преодолеть этот недостаток, свойственный системе QS, увеличив разделимость левых и правых каналов до максимально возможной величины, т. е. до бесконечности. Последнее будет выполнено для комплексных сигналов L' и R' (7.1), если положить $A=1$, $B=0$. При этом значения коэффициентов C и D следует выбрать так, чтобы обеспечить наибольшее ослабление

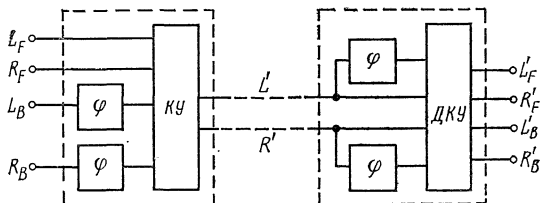


Рис. 7.10. Структурная схема электрического тракта системы SQ

в сигналах L' и R' мешающей информации. Это условие будет выполнено, если принять $C=-D=\Delta_1$. Очевидно, что при декодировании (7.2) бесконечная разделимость передних каналов будет сохранена, если положить $E=1$, $F=0$, тогда получим $L'_F=L'$ и $R'_F=R'$. Далее, чтобы получить бесконечную разделимость для левого и правого заднего каналов в $KУ$ и $ДКУ$, необходимо ввести широкополосные фазовращатели (аналогичные тем, которые применены в системе QS) и включить последние так, как это показано на рис. 7.10. Кроме того, для получения одинаковых по уровню мешающих сигналов следует положить $G=-H=\Delta_1$. С учетом всех этих соображений уравнения матрицирования примут вид

$$\begin{aligned}
 L'_F &= L' = L_F - i\Delta_1 L_B + \Delta_1 R_B; & L'_B &= i\Delta_1 L' - \Delta_1 R' = \\
 &= 2\Delta_1^2 L_B + i\Delta_1 L_F - \Delta_1 R'_F; \\
 R'_F &= R' = R_F - \Delta_1 L_B + i\Delta_1 R_B; & R'_B &= \Delta_1 L' - i\Delta_1 R' = \\
 &= 2\Delta_1^2 R_B + \Delta_1 L_F - i\Delta_1 R'_F.
 \end{aligned}
 \tag{7.11}$$

И, наконец, (7.11), в случае поочередного воздействия на входы $KУ$ каждого из основных сигналов одинаковые уровни полезных сигналов для передних и задних громкоговорителей обеспечиваются, если выполняется

равенство $2\Delta_1=1$. Его решение дает значение Δ_1 , равное 0,707.

Уравнения матрицирования (7.11) при $\Delta_1=0,707$ принадлежат другой широко известной системе матричной квадратофонии, называемой в литературе SQ [65,90], предложена фирмой «Columbia Sonu» США. Для этой системы на рис. 7.11 для тех же самых частных случа-

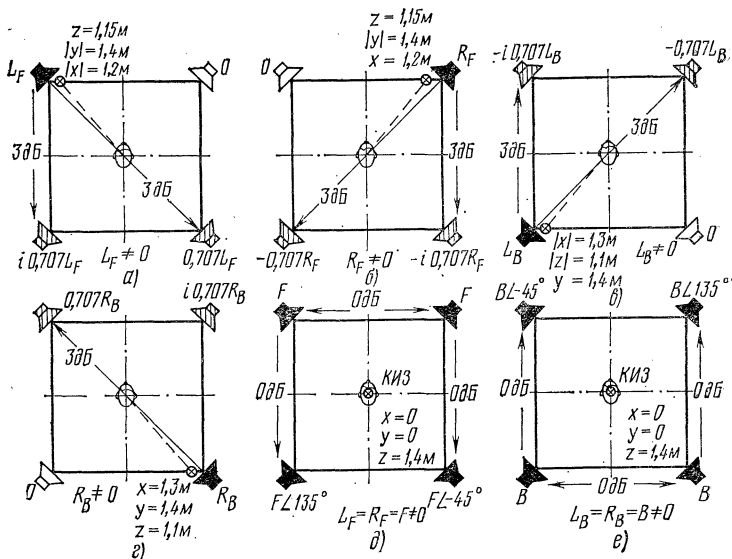


Рис. 7.11. Разделимость каналов и локализация основных КИЗ в системе SQ

ев, что и ранее (см. рис. 7.9), приведены значения коэффициентов разделимости, выраженные в децибелах. Громкоговорители, излучающие полезные и мешающие сигналы, показаны соответствующей штриховкой. Как и следовало ожидать, здесь достигнута бесконечная разделимость для левых и правых каналов. Если полезный сигнал излучается одним из громкоговорителей передней пары (на вход КУ воздействует сигнал L_F или R_F), то одинаковые по уровню мешающие сигналы при этом всегда излучаются громкоговорителями задней пары и наоборот. При этом уровень излучения каждого из мешающих громкоговорителей ниже на 3 дБ. Фронтальное и тыловое по отношению к голове слушателя расположение громкоговорителей, излучающих полезный и

мешающие сигналы, создает дополнительные преимущества для их разделения за счет различия в частотной фильтрации звуков, воздействующих на входы ушей слушателя спереди и сзади. При этом роль частотозависимого фильтра выполняют голова и ушные раковины слушателя. Именно за счет действия механизма «фронт — тыл» в системе SQ следует ожидать значительно меньшее сужение передней и задней кажущихся баз громкоговорителей по сравнению с системой QS. Однако, в отличие от последней, системе SQ присуща нулевая делимость для пар передних и задних каналов при условии, что $L_F=R_F$, а $L_B=R_B=0$ или $L_B=R_B$, а $L_F=R_F=0$. Это свидетельствует о том, что в ней принципиально невозможна (при отсутствии ЛСКУ) локализация КИЗ в центрах баз передней и задней пар громкоговорителей.

Дополнительное улучшение делимости каналов в системах QS и SQ достигается применением логической схемы контроля усилением каналов воспроизведения (см. ЛСКУ на рис. 7.7). Поясним работу этой схемы

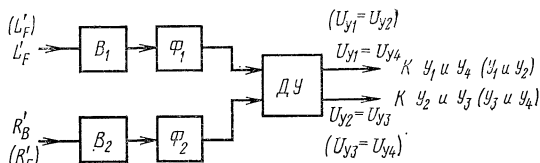


Рис. 7.12. Структура логической схемы контроля усиления каналов воспроизведения (обозначения в скобках относятся к системе SQ)

управления на примере системы QS, где на вход ЛСКУ поступают два любых диагональных восстановленных сигнала, например L'_F и R'_B . Допустим, что на входы КУ системы QS воздействует один из основных сигналов: левый передний L_F или правый задний R_B . При воздействии на вход КУ сигнала L_F имеем $L'_F=1$ и $R'_B=0$; если же входным сигналом является R_B , то $L'_F=0$, а $R'_B=1$. Резкое различие уровней этих сигналов используется схемой ЛСКУ (рис. 7.12), содержащей два выпрямителя — B_1 и B_2 , два RC-фильтра — Φ_1 и Φ_2 и дифференциальный усилитель ДУ для выработки управляющих напряжений $U_{y1}=U_{y4}$ и $U_{y2}=U_{y3}$, под действием которых (см. рис. 7.7) усилители $У_2$ и $У_3$ запираются, а усиление в каналах воспроизведения 1 и 4 становится максимальным. Таким образом устраняет-

ся мешающее влияние сигналов, излучаемых смежными с основным громкоговорителями Γp_2 и Γp_3 . Если же сигналы L'_F и R'_B равны по величине, то запираются каналы воспроизведения этих сигналов, а усиление в каналах воспроизведения R'_F и L'_B становится максимальным. При ином соотношении уровней сигналов L'_F и R'_B усиление всех четырех каналов воспроизведения регулируется в зависимости от величины отношения L'_F/R'_B .

Аналогичным образом построена ЛСКУ системы SQ. Отличие состоит в том, что входными сигналами являются L'_F и R'_F (или L'_B и R'_B), а парами одинаково управляемых усилителей служат уже $У_1, У_2$ и $У_3, У_4$, так как $U_{y1}=U_{y2}$, а $U_{y3}=U_{y4}$. Эти различия указаны на рис. 7.12 в скобках.

Итак, в любом случае работа ЛСКУ базируется на соотношении уровней восстановленных сигналов и не требует подачи на ее вход дополнительных управляющих сигналов. Введение ЛСКУ обеспечивает разделимость (изолированность) каналов не менее 15 дБ, что вполне достаточно. Работа этой системы незаметна для слушателей, если длительность процессов установления и восстановления коэффициентов передачи управляемых усилителей не превышает 40—50 мс.

До сих пор рассматривались системы, где не отдано предпочтение ни одной паре каналов. Оказывается, что путем соответствующего выбора коэффициентов матрицирования можно повысить разделимость фронтальных каналов от тыловых. На рис. 7.13 представлены зависимости изменения разделимости каналов от величины Δ при условии, что $A=C=E=G=1$, $B=-D=-H=\Delta$. При этом для всех значений Δ обеспечивается всегда одинаковая разделимость любого переднего канала от смежных и бесконечная разделимость любого переднего канала от соответствующего ему диагонального. Заметим, что эти кривые справедливы для случая поочередного воздействия на входы КУ каждого из основных сигналов L_F, R_F, L_B, R_B . Цифры в скобках обозначают номера каналов воспроизведения в соответствии с обозначениями громкоговорителей на рис. 7.7. Однако (см. рис. 7.13) увеличение разделимости передних каналов от смежных сопровождается одновременным ее ухудшением для задних каналов. Предельный случай представлен на рис. 7.14. Эти кривые получены при условии: $A=C=E=G=1$; $B=-D=\Delta$; $H=-1$. В этом случае

обеспечивается одинаковая и максимальная по величине разделимость каждого переднего канала от любого из трех мешающих, однако разделимость задних каналов между собой оказывается равной уже 0 дБ.

Конечно, в принципе предпочтение может быть отдано любой паре каналов, но наиболее целесообразно это

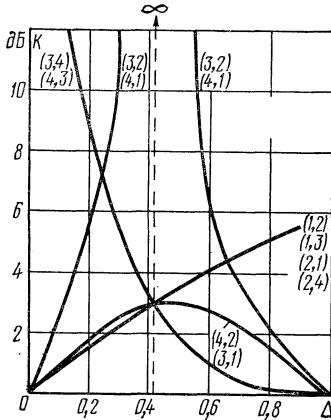


Рис. 7.13. Влияние коэффициентов матрирования на разделимость каналов

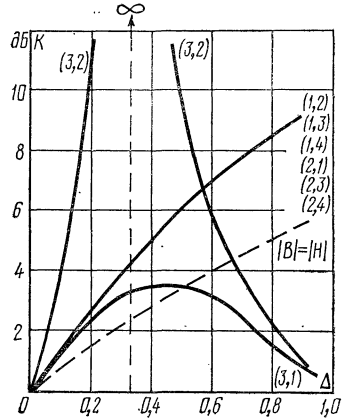


Рис. 7.14. Влияние коэффициентов матрирования на разделимость каналов (предельный случай)

условие выполнить для передней пары, так как именно она чаще всего несет основную информационную нагрузку. Очевидно, что такое построение матричной системы дает возможность отказаться от ЛСКУ, что упростит ее структурную схему. Недостатком же является значительно более худшая передача пространственной информации в задней полуплоскости.

Наиболее известной разновидностью подобных систем является «EV-stereo-4». Она разработана фирмой «Electro-Voice» США. Окончательный выбор коэффициентов матрирования в этой системе явился результатом проведения значительного числа экспериментальных работ. Эти коэффициенты имеют следующие значения:

$$A = E = G = C = 1; B = 0,3; D = -0,5; F = 0,2; H = -0,8. \quad (7.12)$$

После их подстановки в (7.1) и (7.3) окончательно получим выражения:

для комплексных сигналов

$$L' = L_F + 0,3R_F + L_B - 0,5R_B; R' = 0,3L_F + R_F - 0,5L_B + R_B; \quad (7.13)$$

для восстановленных сигналов

$$L'_F = 1,06L_F + 0,5R_F + 0,9L_B - 0,3R_B; L'_B = 0,76L_F - 0,5R_F + 1,4L_B - 1,3R_B; \\ R'_F = 0,5L_F + 1,06R_F - 0,3L_B + 0,9R_B; R'_B = -0,5L_F + 0,76R_F - 1,3L_B + 1,4R_B. \quad (7.14)$$

В системе «EV-stereo-4» принято, как и ранее, расположение громкоговорителей по системе «квадрат» (см. рис. 7.7). Значения коэффициентов разделимости (7.4), а также излучаемые громкоговорителями $Гр_1$ — $Гр_4$ сигналы для ряда частных случаев работы, позволяющие

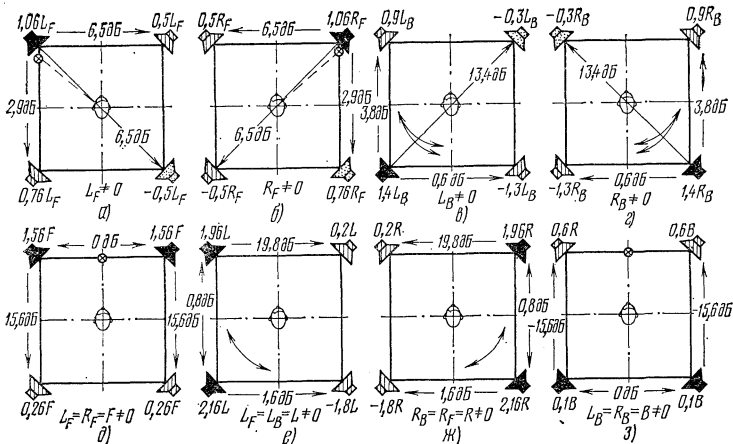


Рис. 7.15. Разделимость каналов и локализация основных КИЗ в системе «EV-stereo-4»

оценить возможности этой системы по передаче пространственной информации, приведены на рис. 7.15. Из рисунка следует, что система «EV-stereo-4» не способна правильно передать пространственную информацию в пределах всей азимутальной плоскости. Локализация оказывается достаточно уверенной и правильной для фронтальных (передних) каналов и невозможна на ли-

нии базы задних громкоговорителей, особенно посередине между $Гр_3$ и $Гр_4$. Этот КИЗ ($L_B=R_B$, а $L_F=R_F=0$) оказывается расположенным не сзади, а спе-

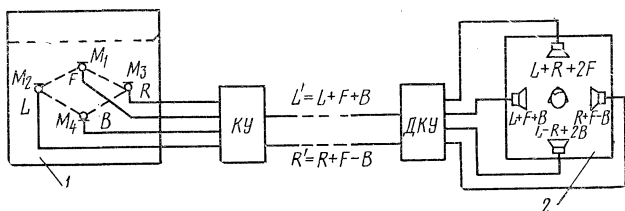


Рис. 7.16. Структурная схема системы Д. Хафлера

реди слушателя. Недостатком этой системы является также то, что при декодировании разделимость передних каналов друг от друга (L'_F от R'_F) уменьшается с

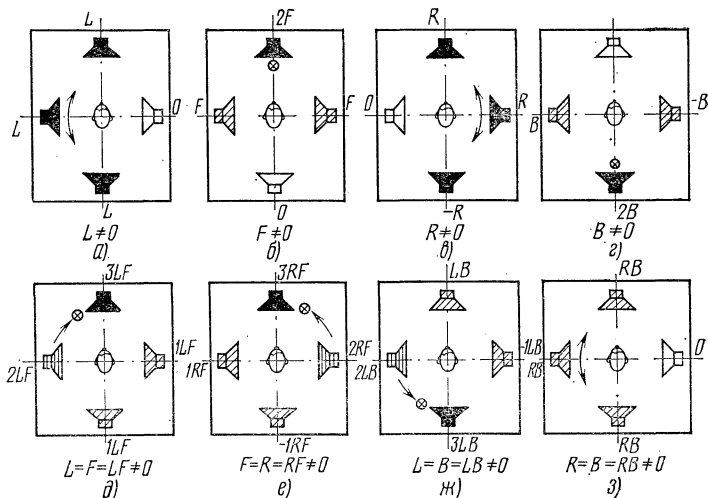


Рис. 7.17. Разделимость каналов и локализации основных КИЗ в системе Д. Хафлера

10 (заложено при кодировании для сигналов L' и R') до 6,5 дБ.

Система «EV-stereo-4» дает хорошие результаты при передаче, например, классической музыки, когда передние каналы используются для формирования пространственной панорамы оркестра, а задние — для воссоздания акустической атмосферы концертного зала.

Рассмотренный выше (см. рис. 7.7) способ расположения микрофонов в студии и громкоговорителей в помещении прослушивания не является единственно возможным. При этом также достаточно широко применяется расстановка громкоговорителей относительно слушателя по системе «ромб». Структурная схема такой системы, предложенной Д. Хафлером [92, 93], представлена на рис. 7.16. Микрофонные группы в этой системе также расположены иначе. Сигналы F , L , R , B микрофонных групп $M_1 — M_4$ подаются на $KУ$, которое преобразует их в два комплексных: левый ($L+F+B$) и правый ($R+F-B$). Отсюда следует, что система Д. Хафлера совместима с двухканальной стереофонией, однако при монофоническом воспроизведении исчезает сигнал заднего канала, что является недостатком. На приемной стороне после декодирования ($ДКУ$) образуются сигналы $L+R+2F$; $L+F-B$; $R+F-B$; $L-R+2B$, которые воспроизводятся соответственно передним $Гр_1$, левым $Гр_2$, правым $Гр_3$ и задним $Гр_4$ громкоговорителями. Значения коэффициентов разделимости и излучаемые громкоговорителями сигналы для частных случаев работы этой системы приведены на рис. 7.17. Очевидно, что в системе Д. Хафлера обеспечиваются уверенная локализация КИЗ в направлениях на передний и задний громкоговорители, значительно менее уверенная локализация на линиях баз $Гр_1-Гр_2$, $Гр_1-Гр_3$ и $Гр_2-Гр_4$, невозможность восприятия звука с направлений между $Гр_3$ и $Гр_4$. По правильности передачи пространственной информации она уступает даже системе «EV-stereo-4». Однако этот недостаток в значительной степени искупается простотой электрической схемы системы воспроизведения. Подключение громкоговорителей к стереоусилителю может осуществляться по одной из схем, приведенных на рис. 7.6, так как в системе Д. Хафлера закодированные сигналы подаются без изменения на левый и правый громкоговорители, суммарный сигнал идет на передний громкоговоритель, а разностный — на задний громкоговоритель. Простота реализации несомненно способствует росту популярности этой системы у потребителей.

Система Д. Хафлера удобна для записи классической музыки. При этом сигналы L , F и R должны преимущественно нести информацию о панораме оркестра, а сигнал B — об акустической атмосфере концертного зала.

Особенности локализации кажущихся источников звука. В отличие от двухканальной стереофонии, в матричных системах формирование кажущихся источников звука обусловлено совместным действием сигналов от трех, а чаще всего от четырех громкоговорителей.

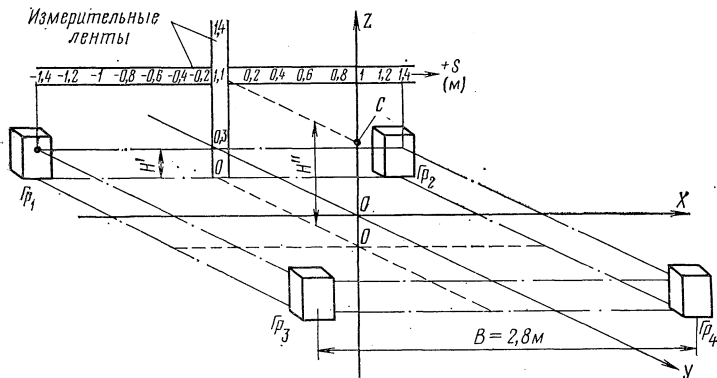


Рис. 7.18. Размещение громкоговорителей, системы координат и измерительных лент в помещении прослушивания

Рассмотрим особенности локализации КИЗ в новейших системах QS и SQ. Для этого с помощью специальной экспериментальной установки (последовательно во времени) синтезируем сигналы, воспроизводимые громкоговорителями этих систем при поочередном воздействии на входы KY как каждого из основных сигналов (L_F, R_F, L_B, R_B), так и их пар ($L_F, R_F; L_B, R_B; L_F L_B; R_F, R_B$). Далее путем проведения соответствующих серий экспертиз определим в системе координат XYZ (рис. 7.18) местоположения КИЗ, формируемых в каждом из этих частных случаев работы системы. Причем оси X и Y системы координат расположены в плоскости, проходящей через акустические центры громкоговорителей.

Ниже приводимые данные заимствованы из исследований, выполненных Ю. В. Берендюковым. При этом местоположения КИЗ, найденные путем проведения экспертиз, для каждого из упомянутых выше частных случаев показаны кружочками на рис. 7.9 (система QS) и 7.11 (система SQ). Здесь же рядом приведены координаты КИЗ x, y, z , выраженные в метрах в принятой системе отсчета. Заметим, что при проведении этих экспе-

риментов величина базы громкоговорителей была выбрана равной 2,8 м, их акустические оси были направлены на центр головы слушателя, последний находился в геометрическом центре акустической системы типа «квадрат». Громкоговорители располагались на полу, а средняя высота центра головы сидящего слушателя относительно плоскости, проходящей через акустические центры громкоговорителей, составляла 1,1 м. Испытательным сигналом послужил отрывок записи дикторского текста (женская речь). Перед началом каждого опыта отдельно для каждого эксперта проводилась тщательная балансировка акустической системы и лишь затем с помощью ступенчатых аттенуаторов, фазовращателей и элементов коммутации устанавливались уровни и фазовые сдвиги для воспроизводимых сигналов в соответствии с данными рис. 7.9 и 7.11. Кроме того, рассматривался наихудший случай работы каждой из исследуемых систем, когда отключена ЛСКУ.

Эти исследования показали, что системе QS (см. рис. 7.9) присуща неуверенная локализация боковых КИЗ, расположенных на линиях передней и задней пар громкоговорителей, и уверенная и четкая локализация переднего и заднего центральных звуковых образов. Величина фактически воспринимаемой передней базы оказывается в этой системе уменьшенной практически в 2 раза, а величина задней базы — на 30% по сравнению с действительным ее размером. Этот недостаток устраняется ЛСКУ, когда на вход КУ поступает любой одиночный основной сигнал.

В системе SQ (см. рис. 7.11) даже при отсутствии ЛСКУ наблюдается уверенная и четкая локализация крайних КИЗ, расположенных на линиях передней и задней пар громкоговорителей. При этом уменьшение кажущихся размеров этих баз практически не происходит. Однако локализация КИЗ в центрах передней и задней пар громкоговорителей невозможна. Действительно, в этих двух случаях ($L_F=R_F$ при $L_B=R_B=0$ и $L_B=R_B$ при $L_F=R_F=0$) делимости каждого из каналов друг от друга равны 0 (громкоговорители излучают одинаковые по уровню сигналы). Поэтому КИЗ локализируются в центре симметрии системы над головой слушателя, вместо того чтобы восприниматься соответственно из центра передней или задней баз громкоговорителей. Этот недостаток частично может быть устранен введением соответствующей схемы ЛСКУ.

В обеих системах, так же как и в дискретной квадрофонической, при расположении слушателя лицом к передней (или к задней) паре громкоговорителей невоз-

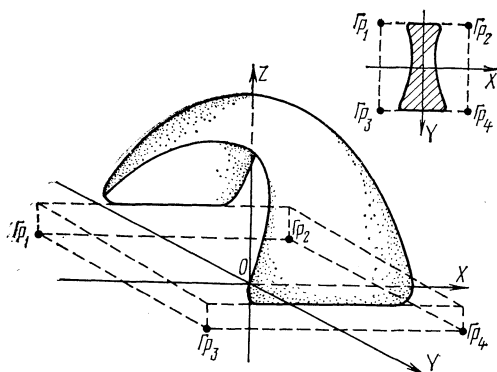


Рис. 7.19. Область уверенной локализации КИЗ для системы QS

можно локализация КИЗ в центрах боковых баз для акустической системы типа «квадрат».

Заметим также, что если на входы КУ (это утверждение одинаково справедливо для обеих систем) одно-

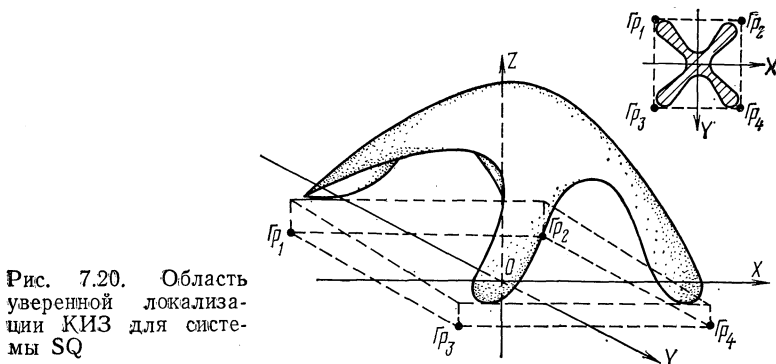


Рис. 7.20. Область уверенной локализации КИЗ для системы SQ

временно воздействуют все четыре основных сигнала, близких по уровню, то ЛСКУ не работает и разделимость каналов не улучшается.

Области возможных локализаций КИЗ для систем QS и SQ при отключенной ЛСКУ представлены соответственно на рис. 7.19 и 7.20. При наличии ЛСКУ области уверенной локализации КИЗ с учетом частных случаев работы этих систем практически не должны от-

личаться от той, которая свойственна дискретной квадрафонии.

Данные этих исследований свидетельствуют о том, что лучшие образцы матричных систем обеспечивают уверенную локализацию КИЗ как в передней, так и в задней полусфере и способны в значительно более лучшей степени, чем двухканальные, восстановить при воспроизведении в помещении прослушивания пространственную картину прихода звуков, свойственную первичному помещению. Поэтому их дальнейшее совершенствование является несомненно перспективным направлением развития техники вещания и звукозаписи.

7.3. Дискретные квадрафонические системы

Структурная схема дискретной квадрафонической системы показана на рис. 7.21. Группы направленных микрофонов $M_1 — M_4$ принимают в основном информацию соответственно из передней левой, передней правой, задней левой и задней правой частей первичного

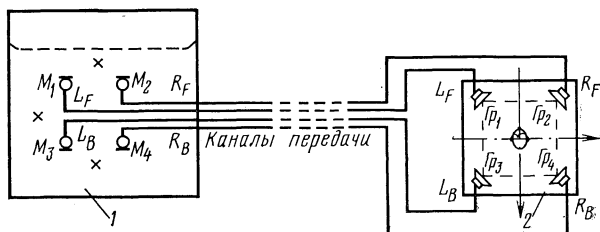


Рис. 7.21. Структурная схема дискретной квадрафонической системы звукопередачи

помещения 1. Воспринятые ими сигналы L_F, R_F, L_B и R_B по четырем независимым каналам передачи подаются на соответствующие синфазно включенные громкоговорители $Gr_1 — Gr_4$, установленные в помещении прослушивания 2.

Наличие четырех независимых каналов позволяет наилучшим образом передать пространственную информацию. Качество передачи последней, как было показано ранее, определяет предпочтительность, свойственную многоканальной стереофонии. Поэтому дискретные квадрафонические системы дают возможность получать мак-

симальный эффект, который вообще может дать четырехканальная звукопередача.

Квадрафония дает возможность получить пространственное восприятие, недоступное двухканальной передаче, например эффекты пролета самолета или стаи птиц над головой слушателя или вокруг него. Впечатление усиливается, если в начале и в конце пролета снижать уровни, создавая ощущение удаления от слушателя. Весьма интересные результаты получаются при воспроизведении стереограммы, при которой источники звука могут находиться на разных высотах или в литературно-драматических передачах, например голоса людей, слышимые с разных сторон, а также сценки из жизни природы и т. д.

Однако внедрение дискретной квадрафонии требует расширения полосы частот, нового приемо-передающего оборудования для осуществления радиовещания, существенного усложнения аппаратуры, предназначенной для воспроизведения четырехканальной записи. Немаловажной проблемой является также необходимость совместимости с уже применяемыми способами передачи и записи вещательных сигналов. До сих пор отсутствует единый стандарт на квадрафоническое оборудование.

Не останавливаясь на существующих разновидностях технической реализации дискретной квадрафонической системы в радиовещании и звукозаписи, так как они достаточно полно освещены в уже опубликованной литературе [4,36], уделим основное внимание особенностям передачи пространственной информации. При этом будем рассматривать лишь низкочастотный тракт дискретной системы, состоящей из четырех независимых каналов передачи и воспроизведения звука.

Экспериментальное исследование локализации КИЗ, выполненное Ю. В. Берендюковым, проводилось с помощью установки, структурная схема которой показана на рис. 7.22. Здесь M — монофонический магнитофон; PY_1 — PY_4 — регуляторы уровня для установки стереобаланса; $ДБ_1$ — $ДБ_4$ — основные калиброванные аттенюаторы для введения величин разностей уровней сигналов, воспроизводимых громкоговорителями; T_1 — T_5 — тумблеры для отключения каналов воспроизведения; PY_5 — аттенюатор регулировки уровня сигнала, воспроизводимого добавочным громкоговорителем $Гр$; $У$ — одноканальные усилители; $П_1$ — переключатель;

позволяющий подавать сигналы либо к громкоговорителям $Гр_1 — Гр_4$, установленным по системе «квадрат», либо к громкоговорителям $Гр'_1 — Гр'_4$, установленным по системе «ромб». Принятые в литературе условные обозначения воспроизводимых сигналов для каждого из громкоговорителей указаны в скобках.

Вспомогательный громкоговоритель использовался в качестве подставного действительного источника звука

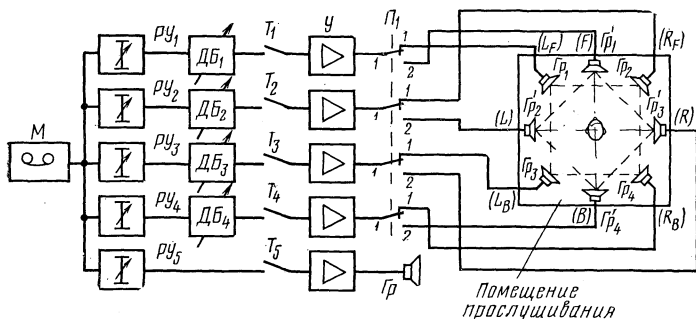


Рис. 7.22. Структурная схема установки для проведения экспериментов

для определения местоположения КИЗ в областях пространства, находящихся вне поля зрения эксперта. Последний имел возможность попеременного включения дополнительного и основных громкоговорителей.

Положение КИЗ в пространстве определялось в системе координат XYZ (см. рис. 7.18) с помощью измерительных лент с делениями, нанесенными через каждые 0,1 м. Слушатель находился в центре симметрии системы воспроизведения и был обращен лицом к передней базе в системе «квадрат» и переднему громкоговорителю в системе «ромб».

Исследования выполнены для синфазного включения громкоговорителей и их расположения: на высоте ушей слушателя и непосредственно на полу помещения прослушивания. Остальные условия проведения эксперимента были аналогичны описанному ранее на с. 304—305.

Область уверенной локализации КИЗ для акустической системы «квадрат» имеет вид воображаемого купола (рис. 7.23), опирающегося на громкоговорители. Здесь же, но в несколько меньшем масштабе изображен вид этого купола сверху. Различные точки локализации КИЗ на поверхности купола соответствуют определенным разностям уровней сигналов, излучаемых

громкоговорителями. Если уровень одного из громкоговорителей больше уровня каждого из остальных приблизительно на 15 дБ, то КИЗ локализуется в точке размещения данного громкоговорителя.

Локализация КИЗ на краях купола возможна при работе только двух громкоговорителей, расположенных на концах соответствующего края. При этом кривизна

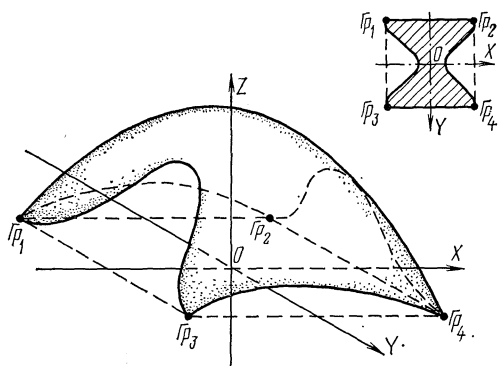


Рис. 7.23. Область уверенной локализации КИЗ для акустической системы «квадрат»

краев боковых поверхностей купола больше, чем передней и задней. Это говорит о существенных различиях в локализации КИЗ. Действительно, если при работе передней или задней пар громкоговорителей слушатель уверенно локализует КИЗ в любой точке на линии базы, то при работе любой из боковых пар локализация источника звука в промежуточных точках между позициями громкоговорителей, особенно в центре базы, оказывается невозможной. Последнее еще не нашло достаточного объяснения. Можно предположить лишь, что причиной этого является потеря корреляционной связи сигналов вследствие того, что их векторы на входах ушей слушателя оказываются сдвинутыми на 90° . Если же, кроме двух смежных громкоговорителей, сигналы излучаются еще одним или двумя громкоговорителями, то КИЗ смещается от краев купола к его вершине, т. е. претерпевает дополнительный подъем вверх.

Определение высоты воображаемого купола затруднено тем, что это связано с глубинной локализацией, которая оценивается с гораздо меньшей точностью, чем азимутальная. Однако можно считать, что высота купола примерно равна расстоянию от центра симметрии

акустической системы до каждого из громкоговорителей.

Область уверенной локализации КИЗ для акустической системы «ромб» представлена на рис. 7.24. В отличие от системы «квадрат», здесь возможна уверенная локализация КИЗ для любых азимутальных направлений. Наличие действительных источников звука спереди

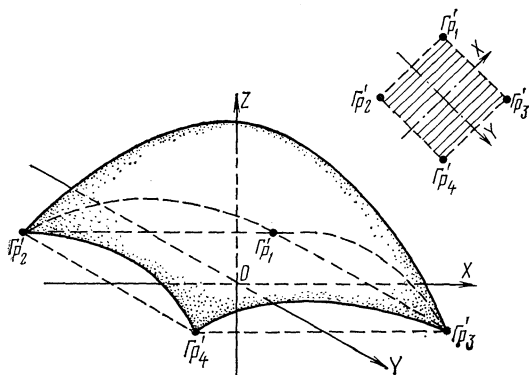


Рис. 7.24. Область уверенной локализации КИЗ для акустической системы «ромб»

(Gr'_1), слева (Gr'_2), справа (Gr'_3) и сзади (Gr'_4) уменьшает кривизну краев купола и увеличивает тем самым площадь поверхности последнего.

Это является преимуществом системы «ромб». Наряду с этим следует отметить и недостаток. Если воспроизводится двухканальная стереофоническая передача (а не квадрафоническая), то слушатель должен или переставить громкоговорители в обычное для двухканальной стереофонии положение, или повернуться на угол 45° лицом к базе работающих громкоговорителей, или, наконец, изменить подключение громкоговорителей к стереоусилителю, используя вариант, приведенный на рис. 7.1а. Последний представляет собой одну из простейших разновидностей псевдоквадрафонии.

Для уточнения формы краев купола исследовались особенности локализации КИЗ при работе пар громкоговорителей Gr_1 и Gr_2 или Gr_3 и Gr_4 в системе «квадрат» и Gr'_1 , Gr'_2 и Gr'_2 , Gr'_4 в системе «ромб».

Система «квадрат» в данном случае не отличается от обычной двухканальной стереофонической, особенно азимутальной локализации КИЗ для которой были подробно рассмотрены в гл. 2. Представляет интерес лишь выяснение величины подъема КИЗ, особенно за-

метное, если расстояние между слушателем и линией базы работающей пары громкоговорителей не превышает величину B . Это условие всегда выполняется для системы «квадрат».

Результаты этих исследований отображены на рис. 7.25. Величины смещения S и высоты подъема z кажущегося источника звука отложены в метрах, причем величина S отсчитывается от центра базы, а z — от уровня пола помещения прослушивания. База громко-

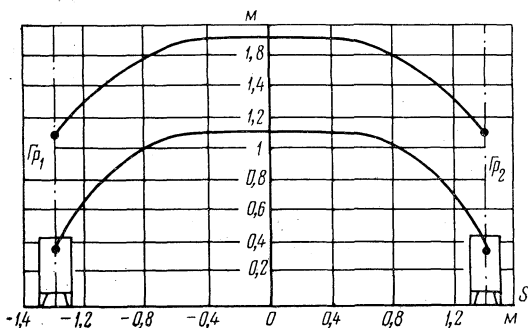


Рис. 7.25. Подъем кажущегося источника звука B в системе «квадрат»

ворителей равна 2,8 м. Верхняя кривая соответствует установке громкоговорителей на уровне головы сидящего слушателя 1,1 м, нижняя — их установке на полу. Наибольшая величина подъема КИЗ наблюдается для центра базы $S=0$. При этом изменение высоты установки громкоговорителей вызывает практически аналогичное изменение высоты подъема центрального КИЗ. Величина подъема центрального КИЗ над линией, соединяющей акустические центры громкоговорителей, составляет 0,6—0,8 м. Поэтому наиболее предпочтительна установка громкоговорителей на полу, так как при этом центральный КИЗ оказывается расположенным на уровне головы сидящего слушателя.

Локализация КИЗ на линии базы задних громкоговорителей столь же уверенная и четкая, несмотря на то, что слушатель расположен к ним спиной. Местоположение КИЗ при работе этой пары громкоговорителей определялось с помощью подставного действительного источника звука, который по команде слушателя совмещался экспериментатором с кажущимся. Величина $\Delta L=12\div 14$ дБ, как и ранее, достаточна для перемещения КИЗ в позицию громкоговорителя. Однако величи-

на подъема центрального КИЗ над линией, соединяющей акустические центры громкоговорителей, здесь несколько меньше и составляет 0,5—0,7 м.

Иная картина получается, если работает боковая пара громкоговорителей $Гр_1$, $Гр_3$ или $Гр_2$, $Гр_4$. При равных уровнях излучаемых сигналов показания экспертов неустойчивы и различны: КИЗ кажется расположенным им либо вблизи одного из громкоговорителей, либо «размытым» по всей базе. При неравных уровнях КИЗ оказывается в непосредственной близости от громкоговорителя, излучающего сигнал с большим уровнем. Все это свидетельствует о том, что азимутальная локализация звуковых образов на линиях, соединяющих боковые громкоговорители, в системе «квадрат» невозможна. Это ее недостаток.

И, наконец, при работе передней пары громкоговорителей $Гр_1$ и $Гр_2$, излучающих одинаковые по уровню сигналы $L_F = R_F$, порог заметности изменения локализации формируемого ими центрального переднего КИЗ под действием сигналов задней пары громкоговорителей $Гр_3$ и $Гр_4$, также сбалансированных по уровню $L_B = R_B$, составляет порядка -7 дБ. Для заднего центрального КИЗ эта величина несколько больше и равна -9 дБ. За величину порога принято смещение КИЗ от своего первоначального положения (работает только или передняя, или задняя пара громкоговорителей) вверх на 0,1 м (когда излучают все четыре громкоговорителя).

Результаты экспертиз по оценке величины подъема КИЗ в системе «ромб» показаны на рис. 7.26. Высота подъема z КИЗ отсчитывается здесь от линии, соединяющей акустические центры работающей пары громкоговорителей, так как влияние высоты установки последних не отличается от предыдущего случая (см. рис. 7.25). Сплошная кривая соответствует работе пары громкоговорителей $Гр'_1$ и $Гр'_2$, пунктирная — $Гр'_3$ и $Гр'_4$. Величина наибольшего подъема КИЗ в системе «ромб» меньше, чем в системе «квадрат».

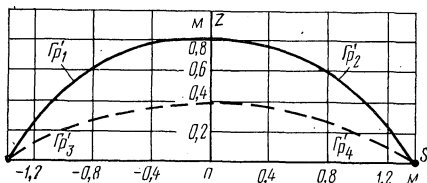


Рис. 7.26. Подъем кажущегося источника звука в системе «ромб»

Зависимости смещения КИЗ от величины введенной интенсивностной разности ΔL , дБ, для пар громкоговорителей $Гр'_1, Гр'_2$ и $Гр'_3, Гр'_4$ в системе «ромб» приведены на рис. 7.27. Обозначение кривых $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$ на этом рисунке характеризует работающие пары громкоговорителей. Величина S , как и ранее, отсчитывается от центра базы.

Из рис. 7.27 следует, что при $\Delta L = 0$ дБ величина $S \neq 0$. При этом КИЗ оказывается смещенным в сторону громкоговорителя $Гр'_1$ (кривая $Гр'_1, Гр'_2$) или в сторону заднего громко-

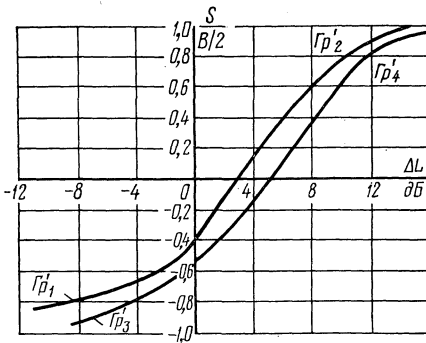


Рис. 7.27. Зависимость смещения КИЗ от интенсивностной разности в системе воспроизведения типа «ромб»

ворителя (кривая $Гр'_3, Гр'_4$). Локализация КИЗ посередине каждой из баз обеспечивается, если уровень сигнала передним громкоговорителем, на 3 дБ меньше, а задним громкоговорителем на 5 дБ меньше, чем боковым.

В системе «ромб» все слушатели отмечали уверенную локализацию КИЗ во всех азимутальных направлениях (в пределах угла 360°).

При этом можно считать, что перемещение КИЗ в горизонтальной плоскости для этой системы происходит по траектории, близкой к окружности, соединяющей громкоговорители.

Величины порога заметности изменения локализации передних и задних центральных КИЗ при перемещении их по траекториям связывающим центры баз противоположных пар громкоговорителей и проходящим через вершину купола, для системы «ромб» составляют соответственно -14 и -12 дБ.

Сопоставление особенностей локализации КИЗ в двух рассмотренных выше системах расположения громкоговорителей позволяет сделать вывод, что с точки зрения передачи пространственной информации наиболее предпочтительна система «ромб» с установкой громкоговорителей на полу.

Все изложенные выше особенности дискретной квадрафонической системы справедливы для случая интенсивностного метода формирования стереопанорамы, который получает преимущественное применение в современной практике создания квадрафонических программ.

7.4. Зона стереовосприятия и метод ее расширения

До сих пор рассматривались особенности локализации КИЗ в дискретной квадрафонической системе для случая расположения слушателя в геометрическом центре акустической системы воспроизведения. В отличие от двухканальной стереофонии, здесь смещение слушателя из центра симметрии в любом направлении приведет к появлению дополнительных временных и интенсивностных разностей, обусловленных различием расстояний до громкоговорителей. Последнее явится причиной того, что изменится задуманное звукорежиссером пространственное расположение источников звука, все они окажутся смещенными в сторону ближнего к слушателю громкоговорителя. Возникнут пространственные искажения, следовательно, ухудшится предпочтительность.

Поэтому здесь также следует говорить о зоне стереовосприятия, под которой будем понимать часть площади пола помещения прослушивания, для каждой точки которой величина смещения любого КИЗ от его первоначального положения (заданного звукорежиссером, находящимся в геометрическом центре системы) не превосходит допустимого значения. Исследования показали, что наиболее неустойчивыми КИЗ являются те из них, которые расположены в центрах баз и в вершине купола. Они обозначены цифрами 1, 2, 3 для системы «квадрат» и цифрами 1, 2, 3, 4 и 5 для системы «ромб» (рис. 7.28). При этом самым неустойчивым является КИЗ, находящийся над геометрическим центром акустической системы. Очевидно, что величина зоны стереовосприятия может быть легко найдена, если задаться допустимым смещением именно этого КИЗ, так как величины пространственных искажений для всех остальных звуковых образов купола будут заведомо меньше. Чаще всего величина допустимого смещения принимается равной 0,1—0,2 м.

Как показали эксперименты, величина зоны стереовосприятия при квадрафоническом воспроизведении

(если используются обычные, чаще всего малонаправленные громкоговорители) не превышает 4—6% от площади квадрата или ромба, образованного громкоговорителями. Практически она ограничена (если запись не

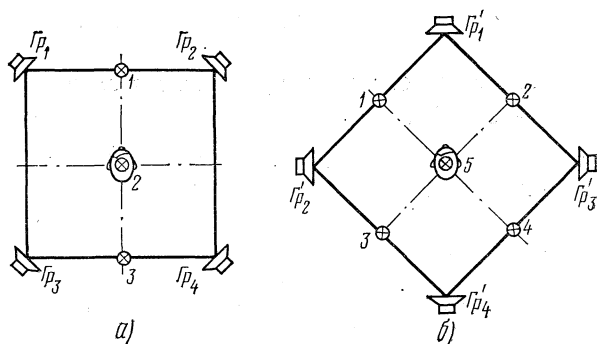


Рис. 7.28. Наиболее неустойчивые КИЗ для акустических систем «квадрат» и «ромб»

поканальная) одним слушательным местом, находящимся в центре симметрии акустической системы. Последнее существенно снижает потребительское качество квадрафонических систем, превращая их в устройства, пригодные для индивидуального прослушивания.

Расширение зоны стереовосприятия одновременно как в поперечном, так и продольном направлениях возможно лишь при применении громкоговорителей, имеющих направленное излучение звука в вертикальной и ненаправленное в горизонтальной плоскостях.

Предположим, что акустическая система установлена на полу и разность по высоте (H на рис. 7.29) между громкоговорителями и центром головы слушателя

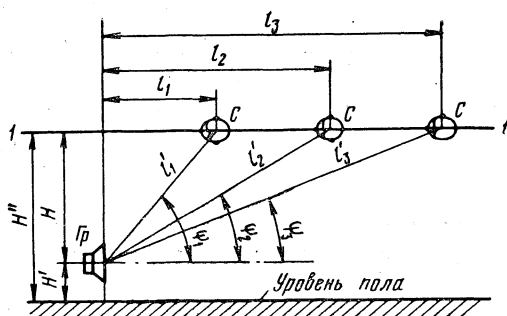


Рис. 7.29. Расположение слушателя и громкоговорителей акустической системы по высоте

остается неизменной при его перемещении по линии $I-I$. При величине $H \neq 0$ расстояние от слушателя до громкоговорителя (l_1, l_2, \dots, l_n или l'_1, l'_2, \dots, l'_n) однозначно связано с величиной угла ($\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$) в вертикальной плоскости. Это обстоятельство и дает возможность использовать для расширения зоны стереовосприятия направленное излучение звука только в вертикальной плоскости. При этом необходимо, чтобы уровень излучения для каждого громкоговорителя возрастал бы по определенному закону с увеличением расстояния до него или, что то же самое, с уменьшением угла ψ . Очевидно, чем больше величина H , тем требуется меньшее изменение направленности.

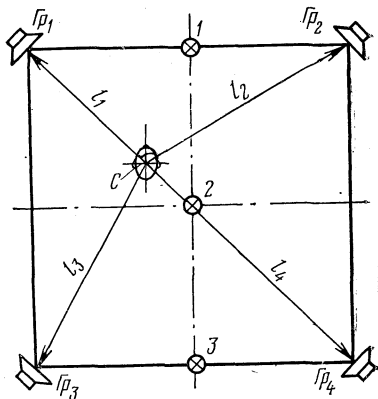


Рис. 7.30. К пояснению возможности стабилизации КИЗ в акустической системе, использующей только направленное излучение звука в вертикальной плоскости.

Пусть громкоговорители, удовлетворяющие этому требованию, установлены по системе «квадрат».

Действительно (рис. 7.30), если слушатель сместится из центра системы, например, в точку C ,

то уменьшится расстояние l_1 до Γp_1 и увеличится, но в разной степени расстояния l_2, l_3, l_4 до громкоговорителей $\Gamma p_2, \Gamma p_3$ и Γp_4 . Это вызовет (за счет характеристик направленности громкоговорителей) уменьшение интенсивности излучения звука для Γp_1 и соответствующее (неодинаковое по величине) его увеличение для $\Gamma p_2, \Gamma p_3$ и Γp_4 , так как $l_1 \neq l_2 \neq l_3 \neq l_4$. При этом окажется выполненным условие: $L_1 < L_2 < L_3 < L_4$, где L_1, L_2, L_3 и L_4 — уровни сигналов, излучаемых соответственно каждым из громкоговорителей ($\Gamma p_1 - \Gamma p_4$) в направлении на точку C . Такое соотношение уровней излучения приводит к одновременной стабилизации всех КИЗ при квадрафоническом воспроизведении, так как в той или иной степени компенсирует действие на орган слуха дополнительных временных и интенсивностных разностей, обусловленных асимметричным положением слушателя относительно громкоговорителей.

Этот метод расширения зоны стереовосприятия в равной степени применим и для двухканальных систем.

7.5. Оптимальные характеристики направленности громкоговорителей для акустической системы типа «квадрат»

Изложенный ниже метод построения оптимальных характеристик направленности громкоговорителей предложен А. П. Караченцевым.

Как было показано ранее, для системы «квадрат» достаточно выполнить условие стабилизации только для трех КИЗ, обозначенных точками 1, 2 и 3 на рис. 7.28а. Принимая во внимание практически полную идентичность зависимостей $\frac{S}{B/2} = f(\Delta L)$ для передней и задней пар громкоговорителей, достаточно ограничиться лишь исследованием условий стабилизации КИЗ для одной из них и перенести полученные результаты на другую пару громкоговорителей.

Прежде всего (см. рис. 7.29) экспериментальным путем найдем для каждого громкоговорителя зависимость требуемого изменения уровня излучения L , дБ, от расстояния l , м. Допустим (рис. 7.31), что слушатель C перемещается по окружности радиуса l_L , центром которой является левый передний громкоговоритель $Гр_1$.

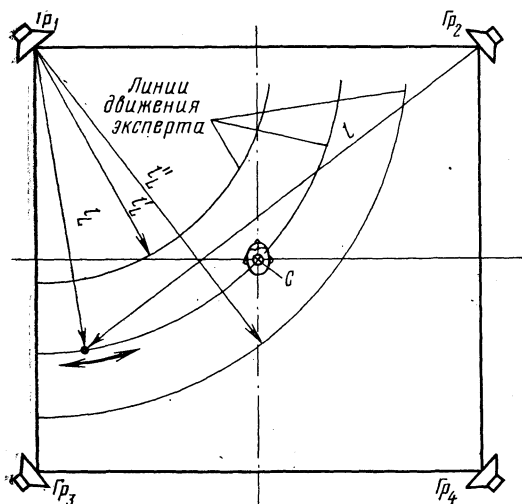


Рис. 7.31. К построению оптимальных характеристик направленности громкоговорителей квадрафонической системы

Путем проведения соответствующих экспертиз для каждой точки этой окружности определим уровень излучения L , дБ, правого громкоговорителя Gr_2 , необходимый для локализации КИЗ в центре базы Gr_1 и Gr_2 . При этом уровень сигнала, излучаемого Gr_1 , не будем менять и за нулевой уровень примем величину L для точки C , являющейся центром симметрии системы.

Исследования выполним для трех значений l_L (см. рис. 7.31). Их результаты представим в виде семейства зависимостей $L=f(l)$, параметром каждой из которых является величина радиуса l_L . На рис. 7.32 представлена зависимость $L=f(l)$, усредненная по результатам всех экспертиз для каждого значения l . Заметим, что при проведении этих исследований величина $B = 2,8$ м; $H'' = 1,15$ м; $H' = 0,3$ м, испытательным сигналом послужил отрывок дикторского текста (женская речь). Акустические оси громкоговорителей были всегда ориентированы на центр головы слушателя. Конечно, при других условиях проведения эксперимента получим иные количественные соотношения, но качественно картина не изменится.

Если теперь для каждого из громкоговорителей с помощью вертикальной направленности обеспечить выполнение зависимости, показанной на рис. 7.33, то

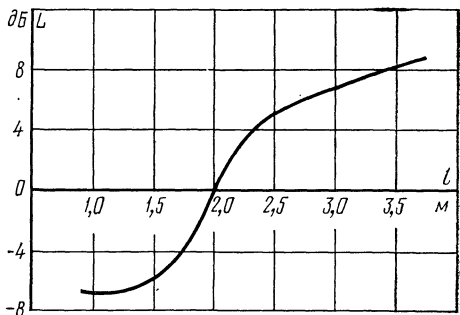


Рис. 7.32. Изменение уровня излучения громкоговорителя с расстоянием, необходимое для стабилизации КИЗ стереопанорамы

будет достигнута стабилизация всех наиболее неустойчивых КИЗ (см. рис. 7.28а) при перемещении слушателя в любом направлении от центра симметрии системы.

Перейдем к рассмотрению метода построения оптимальной характеристики направленности громкоговорителей, установленных по системе «квадрат». Суть его пояснена графически на рис. 7.33 и сводится к следующему. Сначала изображается в масштабе размещение

одного из громкоговорителей и слушателя по высоте. Здесь же горизонтальной прямой $l-l$ показывается перемещение головы слушателя и на этой линии (в том же масштабе) наносятся деления, отмечающие расстояние l , м, последней от излучателя. Далее с помощью зависимости $L=f(l)$ для каждой точки расположения головы слушателя по известному значению l определяется необходимый для направления на нее уровень излучения L , дБ. Эта величина в определенном масштабе откла-

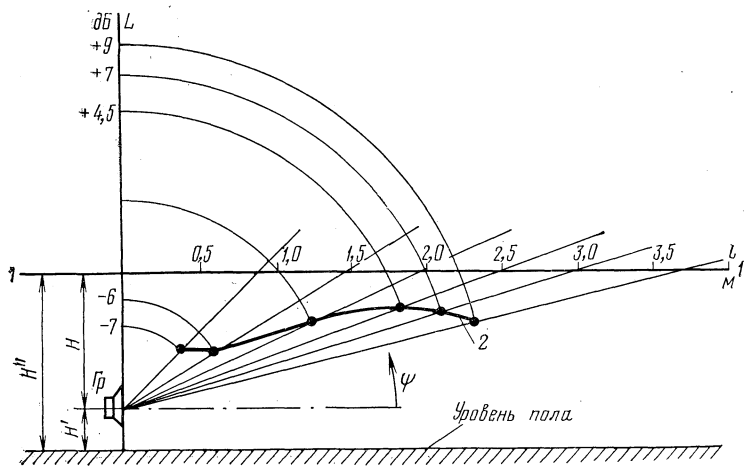


Рис. 7.33. Оптимальная характеристика направленности громкоговорителя в вертикальной плоскости для системы «квадрат»

дывается на прямой, соединяющей данную точку с акустическим центром громкоговорителя. Полученные таким образом точки (см. рис. 7.33) соединяются плавной линией 2 представляющей собой не что иное, как оптимальную характеристику направленности квадрафонического громкоговорителя в вертикальной плоскости, построенную для случая $B=2,8$ м, $H''=1,15$ м, $H'=0,3$ м.

Заметим (см. рис. 7.33), что для расширения зоны стереовосприятия необходимо обеспечить изменение направленности в вертикальной плоскости порядка 14—16 дБ на 30° , в то время как решение этой задачи в двухканальной стереофонии путем применения громкоговорителей, направленных только в горизонтальной плоскости, достигается, если это изменение составляет лишь 6—8 дБ. Кроме того, использование вертикальной направленности дает эффект, если сохраняется постоян-

ной величина H (см. рис. 7.29) при перемещении слушателя. Все это создает дополнительные трудности при реализации подобных громкоговорителей и накладывает определенные ограничения при их размещении в жилой комнате. Именно по этим причинам в двухканальной стереофонии более предпочтительно использование горизонтальной направленности.

Преимуществом же громкоговорителей с вертикальной направленностью является их универсальность, т. е. пригодность в равной степени как для двухканальных, так и четырехканальных звуковоспроизводящих систем. Причем для квадрафонии — это единственный способ одновременной стабилизации всех КИЗ воображаемого купола при перемещении слушателя из центра симметрии системы воспроизведения в любом направлении.

7.6. Система звукопередачи с использованием «искусственной головы»

Новейшие исследования природы такого явления, как локализация реальных и кажущихся источников звука слуховым органом человека, привели к созданию нового типа двухканальной электроакустической системы звукопередачи. Последний получил название «Kunstkopf-Stereophonie» (или дословно стереофония с использованием «искусственной головы»).

Рассмотрим сначала теоретические предпосылки, являющиеся основой для создания этого типа электроакустической системы звукопередачи. Простая схема, представленная на рис. 7.34, наглядно иллюстрирует тот факт, что бинауральные различия по времени Δt_6 и по интенсивности ΔL_6 для сигналов, воздействующих на левый 1 и правый 2 входы органа слуха от реального источника звука, не определяют однозначно местоположение последнего в пространстве. Действительно, для каждой гиперболы, построенной так, что ее фокусами являются входы органа слуха 1 и 2, существуют всегда две точки: А и В (см. рис. 7.34), для которых (даже при учете маскирующего действия головы слушателя) обеспечиваются приблизительно одинаковые значения ΔL_6 и Δt_6 . Одна из этих точек А лежит в передней полусфере (фронт), другая В — в задней (тыл). Кроме того, для источников звука, расположенных в медианной плоскости ($\Delta r = 0$), также не существует однозначной связи между величинами ΔL_6 и Δt_6 и направлением воздействия. Тем не менее и в этих случаях локализация ре-

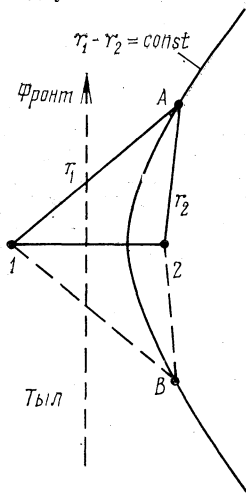


Рис. 7.34. К неоднозначности локализации КИЗ при различии входных сигналов только по уровню (ΔL_6) и по времени запаздывания (Δt_6)

альных звуковых образов оказывается безошибочной, даже если голова эксперта механически закреплена. Очевидно, что орган слуха имеет дополнительные возможности для различения фронтального и тылового направлений при формировании окончательного суждения.

Поясним принцип действия этого механизма, получившего название «фронт—тыл». Предварительно рассмотрим наиболее простой случай: в заглушенной камере на слушателя одновременно воздействуют сигналы от двух громкоговорителей: Gr_1 и Gr_2 . Последние установлены на уровне головы слушателя точно спереди (фронт) и сзади (тыл) на равном удалении. Допустим, что громкоговорители излучают тождественные сигналы, представляющие собой $1/3$ октавные полосы шума. Пусть голова слушателя механически зафиксирована, а экспериментатор имеет возможность изменять в случайной последовательности средние частоты предъявляемых сигналов. В каждом отдельном случае слушатель должен был указать воспринимаемое направление. Результаты этих экспериментов, выполненных Блауэртом [66], представлены на рис. 7.35а. По оси абсцисс отложены средние частоты полос шума в килогерцах, а по оси ординат — относительная частота экспертопоказаний для каждого из трех основных направлений: фронт (кривая Φ), тыл (кривая T) и верх (кривая B). Здесь представлены усредненные кривые, полученные для 20 экспертов. Нетрудно видеть, что воспринимаемое направление для узкополосного сигнала определяется только его средней частотой и не зависит ни от уровня излучения громкоговорителей, ни от длительности их звучания. При этом функциональная связь между направлением звукового ощущения и частотой сигнала может быть описана с помощью так называемых «полос направления». Последние показаны в нижней части рис. 7.35а и отмечены соответствующими сочетаниями букв — ΦN , $T N$ и $B N$. Например, если спектр сигнала, излучаемого громкоговорителями, лежит в полосе направлений ΦN , то слушатель из трех возможных суждений — Φ , T и B — уверенно предпочитает фронтальное. Дополним результаты этих психоакустических экспертиз данными измерений. С помощью зондовых микрофонов измерим средние уровни звуковых давлений вблизи барабанных перепонок для левого и правого уха слушателя при поочередной работе фронтального и тылового громкоговорителей. Затем, если для каждой полосы $1/3$ октавного шума вычислим разность этих уровней: $\Delta L_{\Phi T} = L_{\Phi} - L_T$, дБ, то получим результаты, показанные на рис. 7.35б. Фактически эта кривая оценивает влияние головы и ушных раковин слушателя на изменение спектра воспринимаемых сигналов для фронтального и тылового направлений прихода звуковой волны. Используя полученную зависимость, покажем (так как это сделано в верхней части этого рисунка) полосы частот, где наблюдается повышение уровней звукового давления для фронтального ΦN и тылового $T N$ громкоговорителей.

Сравнение результатов экспертиз и данных измерений (см. рис. 7.35а и б) показывает хорошее совпадение на оси частот позиций полос ΦN и $T N$ и соответственно $T N$ и $T P$. Последнее позволяет допустить (и это подтверждено экспериментально), что при предъявлении широкополосных сигналов ощущаемое направление в основном определяется той совокупностью полос направления (ΦN или $T N$), для которых в данном сигнале энергия оказывается наибольшей.

Эти исследования позволяют пояснить действие механизма «фронт—тыл» следующим образом. Акустический сигнал, воздействующий от источника звука на входы органа слуха, претерпе-

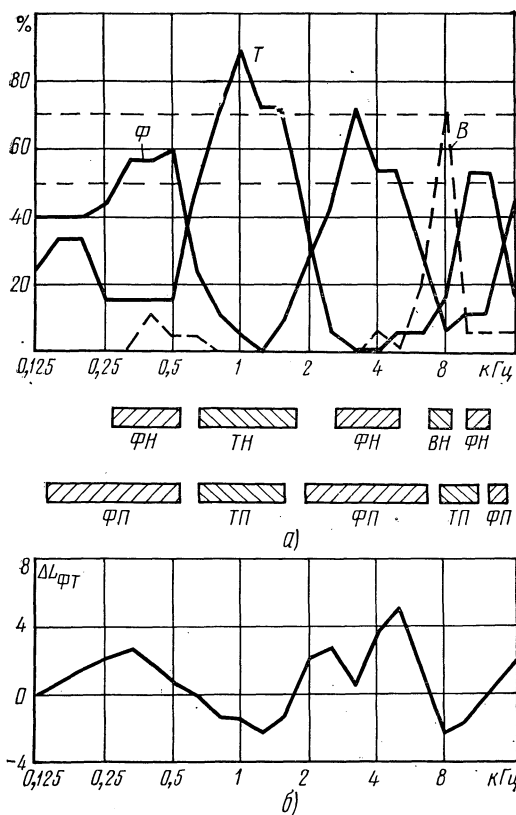


Рис. 7.35. К пояснению особенностей работы механизма «фронт—тыл»

вает линейные искажения вследствие частотозависимого влияния головы и ушных раковин слушателя. Можно сказать, что голова и ушные раковины слушателя играют роль фильтра, форма частотной характеристики которого зависит от направления прихода звуковой волны. Заметим, что эта «фильтрация» связана с дифракционными явлениями при огибании звуковой волной головы слушателя (зависящими от отношения размеров головы к длине звуковой волны), поглощательной способностью головы (различной на разных частотах) и формой ушной раковины. В результате происходит усиление и ослабление спектральных составля-

щих сигнала в определенных полосах, местоположение которых на оси частот зависит от направления прихода звуковой волны. Суждение о направлении определяется совокупностью тех «полос направления», которые оказались «усиленными» после этой фильтрации, так как (и это очевидно) те группы частот спектра мощности, которые несут основную энергию, играют и наибольшую роль при локализации.

Теперь, используя изложенные выше особенности работы механизма «фронт—тыл» и сведения гл. 1 и 2, нетрудно представить структурную схему простейшей двухканальной звуковой системы, обеспечивающей передачу пространственной информации не только в передней, но и в задней полусфере. В отличие от ранее описанных систем, здесь [112] приход звука в первичном помещении осуществляется с помощью микрофонов M_1 и M_2 , установленных в макете, имитирующем не только форму головы и ушных раковин, но также свойства слухового прохода и реальное акустическое сопротивление барабанной перепонки. Воспроизведение звука во вторичном помещении осуществляется электродинамическими телефонами с неравномерностью частотной характеристики 2,5 дБ во всем диапазоне слышимых частот. При этом телефоны должны быть расположены на небольшом расстоянии от ушей, что позволяет устранить неприятное ощущение давления на ушную раковину. Такая система звукопередачи была реализована в последние годы в Институте технической акустики в Западном Берлине и затем была использована при проведении экспериментальных передач в радиовещании. Экспериментальные исследования привели к обнадеживающим результатам: оказывается возможной весьма тонкая слуховая оценка акустических свойств первичного помещения (точнее свойственная тому слушательскому месту в последнем, где была расположена «искусственная голова» с микрофонами) и, наряду с этим, уверенное восприятие направлений прихода звуков как в передней, так и задней полусфере. Благодаря этому возникает полная иллюзия присутствия слушателя в определенной точке первичного звукового поля. По-видимому, как считают Р. Кюрер, Г. Пленге и Г. Вилькенс, неудача всех предшествующих попыток реализации такой системы звукопередачи объясняется лишь несовершенством моделирования формы человеческой головы и условий воспроизведения. Прослушивание через головные телефоны имеет ту особенность, что весь звуковой образ (панорама) ощущается расположенным внутри головы слушателя, что является несколько непривычным, так как в условиях естественного слушания (концертный зал) это невозможно. Однако этот эффект не может считаться недостатком данного способа воспроизведения. Кроме того, еще до конца не ясно, является ли эта психологическая особенность непреодолимой при воспроизведении через головные телефоны или же орган слуха можно (путем соответствующей обработки входных сигналов) «обмануть» таким образом, что воспринимаемые звуковые образы окажутся расположенными вне его.

Дальнейшим развитием этого способа звукопередачи является замена телефонов громкоговорителями. В системе TRADIS¹, предложенной и исследованной П. Дамаске и В. Меллертом [75], ис-

¹ Сокращение от английского названия этого способа передачи: «The Reproduction of All Directional Information by Stereophony».

пользуются два громкоговорителя — $Гр_1$ и $Гр_2$, установленных перед слушателем так же, как и при обычном стереовоспроизведении. Применение громкоговорителей в системе звукопередачи с использованием «искусственной головы» становится возможным только при условии эффективной компенсации перекрестных сигналов (рис. 7.36), один из которых принимается левым ухом 1 от правого громкоговорителя $Гр_2$, а второй — правым ухом 2 от левого громкоговорителя. Именно наличие этих сигналов делает практически невозможной локализацию КИЗ за пределами базы громкоговорителей. Для компенсации перекрестных сигналов (см. рис. 7.36) к основному сигналу $L(t)$ или $R(t)$ каждого из громкоговорителей ($Гр_1$ или $Гр_2$) добавляется предварительно прошедший через фильтр Φ (амплитудно-частотная и фазовая характеристики которого показаны здесь же для случая, когда $\chi = 0$ и $\psi = 36^\circ$) и линию задержки ЛЗ ($\Delta\tau$ для этих условий составляет 0,29 мс) противофазный сигнал от другого громкоговорителя ($Гр_2$ или $Гр_1$).

Экспериментальные исследования локализации КИЗ в системе TRADIS показали, что при воспроизведении слуховой пеленг с хорошей точностью совпадает с фактическим направлением прихода звуковой волны от первичного источника звука к макету головы. На рис. 7.37а приведены (усредненные данные для 34 испытуемых) результаты оценки направления на речевой источник звука для азимутальной плоскости при условии отсутствия реверберации («искусственная голова» с микрофонами и громкоговорители установлены в заглушенных камерах). По оси абсцисс отложено направление на реальный источник звука (φ'), по оси ординат — воспринимаемое направление (φ). Углы отсчитываются от медианной плоскости головы, слева от фронтального направления они положительны, справа — отрицательны. Незначительный разброс экспертопоказаний (показан для каждого пеленга условно отрезком вертикальных линий) свидетельствует об уверенной локализации КИЗ слушателем. Для

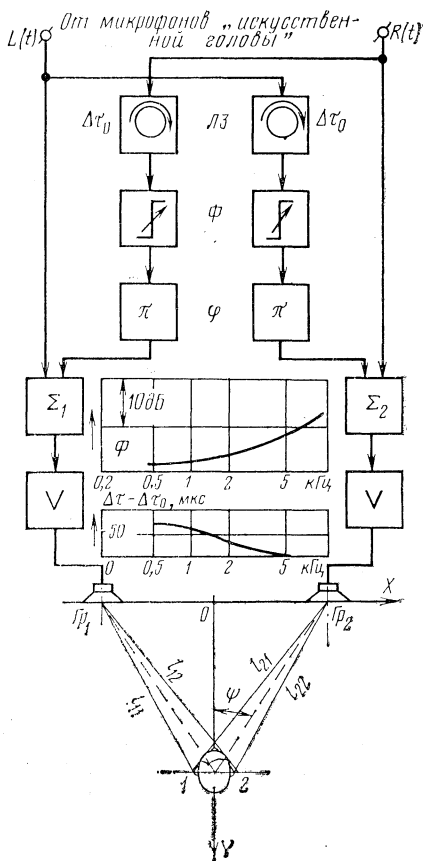


Рис. 7.36. Структурная схема системы TRADIS

Рис. 7.37а приведены (усредненные данные для 34 испытуемых) результаты оценки направления на речевой источник звука для азимутальной плоскости при условии отсутствия реверберации («искусственная голова» с микрофонами и громкоговорители установлены в заглушенных камерах). По оси абсцисс отложено направление на реальный источник звука (φ'), по оси ординат — воспринимаемое направление (φ). Углы отсчитываются от медианной плоскости головы, слева от фронтального направления они положительны, справа — отрицательны. Незначительный разброс экспертопоказаний (показан для каждого пеленга условно отрезком вертикальных линий) свидетельствует об уверенной локализации КИЗ слушателем. Для

Этих экспериментальных условий точность локализации в системе TRADIS при фиксированном положении головы слушателя, по крайней мере, не уступает системе, использующей головные телефоны.

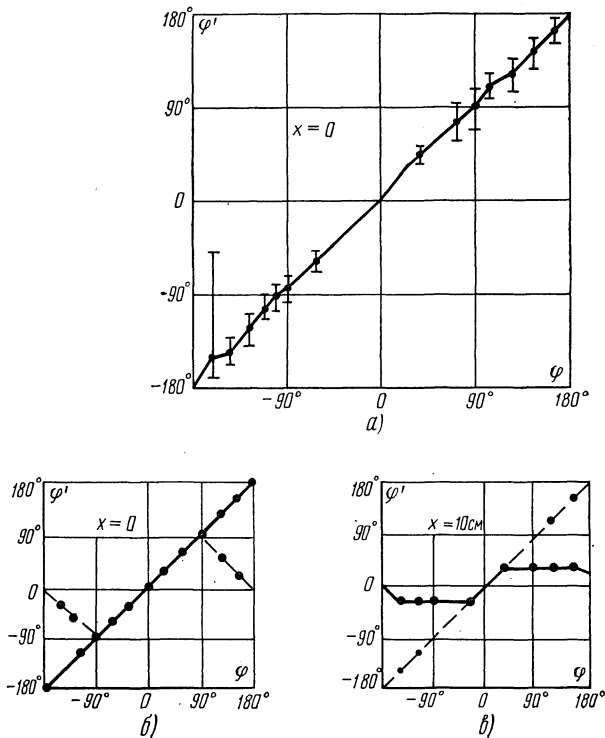


Рис. 7.37. Локализация КИЗ в системе TRADIS:

а — запись и воспроизведение в заглушенной камере; б — запись при $T=0,8$ с, воспроизведение — $T=1,4$ с; в — запись при $T=0,8$ с, воспроизведение в жилой комнате

Появление реверберации как в первичном, так и во вторичном помещениях ухудшает точность локализации при углах $|\varphi| \geq 90^\circ$. В этой области углов слушатели весьма часто вместо истинного направления указывают так называемое «зеркальное» (см. рис. 7.37б). Это явление объясняется не слишком точным соответствием спектров сигналов, воспринимаемых микрофонами «искусственной головы» и соответствующими входами органа слуха человека при воспроизведении первичных сигналов громкоговорителями. Последнее затрудняет точную работу механизма «фронт — тыл». Возможность замены истинного направления зеркальным является одним из основных недостатков системы TRADIS. Что же касается ощущений, связанных

с передачей глубинной локализации и степени гулкости первичного помещения, то они оказываются в этой системе правдоподобными.

Вторым существенным недостатком этой системы звукопередачи (см. рис. 7.36) является то, что качественно правильная слуховая пеленгация КИЗ оказывается возможной практически только

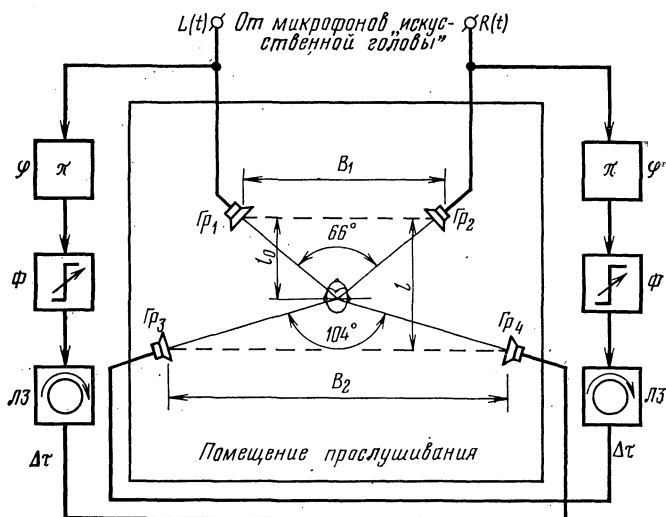


Рис. 7.38. Структурная схема системы звукопередачи с использованием «искусственной головы» по Р. Куреру, Г. Пленге и Г. Вилькенсу:

$$\Delta\tau = 0,22 \left(\sin \frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{2} \right); \quad B_1 = 0,75l, \text{ м}; \quad B_2 = 1,1l, \text{ м}; \quad l_0 = 0,58l, \text{ м}$$

ко для одной точки слушания. Даже незначительное (порядка 10—15 см) смещение центра головы слушателя влево или вправо от этой точки приводит к тому, что восприятие КИЗ в задней полусфере оказывается невозможным (см. рис. 7.37в).

Оба этих недостатка частично устранены в системе, структурная схема которой показана на рис. 7.38. Здесь же приведены сведения, необходимые для получения оптимальных условий прослушивания. Применение для компенсации вредного действия пел-

рекрестных сигналов дополнительных громкоговорителей Gp_3 и Gp_4 , установленных позади слушателя, улучшает уверенность локализации КИЗ в задней полусфере. При этом существенно уменьшается вероятность восприятия зеркальных направлений. Кроме того, выбранное угловое расположение громкоговорителей относительно центра головы слушателя обеспечивает также получение эффекта качественно правильной локализации при величине смещения слушателя (относительно оптимального места) до 30—40 см, а при оптимальной балансировке системы воспроизведения удовлетворительные результаты могут быть получены даже при увеличении этой величины до 1 м. И, наконец, применение четырех громкоговорителей повышает точность глубинной локализации и улучшает условия восприятия слушателем акустических особенностей первичного помещения.

Наличие этих преимуществ в сочетании с простотой реализации является достоинством этой разновидности двухканальной стереофонии. По мнению ряда весьма авторитетных исследователей внедрение метода «Kunstkopf-Stereofonie» является одним из наиболее перспективных направлений в развитии радиовещания. В настоящее время этот тип системы реализован и проходит опытную эксплуатацию в Западном Берлине, в ФРГ.

Список литературы

1. Адаменко Б. А. Исследование возможностей объективной оценки качества воспроизведения стереофонического сигнала корреляционным методом. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Л., 1965. 26 с. (МЭИС).
2. Адаменко Б. А. Влияние корреляционных связей стереофонического сигнала на локализацию кажущегося источника звука при временном сдвиге сигналов. — «Вопросы радиоэлектроники». Техника радиовещательного приема и акустики. Серия VIII, 1967, вып. 1, № 4, с. 39—47.
3. Адаменко Б. А. Некоторые результаты исследования субъективной локализации кажущегося источника звука при временном сдвиге сигналов. — «Вопросы радиоэлектроники». Техника радиовещательного приема и акустики. Серия VIII, 1967, вып. 1, № 4, с. 48—60.
4. Алексеев Ю. М. Современная техника радиовещательного приема. М., «Связь», 1975. 167 с.
5. Альтман Я. А. Локализация звука. Л., «Наука», 1972. 214 с.
6. Аскинази Г. Б., Минлибаев З. Н. Экспериментальное исследование качества звучания псевдостереофонических систем радиовещания. — В кн.: «Стереофония». М., «Связь», 1964, с. 74—86.
7. Бабушкин В. Б. Стереофоническая передача и запись. — В кн.: «Труды ВНИИТР». М., 1972, вып. 2(21), с. 265—291.
8. Белкин Б. Г. Заметки о стереофонии. — В кн.: «Труды НИКФИ». М., 1970, вып. 56, с. 5—27.
9. Белкин Б. Г. Звуковая линза с переменным показателем преломления. — В кн.: «Труды комиссии по акустике». Сборник 8, 1955, с. 125—138.
10. Бендат Дж. Основы теории случайных шумов и ее применение. М., «Наука», 1965. 464 с.
11. Борисенко А. В. Влияние фазировки громкоговорителей в стереофонической системе воспроизведения на восприятие кажу-

- щегося источника звука. — «Вопросы радиоэлектроники». Техника радиовещательного приема и акустики, 1967, вып. 2, с. 78—84.
12. **Борисенко А. В.** Разработка и исследование оптимальной стереофонической системы воспроизведения. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Л., 1971, 21 с. (ЛЭИС).
 13. **Борисенко А. В., Матвеев Г. В.** Акустическая система с расширенной зоной стереоэффекта. — «Вопросы радиоэлектроники». Техника радиовещательного приема и акустики, 1972, вып. 1, с. 73—78.
 14. **Борисенко А. В.** Стереофонические звуковоспроизводящие системы. Патент США № 3. 759. 345 от 18 сент. 1973.
 15. **Вахитов Я. Ш.** Слух и речь. Конспект лекций по курсу «Электроакустика». Л., 1973. 122 с.
 16. **Виноградова Э. П., Шитов Л. В.** Характеристики направленности громкоговорителей на реальных звуковых сигналах. — «Техника кино и телевидения», 1968, № 8, с. 22—25.
 17. **Высоцкий М. З.** Системы кино и стереозвук. М., «Искусство», 1972. 336 с.
 18. **Гаклин Д. И.** Стереофоническая звукопередача. — В кн.: «Стереофония». М., «Связь», 1964, с. 4—45.
 19. **Гензель Г. С., Бабуркин В. Н., Богачева А. А., Федотов М. А.** Исследование особенностей слухового восприятия стереофонических передач. — «Труды учебных институтов связи». М., 1964, вып. 22, с. 107—118.
 20. **Горон И. Е., Гученко В. П., Постникова О. А.** Исследование качественных показателей двухканальных стереофонических систем. — В кн.: «Стереофония». М., «Связь», 1964, с. 86—100.
 21. **Градштейн И. С., Рыжик И. М.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Физматгиз, 1963. 1100 с.
 22. **Гроссман А. В.** Художественные проблемы передачи звука. — В кн.: «Труды ВНИИТР». М., 1972, вып. 2(21), с. 232—240.
 23. **Гроссман А. В.** Подготовка к передаче. — В кн. «Труды ВНИИТР». М., 1972, вып. 2(21), с. 241—264.
 24. **Дрейзен И. Г.** Электроакустика и звуковое вещание. М., Связьиздат, 1961. 544 с.
 25. **Дрейзен И. Г.** Системы электронного управления акустикой залов и радиовещательных студий. М., «Связь», 1967. 112 с.
 26. **Зверев В. А.** Радиооптика. М., «Советское радио», 1975. 304 с.
 27. **Иофе В. К., Янпольский А. А.** Расчетные таблицы и графики по электроакустике. М.—Л., Госэнергоиздат, 1954. 524 с.
 28. **Качерович А. Н., Хомутов Е. Е.** Акустика и архитектура кинотеатров. М., «Искусство», 1961. 284 с.
 29. **Клименко Г. К.** Об интерференции в стереофоническом звуковом поле. — «Техника кино и телевидения», 1966, № 8, с. 36—41.
 30. **Ковалгин Ю. А.** Влияние интенсивностной разности на восприятие стереофонических сигналов. — «Вопросы радиоэлектроники». Техника радиовещательного приема и акустики. Серия VIII, 1967, вып. 2, с. 84—93.
 31. **Ковалгин Ю. А.** Исследование стереофонических свойств сигналов при двухканальной звукопередаче. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Л., 1969. 26 с. (ЛЭИС).
 32. **Ковалгин Ю. А.** О кратковременной функции корреляции ревербирующих сигналов. — «Труды учебных институтов связи», 1972 вып. 57, с. 159—167.

33. Ковалгин Ю. А. Исследование заметности изменения тембра при сложении сигнала с его повторением. — «Труды учебных институтов связи», 1973, вып. 62, с. 153—159.
34. Кок У. Видимый звук. М., «Мир», 1974. 119 с.
35. Кононович Л. М. Системы и аппаратура квадрафонического звучания. — «Вопросы радиоэлектроники». Техника радиовещательного приема и акустики, 1972, вып. 1, с. 117—127.
36. Кононович Л. М. Стереофоническое радиовещание. М., «Связь», 1974. 264 с.
37. Лабутин В. К., Молчанов А. П. Слух и анализ сигналов. М., «Энергия», 1967. 80 с.
38. Лабутин В. К. Адаптация в биологии и технике. Л., «Энергия», 1970. 160 с.
39. Лабутин В. К., Молчанов А. П. Модели механизмов слуха. М., «Энергия», 1973. 200 с.
40. Ланге Ф. Корреляционная электроника. Л., «Судпромгиз», 1963. 447 с.
41. Любинский И. А., Позин Н. В. Моделирование процесса переработки информации о частоте и интенсивности звукового сигнала в слуховой системе. — В кн.: Механизмы слуха. Л., «Наука», 1967, с. 209—221.
42. Лоули Д. Н., Максвелл А. Э. Факторный анализ как статистический метод. М., «Мир», 1967. 140 с.
43. Маньковский В. С. О локализации кажущегося источника звука при двухканальной стереофонической передаче. — «Акустический журнал», 1959, том 5, вып. 2, с. 176—183.
44. Маньковский В. С. Акустика студий и залов для звуковоспроизведения. М., «Искусство», 1966. 374 с.
45. Маньковский В. С., Левичев А. А., Калбурова Р. М., Юдин М. Т. Зависимость положения кажущихся источников звука в стереофонической системе от восприятия его изображения. — «Техника кино и телевидения», 1969, № 10, с. 19—23.
46. Маньковский В. С. К вопросу о передаче акустической обстановки помещения с помощью стереофонической системы. — В кн.: «Труды ленинградского института киноинженеров», 1975, вып. XXV, с. 149—161.
47. Покровский Н. Б. Расчет и измерение разборчивости речи. М., Связьиздат, 1962.
48. Римский-Корсаков А. В. Электроакустика. М., «Связь», 1973. 272 с.
49. Скучик Е. Основы акустики. М., «Иностранная литература», 1959, т. 1, 616 с.; т. 2, 565 с.
50. Соловьева А. И. Основы психологии слуха. Л., Издательство ЛГУ, 1972. 185 с.
51. Суходольский Г. В. Основы математической статистики для психологов. Л., Изд. ЛГУ, 1972. 429 с.
52. Тагер П. Г. Стереофонический эффект при двухканальной передаче. — В кн.: «Труды НИКФИ», М., 1957, вып. 12/22, с. 67—111.
53. Тагер П. Г. Локализация кажущегося источника звука на один громкоговоритель двухканальной синфазной стереофонической системы. — В кн.: «Труды НИКФИ». М., 1959, вып. 28, с. 15—35.
54. Фланеган Дж. Л. Анализ, синтез и восприятие речи. М., «Связь», 1968. 396 с.
55. Фурдуев В. В. Акустические основы вещания. М., Связьиздат, 1960. 319 с.

56. **Фурдуев В. В.** Стерефония и многоканальные звуковые системы. М., «Энергия», 1973. 111 с.
57. **Харман Г. Г.** Современный факторный анализ. М., «Статистика», 1972. 486 с.
58. **Хоег В., Штайнке Г.** Техника стереофонии. М., «Связь», 1974. 120 с.
59. **Хоег В., Штайнке Г.** Основы стереофонии. М., «Связь», 1975. 88 с.
60. **Цвикер Э., Фельдкеллер Р.** Ухо как приемник информации. М., «Связь», 1971. 255 с.
61. **Чистович Л. А.** Психоакустика и вопросы теории восприятия речи. — В кн.: «Распознавание слуховых образов». Новосибирск, 1970, с. 55—140.
62. **Шитов Л. В., Белкин Б. Г.** Статистические характеристики сигналов, представляющих натуральные звучания. — В кн.: «Труды НИКФИ». М., 1970, вып. 56, с. 77—174.
63. **Baenninger E.** Five-channel stereo at home.—«Audio», 1969, march, v. 52, N 3, p. 89—92.
64. **Bauer V.** Broadening the area of stereophonic perception.—«J. Audio Eng. Soc.», 8, 1960, p. 91—94.
65. **Bauer V.** The compatible stereo-quadrasonic «SQ» Record.—«Audio», 1971, v. 55, N 10.
66. **Blauert J.** Sound Localization in the Median Plane.—«Acustica», 1969/70, v. 22, p. 205—213.
67. **Von Békésy G.** Human skin perception of travelling waves similar to those on the cochlea.—«J. Acoust. Soc. Amer.», 27, 1955, p. 830—836.
68. **Boer K. de.** Plastische Klangwiedergabe. — «Philips Techn. Rundschau», 5, 1940, s. 108—115.
69. **Brown C. S.** Stereophonic sound reproducing system.—«US patent», кл. 179-1, N 3153120.
70. **Brunner D.** US patent, N 2.164.676.
71. **Cherry E. C.** Some experiments upon the recognition of speech, with one and two ears.—«J. Acoust. Soc. Amer.», 25, 1953, p. 975—979.
72. **Cherry E. C., Sayers M. A.** Human cross-correlator.—«J. Acoust. Soc. Amer.», 28, N 5, 1956, p. 889—895.
73. **Clark H., Dutton G., Vanderlyn P.** The «stereosonic» — recording and reproducing system. «IRE Trans. on Audio», v. AU-5, 1957, July-August, p. 96—111.
74. **Colburn H. S., Durlach N. J.** Time-intensity relations in binaural unmasking.—«J. Acoust. Soc. Amer.», v. 38, 1965, p. 93—103.
75. **Damaske P., Mellert V.** Zur Richtungstreuung stereophoner Zweikanalübertragung.—«Acustica», 1970, 24(4), s. 222—225.
76. **Damaske P.** Richtungsabhängigkeit von Spectrum und Korrelationsfunktionen der an den Ohren empfangenen Signale.—«Acustica», 22, N 4, 1969—1970, s. 191—204.
77. **Damaske P.** Subjektive Untersuchung von Schallfeldern.—«Acustica», v. 19, 1967—1968, s. 199—213.
78. **Durlach N. J.** Note on the creation of pitch through binaural interaction.—«J. Acoust. Soc. Amer.», v. 34, 1962, p. 1036—1099.
79. **Durlach N. J.** Equalization and cancellation theory of binaural masking-level differences.—«J. Acoust. Soc. Amer.», 35, 1963, p. 1206—1218.

80. Durlach N. J. Note on binaural masking level differences as a function of the interaural correlation of the masking noise.—«J. Acoust. Soc. Amer.», v. 36, 1964, p. 1613—1617.
81. Durlach N. J. On the application of the EC-model to interaural judgments.—«J. Acoust. Soc. Amer.», v. 40, N 6, 1966, p. 162—181.
82. Dutton G. The assessment of two-channel stereophonic reproduction performance in studio monitor rooms, living rooms and small theatres.—«J. Acoust. Soc. Amer.», 10, N 2, 1962, p. 98—106.
83. Eargle J. M. Stereophonic localization; an analysis of listener reaction to current techniques.—«IRE Trans. on Audio», 1960, v. AU-8, IX—X, p. 174—187.
84. Eisler H. Measurement of perceived acoustic quality sound-reproducing systems by means of factor analysis.—«J. Acoust. Soc. Amer.», v. 39, N 3, 1966, p. 484—492.
85. Enock J. Stabilizing of stereo images.—«Hi-Fi-News», v. 12, N 2, 1967, p. 46—48.
86. Enock J. Loudspeakers for stereo.—«Hi-Fi News», N 8, 1964, p. 597—599.
87. Enomoto J. Descriptive adjectives of the listening of the produced sound.—«6-th Intern. Congress on Acoustics», A-5-10.
88. Fielman L. On matrix quadraphonic systems.—«Audio», 55, 1971, N 10, p. 16—21.
89. Gardner M. Proximity image effect in sound localization.—«J. Acoust. Soc. Amer.», 43, N 1, 1968, p. 261—267.
90. Gilp F. Von der Stereo- zur Quadrophonic.—«Werkstattpraxis», 1974, 16, N 44, p. 13—14.
91. Haas H. Über der Einfluss eines Einfachechos auf die Hörbarkeit von Sprache.—«Acustica», v. 1, N 1, 1954.
92. Hafler D. Two-channel quadrophony.—«Hi-Fi News», N 8, 1970, p. 1111—1115.
93. Hafler D. A new quadraphonic system.—«Audio», 1970, v. 54, N 7, p. 24, 25, p. 56—57.
94. Harris G. What is psychoacoustics? —«J. Audio Eng. Soc.», v. 9, N 1, 1961, p. 19—21.
95. Harwood H. D. Stereophonic image sharpness.—«Wireless world», 1968, 74, N 1393, p. 207—211.
96. Hirsh H. Perception of the range of a sound source of unknown strength.—«J. Acoust. Soc. Amer.», v. 43, N 2, 1968.
97. Jordan V. L. A system for stereophonic reproduction.—«Acustica», v. 4, N 1, 1954, p. 41—52.
98. Jochida T. What is the basic factor of stereophonic sound? —«J. Acoust. Soc. Japan», v. 16, N 3, 1960, p. 249—257.
99. Katzfey W. H., Schroeder F. Die Grundlagen des stereophonen Hörens.—«Radio Mentor», 6, 1958, s. 377—381.
100. Kiminori J. Analysis of subjective and physical parameters of hall acoustics.—«J. Acoust. Soc. Amer.», 1972, v. 52, N 5, part 1, p. 1271—1277.
101. Kuhl W. Über eine Lautsprecheranordnung zur Wiedergabe stereophoner Schallaufnahmen.—«Rundfunktechn. Mitt.», 1959, 3(4), s. 170—171.
102. Kuttruff H. Raumakustische Korrelations Messungen mit einfachen Mitteln.—«Acustica», 15, 1965, s. 339—346.
103. Leakey D. M. Some measurements on the effect of interchannel

- intensity and time differences in two-channel sound systems.—«J. Acoust. Soc. Amer.», 31, 1959, p. 977—986.
104. **Leakey D. M., Sayers M. A., Cherry E. C.** Binaural fusion of high and low frequency sound.—«J. Acoust. Soc. Amer.», 30, 1958, p. 222—223.
 105. **Lochner J. P. A., Keet W. de V.** Stereophonic and quasi-stereophonic reproduction.—«J. Acoust. Soc. Amer.», 32, N 3, 1960, p. 393—401.
 106. **Lochner J. P. A., Burger J. F.** The subjective masking of short time delayed echoes by their primary sound and their contribution to the intelligibility of speech.—«Acustica», v. 8, N 1, 1958, p. 62—81.
 107. **Makita Y.** Localisation directionnelle du son dans un champ stéréophonique sonore.—«Revue de l'UER», N 73A, 1962, p. 102—108.
 108. **Малач В.** Влияние угла поворота и ширины базы громкоговорителей на двухканальное стереофоническое воспроизведение.—«Slaboroudy Obsor», 1966, v. 27, N 4, s. 236—240.
 109. **Maiwald D.** Ein Funktionschema der Gehörs zur Beschreibung der Erkennbarkeit kleiner Frequenz und Amplitudenänderungen.—«Acustica», v. 12, N 2, 1967, p. 346—362.
 110. **Mertens H.** Theorie energetique de l'ouïe directionnelle et applications a la stereophonie.—«Revue de l'UER», N 59A, 1960, p. 22—23.
 111. **Mertens H.** L'écoute directionnelle en stereophonie, Etude theorique et verifications experimentals.—«Revue de l'UER», 1965, p. 146—158.
 112. **Moortgat — Pick W.** Hi-Fi-Stereofonie, Quadrofonie und Kunstkopf-Stereofonie.—«Funkschau», 1975, № 1, S. 35—38, № 2, S. 69—71; № 3, s. 53—54.
 113. **Moore H. B.** Listener rathing of stereophonic system.—«IRE—International Convention Record», v. 8, part 7, 1960, p. 64—72.
 114. **Olson H.** Stereophonic sound reproduction in the home.—«J. Acoust. Eng. Soc.», v. 6, N 2, 1958, p. 221—244.
 115. Патент Англии, кл. 21a², H04M, № 893444.
 116. Патент Франции, кл. 10, № 1309417.
 117. Патент ФРГ, кл. 21a², H04M, № 899777.
 118. Патент ФРГ, кл. 21a², H04M, № 1130856.
 119. **Pflager D. L., Jackson M. R.** Method and apparatus for audio reproduction.—«US patent», cl. 179-1, N 3124642.
 120. **Ranger R. H.** Stereophonic sound distributor.—«US patent», cl. 181—31, N 3065816.
 121. **Sandel I., Teas O., Joffres L.** Localization of sound from single and paired sources.—«J. Acoust. Soc. Amer.», 27, 1955, p. 842—852.
 122. **Schenkel K.** Über die Abhängigkeit der Mithörschwellen von der interauralen Phasenlage des Testschalls.—«Acustica», v. 14, 1964, s. 337—346.
 123. **Schenkel K.** Accumulation theory of binaural masked thresholds.—«J. Acoust. Soc. Amer.», v. 41, N 1, 1967, p. 20—30.
 124. **Schisser H., Jakubowski H.** Der Einfluss von Phasen und Laufreitunterschieden bei der Übertragung von Stereosignalen.—«Rundfunktechnische Mitteilungen», N 3, 1963, s. 195—203.
 125. **Scholl H.** Über die Bildung der Hörschwellen und Mithörschwellen von Impulsen.—«Acustica», v. 12, 1962, s. 91—101.

126. **Scheiber P.** Four-channels and compatibility.—*J. Audio Eng. Soc.*, 1971, v. 19, N 4, p. 89—96.
127. **Shorter J.** Some commercial quadraphonic matrix system.—*«Wireless World»*, v. 78, 1972, Febr., N 1436, p. 69—73.
128. **Schubert P.** Die Wahrnehmbarkeit von Rückwürfen bei Music.—*«Hochfrequenztechn. und Electroacust.»*, 78, N 6, 1969, s. 230—245.
129. **Schubert E.** Some preliminary experiments on binaural time delay and intelligibility.—*J. Acoust. Soc. Amer.*, 28, N 5, 1956, p. 464—456.
130. **Snow W. B.** US patent N 2. 137. 032.
131. **Snow W. B.** Basic principles of stereophonic sound.—*J. S. M. P. T. E.*, 61, N 5, 1953, p. 567—583.
132. **Snow W. B.** Effect of arrival time on stereophonic localization.—*J. Acoust. Soc. Amer.*, v. 26, 1956, p. 476—489.
133. **Steinke G.** Stereo-Ambiofonie, die Grundlage der Quadrophonie.—*«Radiofernsehen elektronik»*, 1972, N 11, s. 335—338; N 12, s. 403—406; N 13, s. 439—441.
134. **Tappan P.** An improvement in simulated three-channel stereo.—*«IRE Trans. on Audio»*, AU-9, N 3, 1961, p. 88—91.
135. **Vermeulen R.** A comparison between produced and «live» music.—*«Philips Techn. Review»*, v. 17, N 6, 1955, p. 46—58.
136. **Wallach H., Newman E., Rosenzweig M.** The precedence effect in sound localisation.—*J. Acoust. Soc. Amer.*, v. 62, N 3, 1949, p. 316—336.
137. **Wendt K.** Versuche zur Ortung von Intensitäts — stereophonie.—*«Frequenz»*, Januar, 1960, s. 11—14.
138. **Wendt K.** Das Richtungshören bei Zweikanalstereophonie.—*«Rundfunktechnische Mitteilungen»*, Bd. 8, N 3, 1964, s. 171.
139. **William E.** Extended stereophonic system.—US patent, cl. 179—1, N 3246081.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Стр.

| | |
|---|------------|
| Предисловие | 3 |
| Глава 1 | |
| Восприятие стереофонического звучания | 6 |
| 1.1. Звуковой образ при естественном слушании | 6 |
| 1.2. Типы электроакустических систем звукового вещания | 11 |
| 1.3. Монофонические и обычные стереофонические системы | 14 |
| 1.4. Предпочтительность стереофонического звучания | 21 |
| Глава 2 | |
| Локализация кажущегося источника звука при двухканальном воспроизведении | 25 |
| 2.1. Кажущийся источник звука | 25 |
| 2.2. Влияние интенсивностной разности при симметричном положении слушателя | 27 |
| 2.3. Влияние временной разности | 33 |
| 2.4. Особенности азимутальной локализации КИЗ при асимметричном положении слушателя | 39 |
| 2.5. Коэффициент эквивалентности | 44 |
| 2.6. Особенности стереофонической локализации при противофазном возбуждении громкоговорителей | 48 |
| 2.7. Частотная зависимость локализации | 51 |
| 2.8. Влияние реверберационного процесса первичного помещения на локализацию КИЗ | 58 |
| 2.9. Возможности аналитического определения положения кажущегося источника звука | 64 |
| 2.10. Корреляционный метод расчета азимутальной локализации | 68 |
| Глава 3 | |
| Пространственная звуковая панорама | 82 |
| 3.1. Стереосигнал и пространственная панорама при воспроизведении | 82 |
| 3.2. Источники стереофонических сигналов | 85 |
| 3.3. Обработка микрофонных сигналов | 98 |
| 3.4. Панорамный регулятор | 104 |
| 3.5. Искажения пространственной панорамы | 110 |
| 3.6. Интерференционные явления при стереовоспроизведении | 115 |
| 3.7. Баланс громкости при стереовоспроизведении | 121 |
| Глава 4 | |
| Разделимость сигналов при стереовоспроизведении | 130 |
| 4.1. Пространственное восприятие и разделимость сигналов | 130 |
| 4.2. Математические модели демаскировки сигналов органом слуха человека | 135 |
| 4.3. Применение модели бинауральной демаскировки к оценке разделимости сигналов | 153 |
| | 335 |

Глава 5

| | |
|---|------------|
| Слуховое восприятие реверберационного процесса при двухканальной стереофонии | 177 |
| 5.1. Временные и корреляционные структуры реверберирующих сигналов | 177 |
| 5.2. Восприятие реверберирующих сигналов механизмом локализации | 186 |
| 5.3. Восприятие отзвуков первичного помещения при стереовоспроизведении | 190 |
| 5.4. Мгновенный спектр мощности реверберирующего сигнала. Коэффициент интерференционных искажений | 197 |
| 5.5. Восприятие интерференционных искажений | 201 |
| 5.6. Интерференционные искажения при одноканальной и двухканальной звукопередачах | 210 |

Глава 6

| | |
|--|------------|
| Двухканальные акустические системы | 219 |
| 6.1. Зона стереоэффекта двухканальных систем воспроизведения | 219 |
| 6.2. Пространственные характеристики двухканальных акустических систем | 223 |
| 6.3. О выборе оптимальной базы громкоговорителей | 224 |
| 6.4. Методы увеличения зоны стереоэффекта при двухканальном воспроизведении | 228 |
| 6.5. Оптимальные характеристики направленности громкоговорителей в двухканальной системе воспроизведения | 233 |
| 6.6. Зона стереоэффекта и баланс громкости в системах с оптимальной направленностью | 240 |
| 6.7. Пути создания излучателей с оптимальной направленностью | 244 |
| 6.8. Эффективность метода компенсации | 263 |
| 6.9. Испытание образцов стереофонических систем с оптимальной направленностью | 268 |
| 6.10. Особенности эксплуатации систем воспроизведения с расширенной зоной стереоэффекта | 273 |

Глава 7

| | |
|--|------------|
| Квадрафонические системы | 274 |
| 7.1. Псевдоквадрафонические системы | 277 |
| 7.2. Матричные квадрафонические системы | 287 |
| 7.3. Дискретные квадрафонические системы | 307 |
| 7.4. Зона стереовосприятия и метод ее расширения | 315 |
| 7.5. Оптимальные характеристики направленности громкоговорителей для акустической системы типа «квадрат» | 318 |
| 7.6. Система звукопередачи с использованием «искусственной головы» | 321 |
| Список литературы | 328 |