

Федеральное агентство связи

**Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования**

ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ

**ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕЧНАЯ СИСТЕМА**

Самара

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

Кафедра радиосвязи, радиовещания и телевидения

Горчаков Б.М., Нагорная М.Ю.

МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА

к лабораторной работе №1 **«Исследование процесса формирования первых
отражений звука в помещениях»**

по учебной дисциплине «Электроакустика и звуковое вещание» для
специальности 210405 «Радиосвязь, радиовещание и телевидение»,
бакалавриата 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»,
210400 «Радиотехника»

Самара
2012

1. Цель работы

Целью работы является изучение студентами процесса формирования ранних отражений звука в помещениях, оказывающих очень большое влияние на качество звучания музыки и речи в концертных залах и студиях звукового и телевизионного вещания. Студенты также знакомятся с одной из современных программ акустического проектирования помещений «Odeon 10.0 Combined».

2. Литература

1. Электроакустика и звуковое вещание / Под ред. Ю.А. Ковалгина. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 872 с.
2. Акустика: Учебник для вузов / Вахитов Ш.Я., Ковалгин Ю.А., Фадеев А.А. и др. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 660 с.
3. Радиовещание и электроакустика / Под ред. Ю.А. Ковалгина. – М.: Радио и связь, 2002. – 792 с.
4. Анерт В., Штеффен Ф. Техника звукоусиления. – М.: ООО «ПКФ «Леруша», 2003. – 416с.

3. Контрольные вопросы

При подготовке к работе студенты должны изучить параметры высокого качества звучания музыки и речи и основные акустические характеристики помещений, влияющие на указанные параметры, используя данную методическую разработку (раздел «Вопросы теории») и учебники /1/, /2/ и /3/.

Необходимо знать ответы на следующие контрольные вопросы:

1. Поясните процессы поглощения и отражения звука в помещении.
2. Какие субъективные оценки характеризуют параметры высококачественного звучания?
3. Какие характеристики отзвука влияют на слуховые ощущения при прослушивании музыки?
4. Какова роль первых отражений звука?
5. При каком времени задержки первого отражения относительно прямого звука не наблюдается ухудшения качества звучания?
6. При каком времени задержки первого отражения относительно прямого звука слушатель может услышать эхо?
7. Как связаны время задержки отражённого звука и пути, пройденные звуковыми лучами?
8. Из каких соображений выбирают размеры концертных залов и музыкальных студий?

4. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Установите demo–версию программы «ODEON 10.0 Combined Demo» на компьютере (файл “Setup.exe”), и далее следуя указаниям программы установки.

2. Ознакомиться с руководством по работе с программой (файл “Manuel”).

3. Открыв программу «ODEON 10.0 Combined Demo» (файл “Odw.exe”), выбрать помещение (меню «File», команда “Open room” – «открыть комнату (помещение)» – “Concert Hall” (Концертный зал) “Elmia Round Robin 2 detailed”).

4. Открыв изображение внутреннего вида помещения (кнопка “3D OpenGL” в главном меню программы), оценить внутренний вид зала, расположение мест зрителей, а также вид помещения снаружи.

5. Пронаблюдать распространение звуковой волны в плоскостях XY, XZ и YZ (для этого нажать кнопку «3D Billiard» в главном меню программы), обращая внимание на длину пути (Path), пройденного звуковой волной и соответствующее время (Time). Пронаблюдать характер отражения звуковых волн от стен, потолка и других препятствий.

Повторить наблюдения для источников звука, расположенных в других точках помещения.

6. Кнопкой «3D Investigate Rays tracing» (в главном меню программы) открыть подпрограмму исследования путей прохождения звуковых лучей. Последовательно нажимая кнопку «Single Forward», исследовать характер распространения звуковых лучей в различных направлениях от разных источников звука.

7. Открыв окно информации об основных параметрах концертного зала (кнопка “j” “Room information” в главном меню программы), записать параметры помещения (высоту, длину, ширину).

8. Определить время (Time) прихода прямого звука и первых четырёх отражений к слушателю, сидящему в середине первого (второго, третьего, ... – по заданию преподавателя) ряда, а также соответствующую длину пути (Path), пройденную звуковой волной. Для этого вновь пронаблюдать распространение звуковой волны в плоскостях XY, XZ, YZ и в трёхмерном пространстве (кнопка «3D Random») для источника звука 1.

9. Для выбранного места слушателя рассчитать и построить зависимости от времени (для суммы прямого и отражённых звуков) звукового давления p , интенсивности I и уровня звука L , считая, что звук – импульсный (выстрел), а волна – сферическая. Принять, что на расстоянии $r = 1$ м от источника звука $p_1 = 2$ Па, $I_1 = 0,01$ Вт/м², $L_1 = 100$ дБ. В точке расположения слушателя для сферической волны

где r – расстояние, пройденное звуковой волной от источника звука до слушателя,

$$I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/м}^2.$$

Примерный график изменения уровня звука в месте расположения слушателя приведён в разделе 5 (рисунок 5.7).

10. При дальнейшем распространении звуковой волны определить интервал времени, через который звук в зале станет диффузным. Пронаблюдать характер звукового поля через 1с после излучения звукового импульса. Сделать выводы.

11. Повторить исследования п. 2 для других источников звука (2, 3 и 4, если последние имеются в модели данного помещения).

12. Произвести наблюдения, проделанные при исследовании акустических характеристик концертного зала при выполнении пунктов задания 4 – 7 и 10 для моделей других помещений: ТВ студии в Германии “РТВ Studio open curtains”, Byzantine church in Istanbul (Византийской церкви в Стамбуле) “Hagia Irene”, помещения исследовательского центра “Studstrup”. Записать соответствующие данные о размерах помещений.

5. Вопросы теории

5.1. Некоторые требования к акустическому проектированию концертных залов и музыкальных студий

Акустика помещения – это совокупность свойств помещения, влияющих на качество звучания определённых видов программ. Впечатления слушателя об акустических свойствах помещения формируются за счёт восприятия отзвука. Отзвук – сохраняющийся после внезапного выключения источника сигнала и ослабляющийся со временем звук, обусловленный последовательностью повторяющихся отражений и связанное с этим постепенное стихание воспринимаемого звука.

Впечатления слушателей, посещающих концертные залы и оперные театры, формируются не только характером прослушанного музыкального произведения или постановкой спектакля, но и акустической атмосферой помещения.

Слушатели оценивают и акустику зала. Можно иногда услышать такие суждения: «Оркестр играл потрясающе, но акустика зала никуда не годится». Посетитель концерта не только слышит и видит оркестр, но и ощущает среду между источником звука (оркестром) и приёмной стороной (самим слушателем). Этой средой и является помещение со всеми присущими ему акустическими параметрами.

Для получения хороших акустических характеристик помещения необходимо ещё на этапе проектирования концертного зала определить архитектурно-акустические параметры. Благодаря этому можно своевременно вскрыть недостатки проекта и избежать последующих переделок, связанных с большими материальными затратами. Поэтому точности расчета акустических характеристик всегда уделялось большое внимание. Однако многолучевое

распространение звуковых сигналов в большом помещении трудно поддается расчету. Поэтому для проектирования концертных залов были разработаны методы оценки акустических параметров на моделях. Первоначально широкое применение при архитектурно-акустических исследованиях получил метод импульсных измерений на масштабных моделях залов. С появлением современных быстродействующих вычислительных комплексов более эффективным оказался метод компьютерного моделирования.

Разработанные сложные компьютерные программы позволяют с высокой точностью моделировать акустические процессы, происходящие в больших залах. Благодаря этому повышается точность расчётов, предшествующих дорогостоящим работам по акустической обработке концертных залов, что позволяет значительно улучшить акустические характеристики помещения, и тем самым повысить качество звучания.

В больших концертных залах всё большее значение приобретает техника озвучения. Если раньше задачей систем озвучения являлось в основном усиление голоса человека (ораторов, певцов), то теперь в больших помещениях, рассчитанных на 1000 – 3000 слушателей, требуется и усиление звуковых сигналов, создаваемых музыкальными инструментами. Особенности постановок на больших сценах нередко заставляют располагать микрофоны на значительном расстоянии от источника сигнала. Большое значение при этом приобретает задача устранения акустической обратной связи. От решения этой задачи в значительной мере зависит качество звучания системы звукоусиления.

Поэтому постановка компьютерных лабораторных работ, позволяющих познакомить студентов с современными методами проектирования акустической обработки больших концертных залов и телевизионных студий, является актуальной задачей.

Если слушатель находится в концертном зале, звуковые волны приходят к ушам слушателя от каждого из музыкальных инструментов разными путями. Первой приходит прямая звуковая волна, так как она распространяется по кратчайшему пути. Вслед за ней поступают множество волн, отражённых от поверхностей помещения.

Совокупность отражённых звуковых волн образует реверберационный процесс в помещении, который имеет сложную спектральную, временную и пространственную структуру. Благодаря реверберации звучание инструментов и голосов кажется нам тембрально богаче, более объёмным и пространственным. Это звучание несёт также информацию об акустических особенностях помещения.

Начальный (дискретный) участок реверберационного процесса несёт информацию о геометрических размерах помещения, определяет пространственность звучания, а также свойственную помещению специфическую окраску звучания. Завершающий участок характеризуется поступлением в каждый момент времени достаточно большого числа отражённых сигналов. Здесь имеет место энергетическое сложение сигналов.

На этом этапе формируется свойственный данному помещению характер гулкости звучания.

Между сигналом прямого звука и завершающим участком реверберационного процесса располагаются ранние отражения. Их интенсивность, направление прихода к слушателям, время запаздывания по отношению к сигналу прямого звука определяет плохие и хорошие места в зале. Картина ранних отражений индивидуальна для каждого места слушателя, а значит, отличаются и ощущения, возникающие при прослушивании одной и той же программы.

Длительность отзвука – время, в течение которого отзвук еще слышен. Длительность отзвука зависит от времени реверберации (свойство помещения), начального уровня сигнала, уровня помех, а также от порога чувствительности слуха и, следовательно, от частоты сигнала.

Если время реверберации значительно отличается от оптимального значения, акустика зала слушателями и исполнителями будет оцениваться как плохая. Однако оптимальное время реверберации на всех частотах не гарантирует высокого качества звучания. Важную роль имеют первые отражения звукового сигнала, которые не могут быть рассчитаны на основе статистической теории. В этом случае необходимо воспользоваться волновой теорией анализа отзвука. Однако до недавнего времени волновая теория из-за сложности математического анализа была разработана и применялась только при анализе акустики залов, имеющих простую форму (форму параллелепипеда).

Формы больших концертных залов, как и крупных студий звукового и телевизионного вещания, весьма разнообразны. Их выбирают, исходя из архитектурно-строительных соображений и удобства размещения оркестрантов на сцене (игровой площадке студии). Для получения хороших акустических свойств стены и потолок зала должны иметь сложную форму (хорошо рассеивать отражаемую звуковую волну), а противоположные стены, пол и потолок не должны быть параллельными. В результате современные концертные залы имеют сложную форму, а неточность расчётов на основе статистической теории нередко приводила к необходимости дорогостоящих переделок после постройки зала, к так называемой «настройке» акустических характеристик.

Лучшая равномерность звукового поля может быть получена за счет оптимального распределения по поверхности студии звукопоглощающих материалов, а также за счет размещения вдоль стен и на потолке выпуклых отражающих поверхностей.

Иногда, для создания хороших акустических условий, звукорассеивающие и звукопоглощающие материалы, сосредотачивают в той части студии, в которой размещается оркестр.

Все перечисленные особенности не поддаются теоретическому расчёту на основе статистической теории. Поэтому раньше после акустического расчёта, определяющего частотную характеристику времени реверберации и некоторые другие параметры (акустическое отношение, радиус гулкости), опытные проектировщики выбирали расположение выпуклых отражающих

поверхностей, звукопоглощающих материалов исходя из своего практического опыта. При этом возможны были неточности и ошибки, устранение которых приводило к дополнительным (иногда значительным) затратам. Поэтому всегда была актуальна задача разработки методов расчета, позволяющих на этапе проектирования произвести точный анализ первых отражений, влияния расположения звукоотражающих и звукопоглощающих конструкций на различные акустические характеристики помещений.

Эта задача решается в современных программах акустического проектирования, рассчитанных на использование быстродействующих компьютеров с большой ёмкостью памяти. Одной из таких программ является программа «ODEON 10,0 Combined». Для ознакомления студентов с основными особенностями и возможностями программы при проведении лабораторной работы можно воспользоваться демонстрационной версией программы «ODEON 10,0 Combined Demo».

5.2. Анализ первых отражений

Алгоритм данной программы позволяет производить расчёт акустических характеристик как на основе статистической теории, основные положения и математические выражения которой рассмотрены в лабораторной работе №8, так и на основе рассмотрения путей прохождения многочисленных звуковых лучей. Анализ распространения звуковых волн при этом производится на основе рассмотрения процессов преломления звуковой волны у ограждающей поверхности. Процессы отражения и прохождения звуковой волны у такой поверхности подчиняются законам геометрической акустики. Возможные пути отражения и прохождения через преграду звуковых лучей в случае, когда размеры плоской части перегородки значительно превышают длину звуковой волны, показаны на рисунке 5.1. Здесь $I_{пад}$, $I_{отр}$, $I_{прош}$ – соответственно интенсивность звука падающей, отражённой и прошедшей волн, а φ , ψ и θ – углы, под которыми звуковые лучи проходят границу воздух-перегородка.

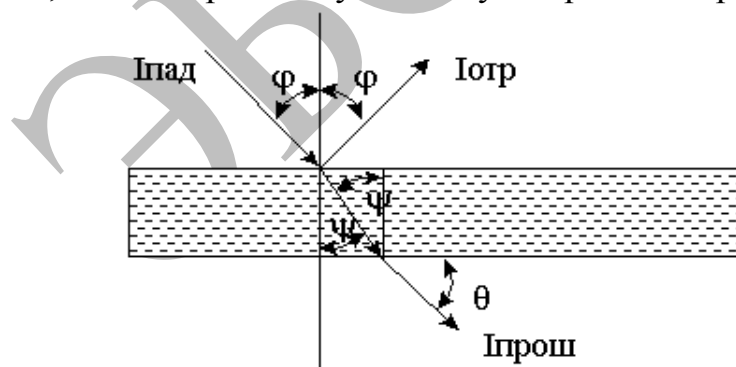


Рисунок 5.1

При этом энергия, оставшаяся в помещении после отражения звуковой волны, характеризуется коэффициентом отражения α , энергия, теряемая в помещении после отражения, - коэффициентом звукопоглощения α , энергия звуковой волны, прошедшая сквозь поверхность, - коэффициентом звукопроводности α :

$$\beta = \frac{E_{отр}}{E_{пад}}, \quad \alpha = \frac{E_{погл}}{E_{пад}}, \quad \gamma = \frac{E_{пр}}{E_{пад}}, \quad (5.1)$$

где $E_{пад}$ - энергия звука, падающая на поверхность; $E_{отр}$ - энергия звука, отраженного

от поверхности; $E_{пр}$ - энергия звуковой волны, прошедшей сквозь поверхность в соседнее помещение; $E_{погл}$ - энергия звуковой волны, теряемая в помещении при отражении. Очевидно, что $\alpha + \beta + \gamma = 1$, так как $E_{погл} + E_{отр} + E_{пр} = E_{пад}$. Значения коэффициентов α , β и γ зависят от материала и конструктивных особенностей поверхности, частоты и угла φ падения звуковой волны на преграды. На рисунке 5.2 поясняются процессы отражения и преломления звуковых лучей при отражении и прохождении через ограждающую поверхность.

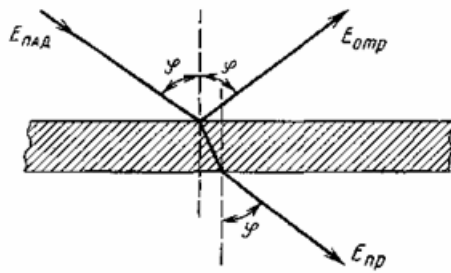


Рисунок 5.2.

Значения коэффициентов звукопоглощения α , приводимые в справочниках, получены в диффузном звуковом поле, которое характеризуется равновероятным распространением звуковых волн в каждом направлении, равенством значений звуковой энергии, распространяющейся в каждом направлении, одинаковым значением суммарной звуковой энергии в каждой точке объема помещения. В этом случае коэффициент звукопоглощения является средним значением совокупности всех его возможных значений:

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i(\varphi_i),$$

где $\alpha_i(\varphi_i)$ - коэффициент звукопоглощения при угле падения звуковой волны φ_i .

При звучании музыки максимальный эффект пространственности и прозрачности звучания достигается, если первое отражение запаздывает по отношению к сигналу прямого звука примерно на 20...30 мс, а первые три запаздывающие сигнала размещаются в интервале 45...75 мс. Отсутствие участка дискретных отражений приводит к ощутимому ухудшению качества звучания. Первый запаздывающий сигнал, как правило, приходит, отразившись от потолка; отражение от пола обычно ослабляется ковровым покрытием и почти совпадает с прямым звуком, так как источники звука находятся очень близко к полу. Отражения от боковых стен, приходящие в интервале от 25 до 80 мс, могут одновременно повышать как прозрачность звучания, так и пространственное впечатление.

5.3. Методические указания к выполнению лабораторной работы

Программа «ODEON 10,0 Combined» даёт возможность наглядно представить во всех деталях распространение звуковых волн в концертном зале. Анализ процесса распространения волны позволяет определить последовательность прихода первых отражений в любую точку помещения, оценить временную задержку для каждого из отражённых сигналов. Для повышения точности оценки имеется возможность изменения масштаба изображения концертного зала и поворота объёмного изображения в любой плоскости, что позволяет выбрать такой ракурс, при котором лучше всего видны пути, по которым волна приходит в данную точку.

Первая ступень исследования распространения звуковых волн в помещении – моделирование путей прохождения звуковых лучей. На экране монитора видны пути прохождения звуковых лучей и их последовательные отражения. Путь первого луча (Ray 1) изображен жёлтым цветом, второго (Ray 2) – синим. Программа позволяет наблюдать каждый шаг прохождения лучей (кнопка «Single Forward»), при этом в таблице справа указывается номер очередного шага (номер отражения, «Reflection»), общее расстояние («Distance»), пройденное звуковой волной от источника звука, и соответствующее время («Time») в мс. Поворачивая изображение, оператор может детально рассмотреть каждый шаг луча.

Вторая ступень исследований: суммируя, смоделированные таким образом звуковые лучи, распространяющиеся в одной из плоскостей (XY, XZ или YZ), можно исследовать движение фронта звуковой волны (с учётом отражений) в любой из указанных плоскостей.

Остановив (кнопкой «STOP») и вновь запуская выполнение программы (кнопкой «Run»), можно наблюдать последовательные положения фронта волны, излучённой импульсным источником звука (компьютерная модель выстрела), через различные интервалы времени. В нижнем правом углу указаны соответствующие параметры звуковой волны: время (Time) распространения от источника звука и пройденное расстояние. Заметим, что программа предусматривает возможность расположения источника звука при моделировании указанных процессов в различных точках на сцене. В данном случае использован источник звука №1 («1 Source on stage»).

Исследователь, сопоставляя моменты прихода прямого звука и отражённого, может точно рассчитать задержку первого, второго и третьего отражений в любой интересующей точке зрительного зала. Конечно, для этого необходимо будет сопоставить приход первых отражений во всех трёх плоскостях. Как было показано выше, эти параметры отражённых сигналов нельзя определить, используя только статистическую теорию реверберации. Когда сформируется диффузное звуковое поле, на экране монитора хорошо видно, что «шарики», имитирующие распространение звуковой волны, хаотически перемещаются в различных направлениях, что соответствует диффузному полю.

Третья, заключительная стадия исследования распространения фронта волны – наблюдение за распространением фронта в трёхмерном пространстве. Для этого нужно нажать кнопку меню «3D Random». Соответствующая картина звукового поля получается путём суммирования звуковых лучей, расходящихся во всех направлениях.

При наблюдении распространения звуковой волны в трёхмерном пространстве трудно оценить количественно задержку отдельных отражений. Это легко сделать, наблюдая распространение волны в отдельных плоскостях. Поэтому данная стадия наблюдений имеет иллюстративный характер, представляющий интерес в процессе обучения при проведении лабораторных работ. При наблюдении диффузного поля на экране монитора хорошо видно перемещение звуковой энергии во всех направлениях. Участок реверберационного процесса, условно названный «заключительным» по длительности занимает до 85% времени. На этом участке звуковое поле становится диффузным, поэтому расчётные соотношения статистической теории реверберации теперь точно описывают характер отзвука. Заключительный участок реверберационного процесса исследуется в лабораторной работе №8.

5.4. Параметры высокого качества звучания

Качество звучания определяется критериями, согласованными с субъективным восприятием звучаний. Исследования показали, что для речи важнейшими параметрами являются разборчивость и её зависимость от уровня громкости и посторонних шумов. К сожалению, для музыки отсутствует такой единственный критерий «хорошей акустики». Высокое качество звучания музыки определяется, по крайней мере, четырьмя факторами, которые в какой-то степени могут быть охарактеризованы с помощью понятий уровня громкости, прозрачности, пространственного впечатления и тембральной окраски звучания. Помимо названных, существуют и другие субъективные критерии, предлагаемые в различных работах.

Они должны, конечно, быть, возможно, более близкими к субъективным оценкам, но, кроме того, должны быть основаны на однозначных и не слишком сложных методах измерений. Для речи основным субъективным критерием качества звучания является разборчивость. Следует при этом различать чисто информативную речь – доклад, объявление и тому подобное – и речь художественную, имеющую определённую эстетическую ценность. В последнем случае не менее важным является сохранение тембра звучания. Иначе обстоит дело для музыки. Уровень громкости, прозрачность, пространственное впечатление, окраска звучания, баланс и тому подобные субъективные критерии вносят в значительной степени независимый вклад в формирование «хорошей акустики». Трудности возникают даже с введением определений этих критериев. На основе статистических экспертиз были

установлены основные субъективные критерии, позволяющие оценить качество звучания музыки в концертном зале.

Акустика помещения – совокупность свойств помещения, влияющих на качество звучания определённых видов программ.

Прозрачность – это различимость перекрывающихся друг друга во времени тонов и одновременно звучащих инструментов, несмотря на налагающийся реверберационный отзвук помещения. Временная граница для полезных с точки зрения прозрачности и пространственного впечатления первых отражений, с одной стороны, и отзвука помещения, определяющего его гулкость (сумма поздних отражений), с другой стороны, составляет около 80 мс.

Пространственное впечатление – это слуховое восприятие, свойственное закрытому с нескольких или со всех сторон пространству.

Пространственное впечатление складывается из следующих компонент: ощущения, что слушатель находится в одном помещении с источниками звука; известного представления о размерах помещения; гулкости; пространственности.

Гулкость – это ощущение, что кроме прямого звука имеется и отраженный звук, воспринимаемый не как повторения сигнала. В больших помещениях гулкость зависит от отношения поздней энергии отзвука к ранней. К ранней причисляют энергию прямого звука и отражений, которые на речи приходят примерно за первые 50 мс, а на музыке – за 80 мс после прихода прямого звука. На музыкальный сигнал гулкость оказывает до известного предела положительное влияние, способствуя слитности звучания. При слишком большой гулкости снижаются прозрачность звучания музыки и разборчивость речи. Во всех электроакустических системах передачи гулкость оказывается значительно больше, чем при естественном слушании, из-за наложения отзвуков помещения прослушивания, на отзвуки первичного помещения.

Пространственность – это ощущение, что источник звука (например, оркестр) имеет большие по сравнению с видимыми очертаниями размеры (в одну или обе стороны и вверх).

Пространственность зависит от соотношения уровней энергии прямого звука в месте расположения слушателя и энергии отражений, приходящих с боковых направлений за 80 мс. Эхо – это такие повторения сигнала, при которых первичный и вторичный (запаздывающий) звуки воспринимаются как самостоятельные слуховые объекты (во времени, а часто – и в пространстве). Многократное эхо – это периодическое повторение эхо-сигналов, воспринимаемое как неприятный эффект в помещениях, предназначенных для прослушивания программ.

5.5. Значение отражений

Прямой и диффузный реверберационные звуки – это не единственные сигналы, приходящие к слушателю. За 100 мс звук проходит 34 м, а за 200 мс – 68 м. Эти цифры показывают, что достаточно полного «перемешивания» отражений можно ожидать не ранее как через 100 мс, а в больших помещениях – и через 200 мс. Формирование поля реверберационного звука заканчивается не раньше указанного промежутка времени, и лишь после этого может наблюдаться подчиняющийся статистическим законам экспоненциальный спад энергии поля реверберационного звука. Между прямым звуком и сигналом завершающего участка реверберационного процесса располагаются ранние отражения. Их интенсивность, направление прихода и времена прихода определяют «плохие» и «хорошие» места в зале и зависят от расположения, формы и отделки отражающих элементов стен и потолков, с которыми такие отражения взаимодействуют до прихода к слушателям. Картина ранних отражений будет иной для каждого места слушателя.

Для исследования этих отражений во всем мире широко применяют методы импульсного возбуждения. В тех точках сцены, в которых обычно находятся источники звука, создается щелчок, а в интересующих зонах помещения наблюдают на осциллографе приходящие отражения. Получаемые таким образом осциллограммы называют рефлектограммами. На рисунке 5.3 показаны зависимости от времени звукового давления $p(t)$ и интенсивности звука $I(t)$, усреднённой в соответствии с постоянной времени слуха и суммарной энергией.

$$E \Leftarrow \int_0^t p^2(t') dt' \cdot$$

На рисунке приведены два примера. Сверху представлены зависимости звукового давления от времени, часто называемые «елочкой».

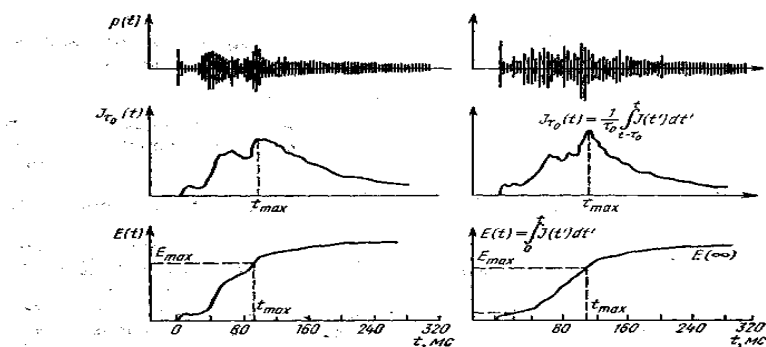


Рисунок 5.3

С помощью известных электронных приборов можно наблюдать каждое из многочисленных отражений вплоть до их полного слияния на завершающем участке реверберационного процесса. Но ухо не может воспринимать звуковые сигналы так дифференцированно. Поэтому на средних графиках показаны временные зависимости средней за интервал интегрирования $\tau_0 = 35$ мс интенсивности звука. И, наконец, нижние кривые представляют собой

зависимости от времени суммарной энергии, включающей в себя и энергию прямого звука. По истечении достаточно большого промежутка времени (практически через 500 мс), поступающая к слушателю энергия становится равной нулю, и конечное значение суммарной энергии $E(t)$ при $t \rightarrow \infty$ уже не возрастает. По таким графикам удобнее всего определять долю общей энергии, приходящей к слушателю за 50, 80 мс или за любой другой интервал времени. Практика требует, однако, объективно измеряемых параметров.

Можно показать, что, за исключением крайних случаев, слушатель концерта или оперы воспринимает лишь от 5 до 20% общей энергии $E(t)$ в виде прямого звука и только 10% энергии $E(t)$ приходится на завершающий участок реверберационного процесса. Остальные, примерно 70...80%, - это энергия ранних отражений, которые, как уже говорилось, существенно различаются в отдельных зонах помещения.

Опытный акустик на основании обширного экспериментального материала знает, как выглядят «хорошие» и «плохие» рефлектограммы. Если, например, на кривой $J_0(t)$ через 100 мс наблюдается второй «горб», то можно ожидать появления эха. Если кривая $E(t)$ резко поднимается, а затем на участке формирования реверберационного поля, наоборот, идет очень полого, то на данном месте слушателя звучание будет «сухим» и «с жестким нарастанием звука». Если же крутой участок кривой $E(t)$ начинается не сразу, а спустя небольшой промежуток времени, то нарастание звучания будет «мягким».

Из рассмотренных рефлектограмм можно, разумеется, найти и время реверберации. Нарастание импульсного отклика — в нашем случае $E(t)$ — однозначно связано со спадом реверберационного отзвука помещения после отключения источника звука. По кривой $E(t)$ можно судить о том, спадает ли реверберационный сигнал сразу же по экспоненте ($E(t)$ нарастает по экспоненте), или же кривая спада «провисает», то есть после начального крутого спада (подъем импульсного отклика) переходит к пологому участку, характерному для завершающего участка реверберационного процесса.

По мнению многих авторов, «начальное время реверберации» гораздо важнее для субъективного восприятия отзвука помещения, чем время реверберации, определяемое в конце процесса убывания уровня после выключения источника звука.

Системы озвучения дают большие возможности улучшения неудовлетворительных рефлектограмм помещений, так как они позволяют заполнить запаздывающими повторениями сигнала те интервалы времени, в пределах которых отсутствуют естественные (акустические) отражения. На основании сказанного, можно высказать рекомендации общего характера.

1. При построении систем звукоусиления всегда стремятся к тому, чтобы дополнительными (электроакустическими) отражениями (повторениями сигнала) заполнить пробелы в последовательности отражений, создаваемых помещением.

2. Отражения, создаваемые электроакустическими средствами, повышают уровень громкости соответственно доле их энергии в прямом звуке и в естественных отражениях.

3. Следует различать ранние и поздние отражения. Граница между ними лежит в пределах 50 мс для речи и 80 мс для музыки. Ранние отражения повышают разборчивость и прозрачность, поздние – пространственное впечатление. Боковые отражения, приходящие в интервале времени от 25 до 80 мс, могут одновременно повышать как прозрачность, так и пространственное впечатление.

На различных местах слушателей в помещении иногда наблюдается повышение уровня суммарной энергии звука на величину до 10 дБ. Это связано с ранними отражениями, не распределёнными по помещению в соответствии со статистическими законами. Помещения с хорошей акустикой характеризуются, конечно, равномерным распределением звуковой энергии. В оперных театрах суммарная энергия отражений от стен и потолка превышает энергию прямого звука, приходящего к слушателям, из-за ограждений оркестровой ямы, на величину, значительно большую, чем 10 дБ.

5.6. Разборчивость, прозрачность и пространственное впечатление

Повышению разборчивости и прозрачности особенно способствуют ранние отражения, которые приходят в медианной плоскости (спереди, сверху, сзади), поскольку сигналы, поступающие в оба уха, в этом случае максимально коррелированы между собой. На расстоянии равном четырёхкратному значению радиуса гулкости энергия прямого звука составляет лишь 1/16 энергии диффузного звука. Решающее значение для разборчивости и прозрачности имеет тот факт, что пока реверберационное поле не успевает сформироваться, ранние отражения, которые когерентны с прямым звуком, определяют разборчивость и прозрачность.

Звуки речи имеют среднюю длительность 80 мс, а звуки музыки – 170 мс. Поэтому ранние отражения в пределах первых 80 мс повышают прозрачность музыки. Разборчивости речи способствуют лишь отражения за первые 50 мс. Конечно, это – среднестатистические данные.

Анализ показывает, что хорошая прозрачность звучания музыки получается при времени реверберации, не превышающем 1,6 с. Часто, однако, в концертных залах требуется и считается оптимальным большее время реверберации. В таких случаях часто допускается для некоторых зон расположения слушателей снижение прозрачности звучания. Многие исследователи пришли к мнению, что не существует одного-единственного параметра, характеризующего прозрачность звучания. Среди посетителей концертов можно выделить две примерно равные группы людей, различающихся своим вкусом. Одна группа предпочитает прозрачность звучания пространственному впечатлению, другая – отдаёт предпочтение полноте звучания, его слитности и цельности по сравнению с возможностью выделения звучания отдельных музыкальных инструментов.

На качество звучания по субъективным оценкам кроме уровня громкости и прозрачности весьма важную роль оказывает пространственное впечатление.

Поскольку пространственное впечатление основывается на сознательном различении отражённого и прямого звуков, при соответствующих объективных измерениях необходимо учитывать направление прихода звука. Боковые отражения вносят больший вклад в формирование пространственного впечатления, чем отражения, приходящие в медианной плоскости. В концертных и оперных залах со временем реверберации $T=1,2\dots 2,5$ с легко достигается хорошая пространственность звучания на всей площади зрительских мест, за исключением первых рядов.

5.7. Тембральное окрашивание

То, что каждое помещение вносит свою окраску в звучание (изменение спектра звука) хорошо известно. На речевых сигналах стремятся к «светлому» звучанию помещения, к отсутствию «бочки» для того, чтобы энергетически слабые звуки (согласные и шипящие) были хорошо понятны. В музыкальных сигналах, наоборот, желательно некоторое подчёркивание низких частот, придающих звучанию «теплоту».

При оценке влияния помещения на тембральную окраску звучания до сих пор ограничивались, как правило, измерением частотной зависимости времени реверберации $T(f)$. Эта зависимость должна быть горизонтальной до частоты примерно 250 Гц, начиная с которой время реверберации должно возрасти к области низких частот, увеличиваясь до двукратного значения на частоте 31,5 Гц в концертных залах и до полуторакратного (или оставаться неизменным) в залах, предназначенных для прослушивания речи. Проявляющееся уже на первых отражениях тембральное окрашивание должно сохранять свой характер до полного замирания реверберационного звука. Классическим примером тембрального окрашивания ранних отражений могут служить явления, наблюдавшиеся акустиками при вводе в действие и последующей серьёзной переделке построенного в 1961 г. в Нью-Йорке зала филармонии (Филармоник Холл).

Несмотря на то, что частотная характеристика времени реверберации отвечала всем пожеланиям и, в частности, имела обычный подъём в сторону низких частот, громкость звучания басовых инструментов была явно недостаточной. Причиной этого послужили, как выяснилось, два важных фактора. Размещённые под потолком в два слоя многочисленные отражающие панели имели такие размеры, при которых эффективное отражение наблюдалось лишь на частотах выше 300 Гц. На более низких частотах коэффициент отражения быстро уменьшался. Самые низкие частоты отражались, правда, от потолка, но они приходили к слушателям с излишне большой задержкой. Слуховые ощущения слушателей формируются на основе первых (более ранних) отражений.

Кроме того, звук, распространявшийся непосредственно над публикой, подвергался необычно сильному поглощению. Это явление было известно и ранее, но оно никогда не проявлялось так сильно, поскольку в залах старой

конструкции низкочастотные отражения достаточного уровня обеспечивались боковыми ярусами и потолком. Вывод можно сделать такой: чем больше естественных отражений приходит к местам слушателей с различных направлений, тем меньше опасность неприятного окрашивания звучания. Большие трудности создаёт появляющаяся нежелательная тембральная окраска при использовании систем звукоусиления в концертных залах больших размеров. Если на завершающем участке реверберационного процесса звучание приобретает характер, не соответствующий отзвуку самого помещения, то слушатель будет недоволен качеством звучания.

Для того, чтобы электроакустическая система стала единым целым с помещением, необходимо различать тембральную окраску сигнала, подаваемого на устройство искусственной реверберации, и частотную характеристику этих устройств. Одно нельзя скомпенсировать за счёт другого. Недостатки реверберационных устройств (например, недостаточная плотность собственных частот) не могут быть скомпенсированы никакими коррекциями. Здесь возможно только согласование со звучанием помещения. В невыполнении этого условия кроется, по-видимому, причина отрицательного отношения некоторых слушателей к системам звукоусиления музыки.

5.8. Эхо

Если звук возбуждается между двумя параллельными отражающими поверхностями, (стены, пол – потолок), то возникает многократное эхо, называемое иногда также порхающим или флаттер-эхом. Тот же эффект наблюдается при многократных повторениях сигнала, полученных с помощью электронных линий задержки. Ухо человека чрезвычайно чувствительно ко всем периодически повторяющимся процессам. Если период повторения сигнала менее 20 мс (соответствует частотам выше 50 Гц), то воспринимаемый звук приобретает характер тона.

В таких случаях говорят о звучании «как из бочки» при низкой частоте следования повторений и о «металлическом» звучании при высокой частоте. Такое окрашивание звучания наблюдается и на продолжительных сигналах (вокальное исполнение, хоровое пение, длительные ноты).

Характерной особенностью спектра сигнала при таких явлениях, является наличие провалов на частотах, интервал между которыми равен частоте пульсаций. Передаточная функция при этом выглядит так, будто бы в канал включён гребенчатый фильтр, пропускающий спектральные составляющие, совпадающие с частотами пульсаций, и ослабляющий составляющие в промежутках. Поэтому такой эффект и называется «эффектом гребенчатого фильтра». Помещения имеют множество собственных резонансных частот и, соответственно изрезанные частотные характеристики. При этом, если неравномерность частотной характеристики приобретает периодический характер, в общем звучании слушатель ощущает в качестве основного тон с частотой пульсаций, даже если в спектре сигнала тон этот вообще отсутствовал.

При интервале следования эхо-сигналов от 20 до 200 мс возникает ощущение неровности звучания. При интервалах больше 200 мс слушатель слышит настоящее многократное эхо. Устранить многократное эхо можно, если промежутки между эхо-сигналами будут заполнены налагающимися друг на друга повторениями сигнала с интервалами, меняющимися по случайному закону. В залах с хорошей акустикой, как правило, упомянутые явления отсутствуют благодаря диффузным отражениям звука.

Важно, чтобы в области сцены не было параллельных поверхностей. Боковые стены должны расходиться под углом, для полного исключения многократного эха достаточен небольшой наклон потолка (около 10°).

5.9. Процесс установления звучания

Тесно связанным с прозрачностью, но не идентичным ей, является «мягкое» или «жёсткое» установление звучания. Это представляет интерес только для музыки. Для музыки, как правило, отдают предпочтение мягкому установлению звучания. Оно характеризуется тем, что на рефлектограмме не должно наблюдаться преобладание прямого звука, как не должно быть и сильных ранних отражений. Соответствующий пример показан на рисунке 5.3 справа. Максимальная интенсивность звука достигается лишь через 110 мс. Для речи такая рефлектограмма была бы совершенно неприемлема, а при звучании музыки получается хорошее качество.

Жёсткое установление звучания характеризуется большим уровнем прямого звука (в передних рядах концертных залов) и интенсивными ранними отражениями. Оно повышает прозрачность, чёткость и выразительность звучания. При слишком «остром» установлении звучания в результате подчёркивания вступления инструментов становятся более ощутимыми на слух малейшие ритмические и интонационные погрешности исполнения. Отчётливо воспринимаются при этом небольшие поправки, вносимые музыкантами, играющими на духовых и смычковых инструментах, а также побочные шумы, например скрип смычка, или удары, соответствующие извлечению звука.

Мягкое установление звучания сглаживает такие шероховатости, способствует слитности звучания и плавности переходов. Необходимо стремиться к такому установлению звучания, которое иллюстрируется правой частью рисунка 5.3. Из рисунка видно, что для музыки очень полезны отражения, приходящие в интервале от 50 до 80 мс.

5.10. Методы анализа характеристик помещений

Анализ акустических характеристик помещения может производиться на основе волновой или статистической теории.

Для помещений простой формы применяется волновая теория анализа характеристик помещения. В инженерной практике чаще пользуются более простыми, хотя и менее строгими, методами расчёта, основанными на

статистической теории анализа процессов затухания отзвука. Современные компьютерные программы позволяют производить расчёт акустических характеристик помещения точными методами волновой теории и для помещений сложной формы. Это позволяет производить более точные расчеты акустических характеристик концертных залов, которые, как правило, имеют сложную форму.

Согласно волновой теории собственные частоты f_r помещения

$$f_r = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{k}{l}\right)^2 + \left(\frac{m}{b}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2}, \quad (5.2)$$

где c – скорость звука в воздухе, k, m, l – целые числа от нуля до бесконечности, l, b, h – соответственно длина, ширина и высота помещения. Пример спектра собственных частот помещения с размерами 10 x 6 x 4 м в полосе частот от 0 до 100 Гц приведён на рисунке 5.4. В области низких частот собственные частоты помещения отделены друг от друга сравнительно большими интервалами, и спектр собственных частот имеет дискретную структуру. В области более высоких частот спектр заметно уплотняется. В отдельных случаях собственные частоты в разных направлениях (по высоте помещения, длине, ширине, диагонали и так далее) могут совпадать. Такие спектральные составляющие на рисунке 5.4 показаны удлинёнными линиями, над которыми указано число совпадающих спектральных составляющих. Такие совпадения являются нежелательными, так как при малых коэффициентах звукопоглощения поверхностей могут привести к тембральной окраске звучания.

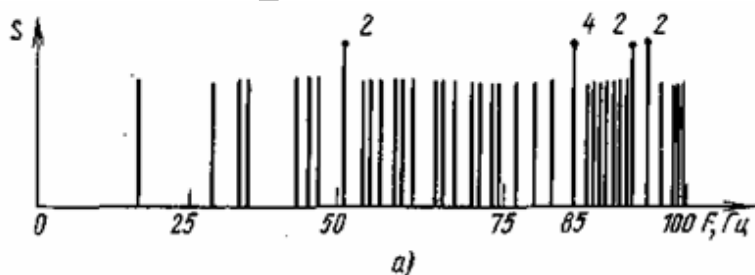


Рисунок 5.4

На рисунке 5.5 приведена гистограмма распределения собственных частот этого же помещения.

При выключении источника звука процесс затухания отзвука происходит на собственных частотах помещения по закону (на каждой из частот)

$$p_m = p_{rm} \exp [(-\alpha_r + j\omega_r) t],$$

где p_m – мгновенное значение амплитуды колебаний звукового давления,

$p_{\text{гн}}$ – начальное значение амплитуды колебаний звукового давления в момент выключения источника звука,

α_r – показатель затухания, зависящий от среднего значения коэффициента отражения звуковой волны на частоте ω_r .

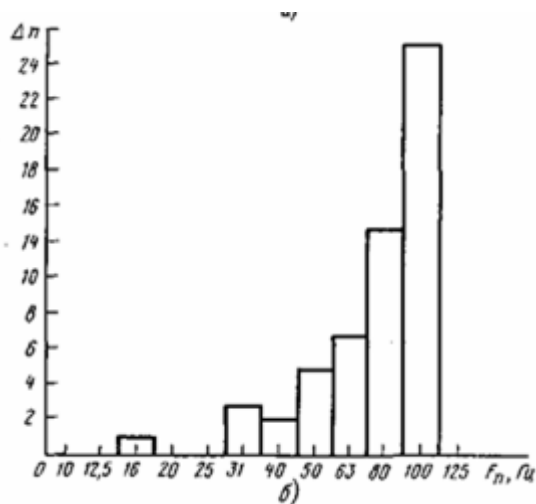
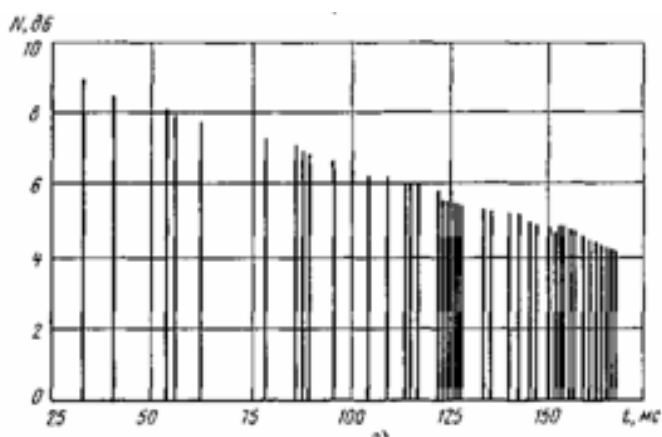


Рисунок 5.5

Процесс затухания собственных колебаний в помещении называется реверберацией. Кривая затухания звука не будет монотонной из-за биений между собственными частотами. На рисунке 5.6 изображена временная структура реверберирующего сигнала. Уровень звукового давления N убывает примерно по линейному закону. В начальной стадии затухания отзвука структура отражённых сигналов (первые отражения) дискретна. По мере возрастания времени отраженные сигналы практически (с учётом временных характеристик слуха) сливаются друг с другом.



в)

Рисунок 5.6

Если выполняется неравенство

$$\sqrt[3]{V} > \lambda ,$$

где V – объём помещения, λ – длина звуковой волны, плотность спектра собственных частот помещения настолько высока, что частота возбуждающего колебания практически не отличается по величине от частоты собственного колебания. Поэтому усиления отдельных компонент спектра сигнала за счет резонансов воздушного объема помещения не происходит. Обычно наблюдающаяся неравномерность частотных характеристик помещений объемом свыше 100 м^3 объясняется не резонансными явлениями на собственных частотах, а взаимодействием многочисленных собственных колебаний, которые из-за случайности фазовых соотношений усиливаются или ослабляются.

Средний интервал между соседними максимумами частотной характеристики помещения может быть найден из следующего приближенного выражения:

$$\Delta F = 4 / T ,$$

где T - время реверберации помещения, с.

Типичная картина реверберационного процесса для помещения любой формы изображена на рисунке 5.7.

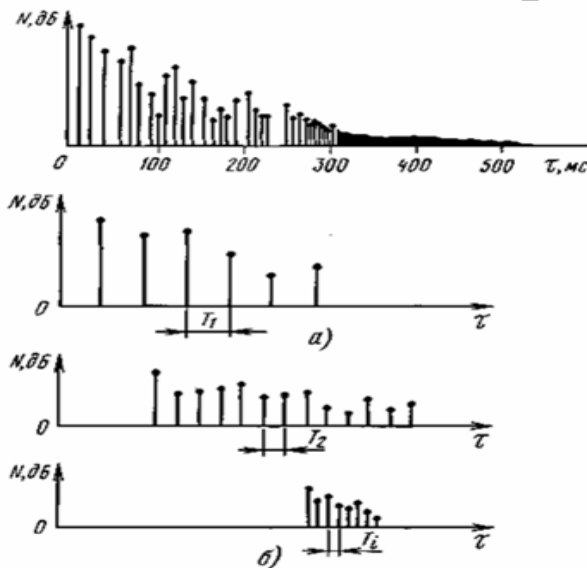


Рисунок 5.7

По оси ординат отложены уровни сигналов прямого звука и отзвуков, по оси абсцисс - время их поступления в точку приема звука. В начальной стадии временная структура реверберационного процесса дискретна.

С увеличением времени запаздывания отраженных сигналов их количество возрастает, а временные интервалы между ними уменьшаются. Уровень отзвуков с течением времени постепенно уменьшается. Данный процесс имеет флуктуационный характер. Этот начальный участок реверберационного процесса несет информацию о геометрических размерах помещения, его объеме, определяет такую важную особенность восприятия, как

пространственность звучания, а также свойственную помещению специфическую окраску звучания. Завершающий участок реверберационного процесса характеризуется поступлением в каждый момент времени достаточно большого числа отраженных сигналов. Он определяет свойственную помещению гулкость звучания. На рисунке 5.7б показаны содержащиеся в структуре реверберационного процесса группы периодически следующих отзвуков, появляющихся при наличии в помещении параллельных поверхностей (потолка и пола, противоположных стен).

6. Содержание отчета

1. Титульный лист с указанием кафедры, лаборатории, номера и наименования работы, номера группы и фамилии студента.
2. Цель работы.
3. Расчетные формулы.
4. Рисунки, таблицы с результатами наблюдений, расчетов и измерений.
5. Графики полученных зависимостей.
6. Выводы.

ЭБС ИИ