

### Часть 13

## **Субъективные критерии оценки акустики помещений.ч.1**

*Ирина Алдошина*

В одном из предыдущих номеров ("Звукорежиссер", 7/2000) была опубликована статья, посвященная новой технологии создания виртуального трехмерного звукового мира - аурализации. В основе ее алгоритмов лежит обработка звукового сигнала, выполненная таким образом, чтобы вызвать у слушателя такое же ощущение восприятия музыки, как если бы он слушал ее в концертном зале, церкви, аудитории и другом помещении по его выбору.

Создание таких алгоритмов оказалось возможным только в настоящее время, и не только благодаря появлению новых возможностей компьютерной обработки звука, но и благодаря накопленному многолетнему опыту по выявлению основных критериев, которые определяют субъективное восприятие "хорошей" или "плохой" акустики зала. Прежде, чем переходить к новым разделам психоакустики: восприятию "тембра" и др., что планируется сделать в первых номерах следующего года, постараемся коротко рассмотреть основные критерии субъективной оценки акустики залов. Это важно не только для понимания новых технологий 3D-Sound, которые сейчас активно внедряются в практику работы со звуком, но и для работы с компьютерными аудиoproграммами, так как заложенные в них алгоритмы позволяют моделировать различные эффекты, имитирующие характеристики помещения. Звукорежиссеру необходимо понимать, к каким субъективным изменениям в восприятии звука может привести применение этих эффектов.

Любому музыканту, композитору, звукорежиссеру и просто любителю хорошей музыки прекрасно известно, какое огромное влияние оказывает на качество воспринимаемого звука акустика помещения, в котором исполняется музыка. Достаточно вспомнить, как звучит орган в огромном соборе, и представить, что останется от этого звучания, например, в маленькой заглушенной комнате. Каждый стиль музыки требует своей оптимальной акустики зала, и композиторы прошлого учитывали это при создании своих произведений. Строительство хороших залов было и остается в значительной степени искусством, как и создание хороших музыкальных инструментов (скрипок, например), несмотря на огромные успехи, достигнутые в настоящее время в анализе объективных процессов формирования звукового поля в помещении.

Поскольку проблема расшифровки "слухового образа" остается еще окончательно не решенной, то и в оценке качества звучания в различных залах решающим является субъективная экспертиза. Поэтому за последние годы значительные усилия были приложены к установлению связи между объективно измеряемыми параметрами звукового поля в помещениях - и субъективной оценкой их качества звучания.

По этим вопросам в литературе опубликованы многочисленные, иногда противоречивые результаты. В качестве основы примем критерии, предложенные известнейшим специалистом в области акустики Беранеком.

Субъективная оценка акустики помещений для музыкальных и речевых программ представляет значительные трудности, поскольку требует решения следующих проблем: выбор метода оценки, выбор критериев оценки, установление их связей с объективными параметрами.

### **Выбор метода оценки**



Рис 1 Моделирование параметров помещения в заглушенной камере



Рис 2 Концертный зал

Все используемые методы представляют собой специально организованные тесты на прослушивание, которые проводятся тремя способами.

- слушатель производит оценку качества звука, находясь в синтезированном звуковом поле, создаваемом, например, распределенной системой громкоговорителей в заглушенной камере. (Рис. 1) Этот способ позволяет гибко менять и четко фиксировать параметры звукового поля: уровни звукового давления, время реверберации, время запаздывания и направление прихода ранних отражений и т.д. Такие эксперименты проводятся в достаточно большом объеме, особенно в Японии. Однако это трудоемкий эксперимент, кроме того, из-за конечного количества источников он создает упрощенную картину звукового поля в помещении;

- непосредственное прослушивание оркестра или исполнителей в испытываемых залах опытными экспертами с последующей статистической обработкой их оценок. (Рис. 2) Это наиболее

точный метод, однако требует большого объема экспериментов, при которых трудно добиться повторяемости результатов, и сложно менять отдельные параметры;

- на основе стереофонических записей, сделанных в испытываемых залах с помощью "искусственной головы" (рис.3) и последующем прослушивании через головные телефоны или громкоговорители. Этот способ позволяет получить достаточно точные результаты, хотя техника бинауральной записи как таковая имеет свои проблемы. Такие эксперименты многократно проводились (прежде всего, в Германии) и были получены очень ценные результаты.

В любом случае, результаты субъективных оценок акустики помещений существенно зависят от выбора экспертов: их профессии, опыта прослушивания, вкусов общей и музыкальной культуры, и т.д.

### Выбор критериев оценки

Одной из первых попыток установить "словарь" критериев субъективной оценки акустики музыкальных залов была предпринята Беранеком. На основе личного опыта, а также из бесед с

известными дирижерами, музыкантами, опытными слушателями, он выбрал из многочисленных субъективных оценок различных залов (теплый, холодный, пустой, глухой и др.) восемнадцать наиболее употребляемых субъективных критериев, а из них десять наиболее значимых и независимых. Хотя эта методика вызвала ряд возражений специалистов, но она послужила толчком к многочисленным исследованиям, и в настоящее время некоторые из результатов этих исследований введены в стандарты.

К наиболее распространенным субъективным критериям для оценки акустического качества помещений относятся: гулкость, жизненность (liveness); полнота звука (fullness); различимость или ясность (definition или clarity); интимность (intimacy), теплота (warmth),

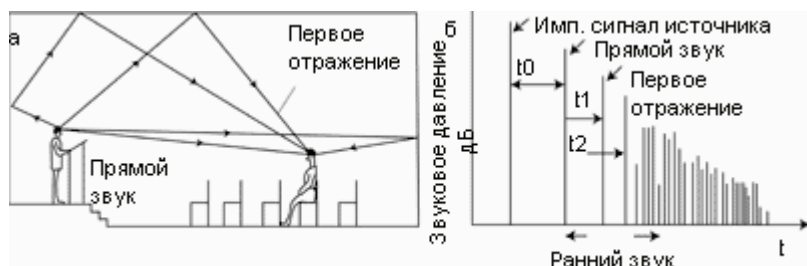


Рис 4 Структура реверберационного процесса

пространственность (spaciousness), громкость (loudness); баланс (balance); ансамбль (ensemble); тембр (timbre), а также отрицательные факторы: эхо, порхающее эхо (flutter), мешающие шумы.

### Установление связей

#### объективных параметров качества звучания и их субъективных оценок

Прежде чем приступить к решению этой задачи, была выполнена большая работа по общей классификации всемирно известных концертных залов по качеству звучания в них различных музыкальных произведений на основе анкетных опросов музыкантов, музыкальных критиков, опытных слушателей и т.д. В результате все рассмотренные залы (а было изучено более пятидесяти известных залов в разных странах мира), были сгруппированы в три группы - А, В, С в соответствии с качеством звука исполняемых в них произведений.

Соответственно, в этих залах были проведены измерения объективных параметров реверберационного процесса. Вопрос о выборе наиболее значимых объективных параметров, современных компьютерных методах расчета и измерения структуры звукового поля и временной структуры процессов затухания звука (т.е. параметров реверберационного процесса) в помещениях различной конфигурации заслуживает отдельного разговора. Здесь коротко остановимся только на некоторых параметрах, которые были использованы Беранеком в процессе анализа субъективных оценок.

Звук, который достигает слушателя в любом помещении прослушивания, содержит информацию как о параметрах звука, созданных музыкальным инструментом, певцом и т.п., так и о свойствах помещения, в котором этот звук воспроизводится. Помещение прослушивания (студия, концертный зал, стадион и др) является своего рода линейным фильтром, который производит обработку поступившего в него звукового сигнала, изменяя его временную структуру и изменяя его спектр, что, соответственно, приводит к изменению его тембра и определяет качество звучания.

Обусловлено это, прежде всего, тем, что в помещении, наряду с прямым звуком, к слушателю приходят многочисленные отражения, которые и формируют структуру реверберационного процесса, характерную для каждого вида помещения - она зависит от его размера, формы, отделки, наличия слушателей и др. Пример реверберационного процесса показан на рисунке 4. Как видно из рисунка, в начальный момент при использовании в качестве источника, например, короткого импульсного сигнала, к слушателю поступает прямой звук, затем, через определенное время, начинают поступать отражения от различных поверхностей, которые сначала четко разделены друг от друга по времени, затем количество их увеличивается,

звуковое поле становится диффузным, и уровень звукового давления в данной точке помещения постепенно падает - такой процесс спада звука в помещении и называется реверберационным.

Для описания параметров реверберационного процесса обычно используется величина времени реверберации (ВР), которая определяется как "время, в течение которого уровень

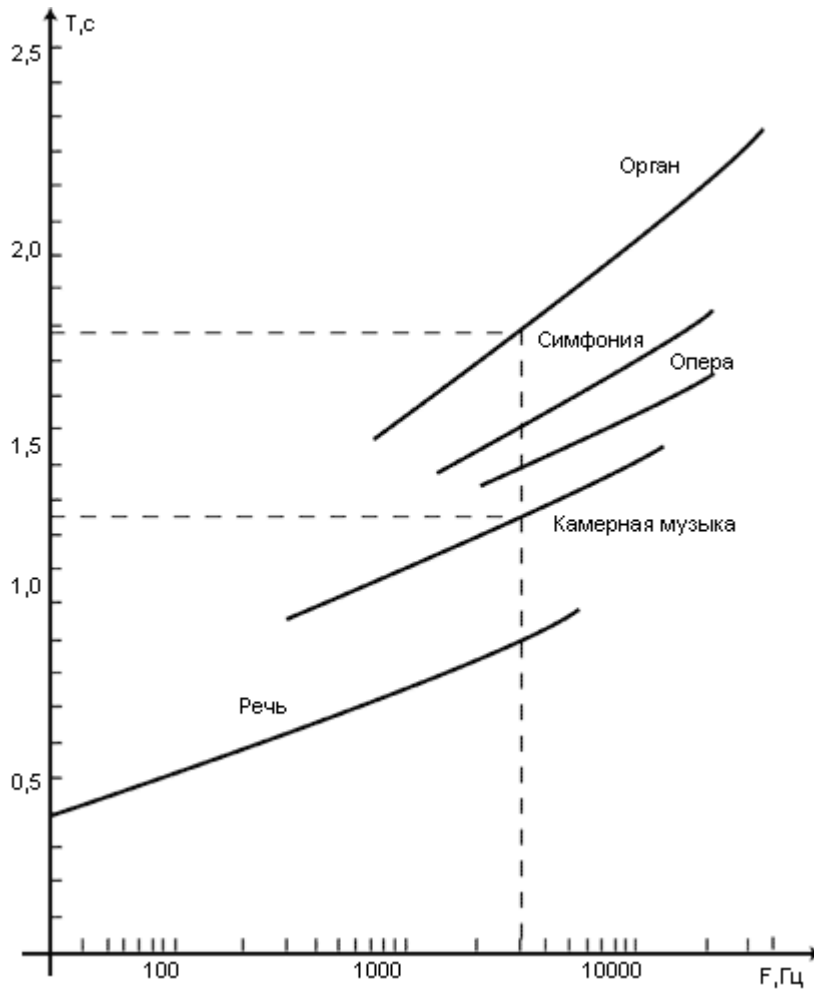


Рис 5 Оптимальное время реверберации

звукового давления уменьшается на 60 дБ". Величина времени реверберации определяется объемом зала и общим коэффициентом звукопоглощения в нем, она не зависит от формы зала, структуры распределения поглощающего материала и т.д., т.е. является усредненной характеристикой.

Однако исследования по оценке качества звучания в различных помещениях заставили ввести целый ряд дополнительных параметров, более тонко характеризующих реверберационный процесс.

"Ранний звук" определяется как прямой звук и отражения, поступившие в течение первых 80 мс после прихода прямого звука. Причем существенное значение имеет направление прихода этих ранних звуков - так, например, звуки, пришедшие от боковых стен в первые 80 мс, создают ощущения расширения источника

звука, что улучшает качество восприятия музыки.

"Громкость ранних звуков" определяется энергией прямого звука плюс энергия отраженных звуков, пришедших в первые 80 мс. "Громкость реверберирующего звука" определяется общей звуковой энергией, которая достигает слушателя после 80 мс.

"Раннее время реверберации" (РВЗ) - время затухания звука после выключения источника, когда уровень звукового давления уменьшается на 10 дБ. Кроме того, для сопоставления с субъективными оценками используется также время реверберации (ВР) при спаде звукового давления от -5 до -35 дБ при заполненных залах (т.е. часть реверберационной кривой).

"Коэффициент внутрислуховой кросс-корреляции (КВСКК)" определяется как коэффициент корреляции сигналов, поступивших на два уха при разном времени интеграции и в разных частотных диапазонах. Обычно используется время интеграции от 0 до 80 мс в трех октавных полосах: 500, 1000 и 2000 Гц. Этот коэффициент характеризует степень различия звуковых сигналов в двух ушах как по времени, так и по амплитуде.

Кроме этих, для сравнения с субъективными оценками используется и целый ряд других параметров: эквивалентная реверберация, распределение уровней звукового давления и др.

Сравнение результатов субъективных экспертиз, проведенных в вышеуказанных залах, с приведенными выше параметрами, показало отчетливую связь между общим впечатлением от акустики зала и временем реверберации, причем в качестве времени реверберации ВР использовалось значение времени затухания от уровня -5 до -35 дБ (т.е. часть кривой затухания) для заполненных публикой залов, и время ранней реверберации РВЗ от 0 до -10 дБ. Как следует из таблицы, при переходе от залов группы А к группе В и С величины ВР и РВЗ изменяются от среднего значения 2 и 2,6 с (группа А) до 1,6 и 1,9 с (группа В) и до 1,4 и 1,75 с (группа С).

На основе полученных результатов была выполнена более дифференцированная оценка отдельных субъективных параметров акустики залов, и исследована их связь с измеренными объективными характеристиками.

"Гулкость-жизненность" - эти термины прежде всего связаны с оценкой общего впечатления от акустики залов, т.е., как было указано выше, в значительной степени связаны с временем реверберации (ВР). Все помещения по этому критерию ранжируются достаточно четко

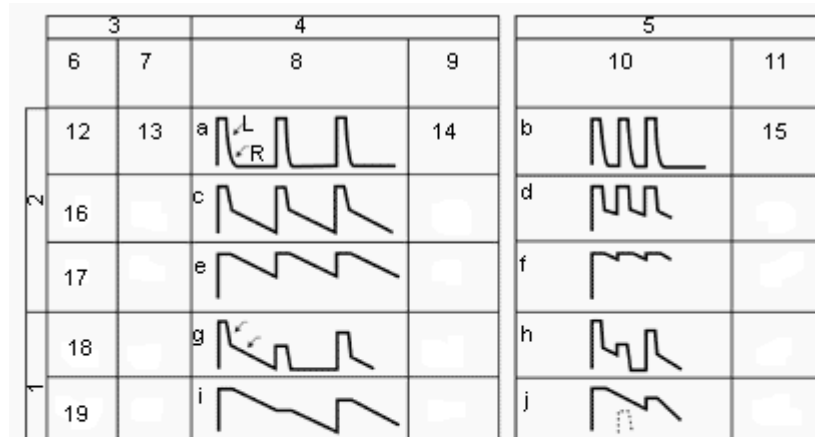


Рис 6 Таблица для оценки параметров помещения

1 - 3 звуки разн громкости 2 - 3 звуки одинак громкости 3 - Акуст условия 4- 3 звуки исп медленно 5 - 3 звуки исполняются быстро 6 - Время реверберации (б - большое м - малое с - среднее) 7 - СВ 8 - Музыкально-акуст результаты 9 - ясность/полнота (далее я/п, в - высокая, с - средняя, н - низкая) 10 - Музыкально-акуст результаты 11- ясность/полнота 12 - м 13 - б 14 в я/п 15 в я/п (следующая строка) - б с в я/сп в я/сп 17 - б.м.с/я/вп.н/я/вп 18- б.с.в я/сп. в я/сп 19 б.м.н/я/вп очень н/я/вп

(соборы, концертные залы, студии и др.). Для каждого вида музыки и речи существуют оптимальные пределы изменения времени реверберации, которые зависят от объема помещения и частоты (например, рис. 5), которое меняется в пределах от 0,4 до 1 с для речи, от 1 до 1,5 с для камерной музыки, от 1,8 до 2,2 с для симфонической и т.д. Реверберация - один из эффектов, который учитывался композиторами при создании произведений, например, композиторы органной музыки специально делали паузы, чтобы была слышна длинная реверберация в соборе.

Наибольшее влияние на ощущение "жизненности" звуков оказывает значение времени реверберации на средних частотах. В помещениях, в том числе в студиях, где время реверберации слишком короткое для данного музыкального жанра, звук характеризуется как "мертвый", "сухой". Все, кто слышал, как звучит музыка в заглушенной камере, могут отчетливо представить, что именно имеется в виду. Наоборот, если время реверберации слишком велико для данной музыки, звук характеризуется как слишком "грязный", "водянистый". Поэтому введение при обработке дополнительных эффектов реверберации, не соответствующих стилю и характеру музыки, может вызвать аналогичные субъективные ощущения .

Полнота тона (звучность) также зависит от времени реверберации ,но также и от отношения громкости реверберирующих звуков, которая определяется энергией звуков, приходящих после первых 80 мс (E1) к громкости ранних звуков, которые определяются энергией прямого

звука и первых отражений до 80 мс ( $E_2$ ).

Чем больше отношение  $E_1/E_2$ , тем выше "полнота тона".

Для церквей это отношение велико, и звук воспринимается как "полнозвучный". В помещениях, где энергия отраженных звуков мала, звук будет казаться "пустым". В залах (например, старинных оперных театрах), где звук от исполнителя имеет возможность свободно подниматься и отражаться от высоких потолков, энергия в реверберирующих звуках будет достаточно большой и звучание также будет "полным". Для обеспечения этого качества звука большое значение имеет выбор формы зала и размещение специальных отражающих панелей и других деталей убранства.

В опциях reverb почти всех компьютерных аудиопрограмм пользователю предоставляется возможность произвольно менять соотношение ранней и поздней частей энергии в реверберирующем звуке. Однако использование этой возможности без понимания того, к каким изменениям субъективного восприятия это можно привести, может сделать обрабатываемую композицию "сухой" и "пустой". Допустимые пределы изменения этого параметра для хороших залов будут приведены ниже.

Различимость и ясность. Когда музыканты говорят о "различимости" или "ясности", имеется в виду степень, с которой отдельные звуки в музыкальном произведении четко разделяются друг от друга. Имеется два вида "ясности" (различимости): "горизонтальная" и "вертикальная".

Горизонтальная относится к звукам, следующим друг за другом. Композитор использует специальные приемы, чтобы обеспечить ее: темп, повторение тонов во фразе, относительную громкость последовательных тонов и т.д. Исполнитель также может влиять на горизонтальную различимость выбором манеры исполнения.

Акустические факторы в помещении, которые определяют "горизонтальную различимость" музыкального произведения - это величина времени реверберации и отношение громкости (энергии) ранних звуков к громкости (энергии) реверберирующего звука:  $S_{80} = E_2/E_1$ , т.е. факторы те же, но отношения обратные. Таким образом, увеличение "горизонтальной различимости" уменьшает полноту тона, и наоборот.

Список концертных залов, разделенных по категориям акустического качества

Концертные залы	Число мест	Объем, м <sup>3</sup>	ВР для заполненных залов, с	РВЗ для заполненных залов, с
<b>Группа А:</b>				
Бостон, Симфонический зал	2625	18750	1.8	2.4
Вена, Гроссер Мюзикверейнс Зал	1680	15000	2	3
Амстердам, Консерт гебоув	2047	18780	2	2.6
<i>Средние значения</i>	2047	18750	2	2.6
<b>Группа В:</b>				
Чикаго, Оркестр Холл	2582	15180	1.3	
Сан-Франциско, Дэвис Холл	2843	24350	2.2	2.2
Эдмонт, Альберта Джабили Холл	2731	21500	1.4	1.4

Монреаль, Салле Уилфред Пеллетье	2998	25000	1.7	1.9
Ванкувер, Театр королевы Елизаветы	2800	21500	1.5	
Тель-Авив, Манн Аудиториум	2715	21240	1.6	1.7
<i>Средние значения</i>	2760	21500	1.6	1.9
<b>Группа С:</b>				
Буффало, Клейнханс Мюзик Холл	2839	18240	1.3	1.6
Блумингтон, Зал Университета	3788	28700	2.2	
Лондон, Барбикан Концерт Холл	2026	17750	1.7	1.9
<i>Средние значения</i>	2839	18240	1.4	1.75

Вертикальная различимость - это степень, с которой звуки, звучащие одновременно, различаются на слух. Она также зависит от стиля произведения, искусства исполнителя, акустики зала и тренированности слуха.

Композитор влияет на нее выбором одновременно звучащих тонов, выбором инструментов и т.п., а исполнитель может влиять, меняя динамику звучания одновременных тонов и др.

Акустические факторы для вертикальной различимости - баланс звуков различных инструментов, который существенно зависит от акустических параметров сценического пространства; и также отношение энергии ранних звуков к энергии ревербирующего звука.

Таким образом, горизонтальная и вертикальная различимость (ясность) зависит как от музыкальных, так и от акустических факторов. Их влияние должно быть заложено в замысел композитора, чтобы сделать музыку доступной аудитории. Например, органная хорала Баха, с их крупными длительностями, медленными мелодическими линиями и растянутой динамикой, требуют помещений с большим временем реверберации (более трех секунд) и высоким значением отношения полной ревербирующей энергии к энергии ранних отражений. Они имеют малую горизонтальную различимость, но высокую полноту тона.

Концертам Моцарта, с быстрыми пассажами фортепьяно и развитой оркестровой фактурой, в противоположность органной музыке, необходимы помещения с относительно коротким временем реверберации и большим отношением ранней к ревербирующей энергии, т.е. с высоким горизонтальным и вертикальным разрешением.

Влияние темпа исполнения музыки на ощущения полноты и ясности звучания в помещениях с разными значениями времени реверберации и разным отношением  $E2/E1$  показано в таблице на рисунке 6. Здесь показана делимость отдельных коротких звуков в музыкальном произведении в зависимости от времени реверберации  $VR$  и ясности  $S80$ . Как видно из таблицы, для помещений с коротким временем реверберации и большим  $S80$  (первая строка, примеры а и б) индивидуальные тоны быстрой и медленной музыки разделяются отчетливо, и процессы их атаки и спада хорошо различимы, заметна быстрая часть спада звука самого инструмента  $I$ , и более медленная часть  $R$  из-за процесса реверберации.

Во второй строке, что соответствует помещениям с большим временем реверберации и средним значением ясности  $S80$  (примеры с и d) атака отдельных звуков будет слышна, а часть участка спада звука инструмента будет "закрыта" реверберацией (т.е. звучание инструмента существенно "затягивается" за счет того, что звук в помещении затухает достаточно медленно). При более быстром темпе исполнения уже и часть атаки, так же как и спада

звучания инструмента, будут плохо различимы из-за процесса реверберации.

Для примера е и f длина ВР та же, но отношение раннего звука к ревербирующему звуку меньше, при этом часть атаки и почти весь спад звука инструмента "закрыты" реверберацией, тоны различимы плохо, но полнота звука большая. При быстром темпе f тоны едва различимы, они почти полностью скрыты реверберацией. Полнота звуков максимальная, но играть staccato в таком помещении невозможно. Еще больше влияние реверберации и ясности C80 сказывается на исполнении звуков разной громкости: примеры g и h и примеры i и j. Как видно из таблицы, слабые тоны практически полностью маскируются процессом реверберации и становятся неразличимыми.

Эти соотношения в конкретном зале должны иметь в виду композитор и исполнитель, выбирая темп, фразировку и т.д.

Таким образом, разные стили музыки требуют различных значений вышеуказанных параметров. О величине времени реверберации для концертных залов и музыкальных студий было сказано выше, что касается коэффициента ясности (различимости) C80, то для залов, оцененных музыкантами-экспертами как залы с хорошей различимостью, его значения находятся в пределах от -3,7 до -0,02 (среднее значение -2,5).

Современные компьютерные технологии дают возможность менять параметры, моделирующие процессы реверберации в разных помещениях, в очень широких пределах. Достаточно сложные алгоритмы, например Acoustic Modeller, позволяют осуществлять "свертку" сигнала с импульсными характеристиками различных помещений, что дает возможность заставить звучать музыкальную композицию так, как если бы она звучала в этих залах. Однако, выбирая параметры этих помещений или создавая собственные, всегда необходимо помнить, что несоответствие характеристик помещения (времени реверберации, отношения энергии ранних звуков к поздним и др.) стилю музыкального произведения и темпу его исполнения, может привести к совершенно противоположным ощущениям, чем это предполагалось, поэтому при создании электронных композиций или обработке фонограмм необходимо учитывать указанные критерии.