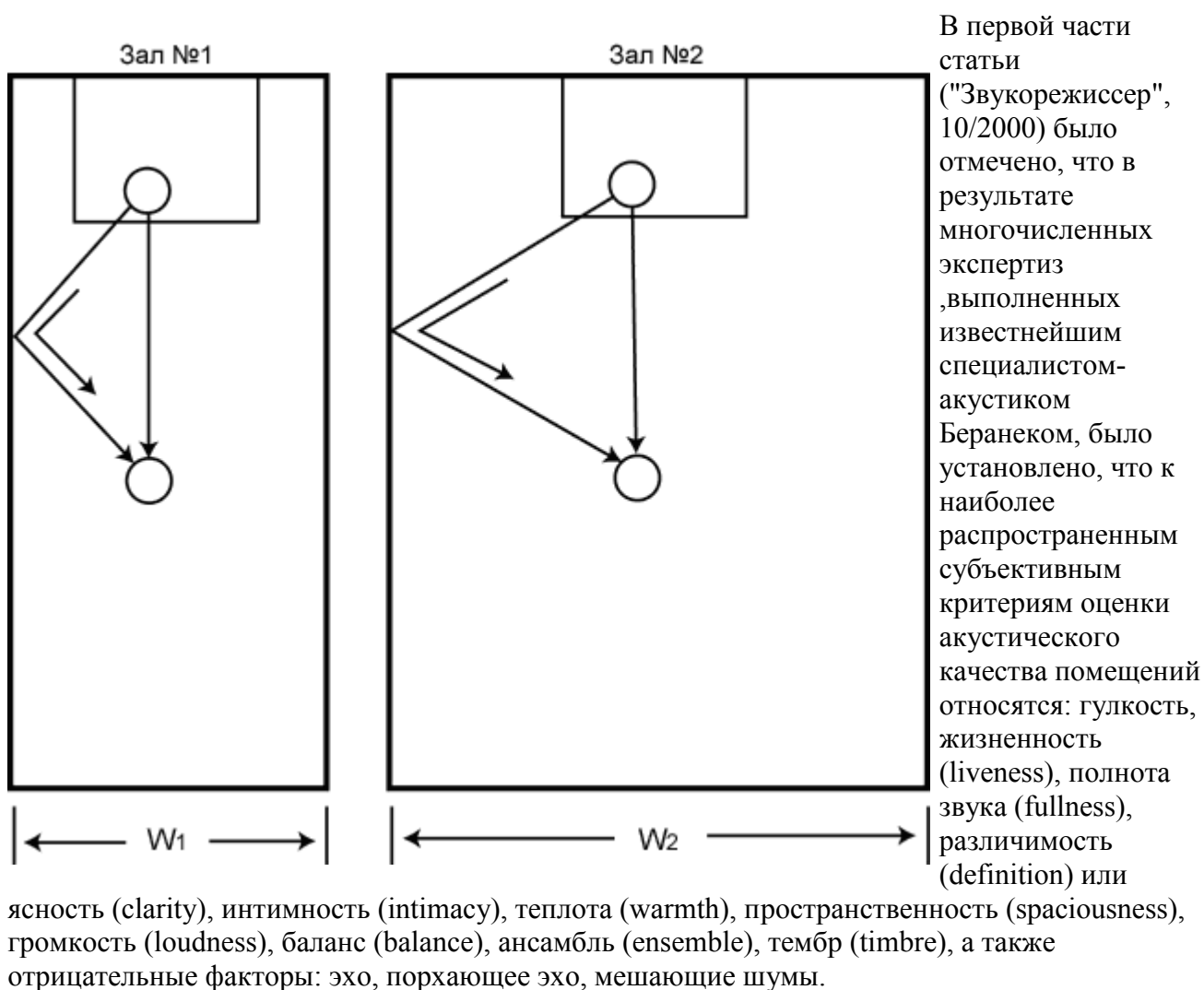


Часть 13.2

Субъективные критерии оценки акустики помещений, часть 2

Ирина Алдошина



Была рассмотрена связь таких субъективных критериев, как гулкость, жизненность, полнота звука, различимость или ясность с объективными параметрами, характеризующими реверберационный процесс в помещении: время реверберации, отношение энергии ранних и поздних отражений и др.

Рассмотрим следующие критерии: интимность (присутствие, камерность, близость). Они определяют для слушателя кажущийся размер пространства, в котором он слушает музыку. Разные стили музыки требуют разных значений "акустической интимности". Интимность определяется разницей во времени между прямым и первым отраженным звуками, а также, частично, общей воспринимаемой громкостью звучания, так как слушатель предполагает, что звук в маленьком помещении кажется громче, чем в большом. Основной вклад в ощущение "интимности" вносят первые отражения от боковых стен (в залах с достаточно высокими потолками), или от потолков при их сравнительно низкой высоте.

Рис.1. Разница путей прямого и отраженного звукового луча в залах различных размеров



Как видно из рисунка 1, разница путей прямого (D) и отраженного (R1) звуков в первом зале меньше, чем во втором, и, соответственно, различается разница во времени прихода звуков, равная $t_n = (R_n - D)/C$, где C — скорость звука, а n = 1, 2. Это, естественно, приведет к тому, что интервал времени между прямым

звуком и первым отражением (рис. 2) во втором зале будет больше. Большая разница во времени прихода прямого звука и первого отражения создает у слушателя ощущение оторванности (отдаленности) от исполняемой музыки.

Рис.2. Интервал времени между прямым звуком и первым отражением

В залах с хорошей акустикой, предназначенных для симфонического репертуара, этот временной интервал составляет для слушателей, сидящих в центре зала, величину 15–30 мс. В пределах этого времени, если отражения имеют похожий спектр и огибающую, а их громкость не выше прямого звука, они не воспринимаются как отдельные звуки, а помогают в улучшении локализации прямого звука (это явление известно как эффект Хааса). Для скорости звука 340 м/с задержка на это время соответствует разнице в расстоянии примерно 12 м, что требует ширины зала порядка 18–20 м. Композитор (звукорежиссер, исполнитель и др.) должен иметь в виду этот параметр, иначе будет несоответствие размеров помещения стилю музыки, которое очень четко ощущается слушателями, примером может служить звучание органа в маленькой комнате.

В старинной музыке (до 17 века) камерные произведения создавались в основном для малых ансамблей, и исполнялись в залах с малой разницей прихода ранних отражений (меньше 15 мс), что создавало ощущение близости ("интимности") звучания. В 18–19 веках изменился стиль музыки, увеличились исполнительские составы и размеры помещений (оперные театры, концертные залы и др.) и, соответственно, выросло время задержки до 30 мс. В настоящее время, когда многие концертные залы имеют очень большие размеры, исполнение в них камерной музыки создает ощущение несоответствия размеров зала стилю. Музыка как бы теряется в зале. Для улучшения этой ситуации иногда используются дополнительные отражающие поверхности около сцены по бокам или на потолке, что позволяет создать дополнительные ранние отражения с меньшим временем запаздывания, и тем самым улучшить восприятие исполняемой музыки.

Пространственность — ощущение слушателя, что музыка идет от полной ширины зала, и звук окружает его со всех сторон, что обычно характеризует залы с хорошей акустикой. Наиболее полно это ощущение проявляется при прослушивании, например, органа или хора в больших соборах. В противоположность этому, в залах с плохой акустикой звук кажется идущим как бы из "окна".

Тренированный слушатель (тем более звукорежиссер) может различить две составляющие в восприятии пространственности кажущееся расширение площади источника звука (ASW) и окружение (или "обертывание" LEV), когда слушатель чувствует себя погруженным в звук со всех сторон.

По мнению многих экспертов, первая составляющая является одним из главных индикаторов акустического качества концертных залов и помещений прослушивания. Она связана с уровнем боковых ранних отражений: чем выше уровень боковых отражений в помещении, тем больше кажущееся расширение источника. Кажущаяся ширина звукового источника связана также с уровнем громкости на низких частотах СЗн2. (в основном в области частот 125 и 200 Гц).

Однако наибольшую связь с этим параметром показали результаты измерения коэффициента внутрислуховой кросс-корреляции сигнала КВСККр3. Этот коэффициент определяет степень разности звуковых сигналов в двух ушах как по времени, так и по амплитуде. Чем менее сходны звуки в левом и правом ушах, тем меньше этот коэффициент, и тем больше кажущееся расширение источника $ASW = 1 - КВСККр3$. В случае, если звуки одинаковы, коэффициент становится равным единице, и кажущийся источник звука концентрируется в центре. Эти результаты подробно разработаны в теории стереофонии.

Измерения, выполненные в различных залах с помощью прибора "искусственная голова" на двадцати позициях при разных положениях источников звука, показали, что значения этого коэффициента, усредненного в трех октавных полосах 500 Гц, 1 и 2 кГц, при интеграции по времени в интервале 0-80 мс КВСККр3 (р-ранний по времени прихода, 3-усредненный в трех полосах), дают хорошую корреляцию с субъективными оценками кажущегося расширения источника - ASW.

Все измеренные залы оказались четко ранжированы по этому параметру: для лучших по качеству звучания залов мира значения этого коэффициента КВСККр3 оказались в пределах 0,3-0,6.

Обертывание (погружение LEV) связано с ощущением позднего реверберирующего звука, поступающего со всех сторон (после 80 мс), и зависит от конструкции зала: наличия нерегулярностей стен, балконов и т.д., т.е. всех конструктивных элементов, которые обеспечивают приход звука с разных сторон (диффузность звукового поля). Так, например, ощущения звучания музыки у слушателя, к которому отраженные звуки приходят со всех сторон: от потолка, стен, пола и т.д., будут существенно отличаться от ощущений сидящего под балконом слушателя, к которому звук приходит только с фронта. Значение этого коэффициента также связано с коэффициентом внутрислуховой кросс-корреляции, усредненным за период времени от 80 мс до 1 с, однако статистически значимых измерительных данных по этому параметру еще не набрано.

Громкость - для оценки залов используется специальное субъективное понятие, характеризующее громкость источника звука при игре фортиссимо по отношению к некоторой "ожидаемой" громкости на месте прослушивания. Наиболее благоприятное расстояние по этому параметру в большинстве залов для прослушивания прямого звука от оркестра 18 м, от солистов 6-15 м.

Громкость определяется субъективным ощущением силы звука, она пропорционально плотности звуковой энергии на месте прослушивания.

Для объективной оценки громкости предложен такой параметр как сила звука СЗ, который

определяется как разность уровней звукового давления, измеренного на шумовом сигнале на месте слушателя, и уровнем звукового давления от того же источника на том же расстоянии в заглушенной камере, при этом измерения проводятся в октавных полосах с частотами 125, 250, 500 Гц, 1, 2 и 4 кГц. При измерениях учитывается только энергия прямого звука и ранних отражений, пришедших в первые 80 мс. Обычно нормируются два параметра: один, усредненный в полосах 125 и 250 Гц (Снч2), и другой в полосах 500, 1000 и 2000 Гц (Ср3). Значения этих параметров для лучших залов оказались равными 6 и 6,2.

Теплота - отношение времени реверберации на низких частотах к времени реверберации на средних. Оно измеряется при заполненном зале, при этом время реверберации на низких частотах (125 Гц) должно быть равно времени реверберации на средних частотах (500 1000 Гц), или быть больше примерно на 20%. "Теплота" субъективно определяется как звучность басов по сравнению со звучностью средних частот. Беранеком был предложен критерий КНТ коэффициент низкого тона, равный отношению среднего значения времени реверберации ВР на частотах 125 и 250 Гц к среднему значению времени реверберации на частотах 500 и 1000 Гц:

$$КТН = \frac{ВР_{125} + ВР_{250}}{ВР_{500} + ВР_{1000}}$$

Его измеренные значения для лучших концертных залов оказались в пределах 1,08 1,1.

Баланс - понятие, служащее для оценки громкости отдельных инструментов и групп инструментов по отношению к общей громкости оркестра. Баланс должен быть как между разными группами инструментов, так и между оркестром и солистами. Баланс зависит от особенностей околосценического пространства, размещения оркестрантов, от исполнительской концепции дирижера, звукорежиссерского решения, и др.

Ансамбль - понятие, включающее в себя стройность, слаженность совместного исполнения, в том числе ритмическую точность и синхронность исполнения отдельных партий. Чувство ансамбля зависит от слышимости собственного исполнения и взаимной слышимости, что определяется в значительной степени конструкцией сцены и поверхностей вблизи нее.

Вопросами акустики сцены и околосценического пространства, и их влияния на общее звуковое впечатление в зале, сейчас занимается много исследователей, и получены достаточно интересные результаты.

Тембр - понятие сложное и многогранное, проблемам его восприятия уделяется сейчас особое внимание в психоакустике. Этой теме будут посвящены очередные статьи. Можно пока принять определение, предложенное Беранеком, хотя имеются и другие: "тембр качество звука, иногда его называют "окраской звука", которое позволяет отличить звук одного инструмента или голоса от другого". Каждый инструмент имеет свой характерный тембр звучания, достаточно вспомнить исполнение одной и той же мелодии на разных инструментах, например, на фортепьяно или органе, который определяется его конструкцией и материалами, из которых он изготовлен.

Рис.3. Осциллограмма звучания звука скрипки С4

Тембр зависит от структуры звука во все периоды его звучания: в момент установления, в стационарный период и в момент спада. Осциллограмма звука скрипки С4 и трехмерный спектр показаны на рисунках 3 и 4. Акустические свойства помещения оказывают влияние на все этапы звучания и, соответственно, на воспринимаемый тембр. Как уже было отмечено в первой части этой статьи, помещение является линейным фильтром, который производит обработку музыкального или речевого сигнала как во временной, так и в частотной областях. Реверберационный процесс в помещении изменяет характер процессов нарастания (атаки) и спада звука, при этом структура распределения резонансных частот в помещении существенно влияет на его спектр. Для помещений прямоугольной формы с отражающими стенами резонансные частоты могут быть рассчитаны по простой формуле:

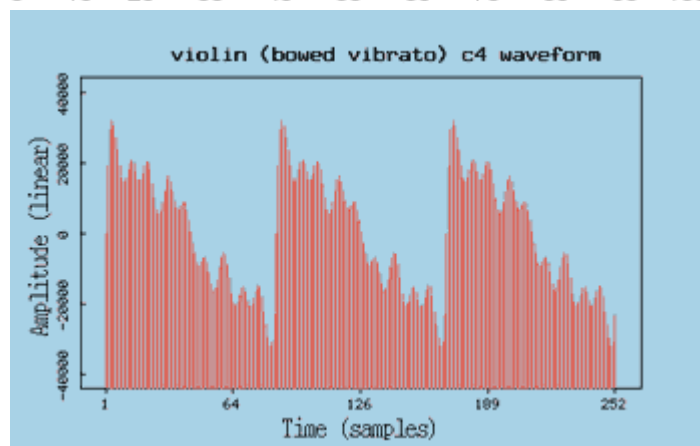
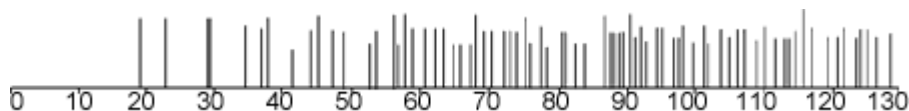
$$f_{k,m,n} = c/2 [(k/L)^2 + (m/B)^2 + (n/H)^2]^{1/2},$$

где c - скорость звука, $f_{k,m,n}$ - частоты резонансных колебаний, L, B, H длина, ширина и высота помещения, k, m, n целые числа, определяющие номер моды (формы) колебаний.

Рис.4. Спектр звука С4

Как видно из этой формулы, значения резонансных частот зависят от размеров помещения. Результаты расчетов резонансных частот для больших помещений и для помещения с малыми размерами показывают, что первые дискретные резонансы для помещения с малыми

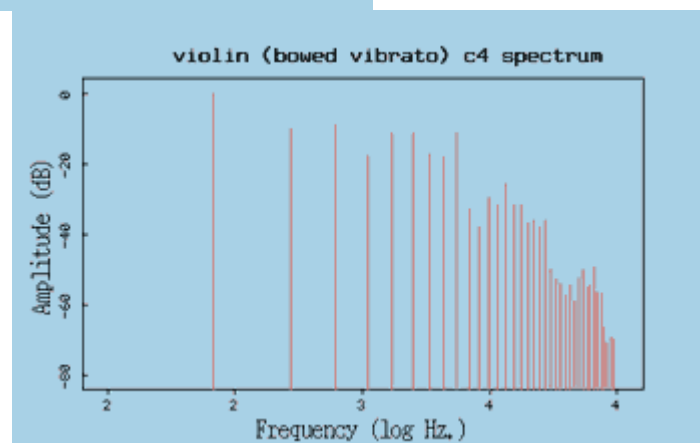
размерами попадают в область слышимых частот, и значительно окрашивают звучание.

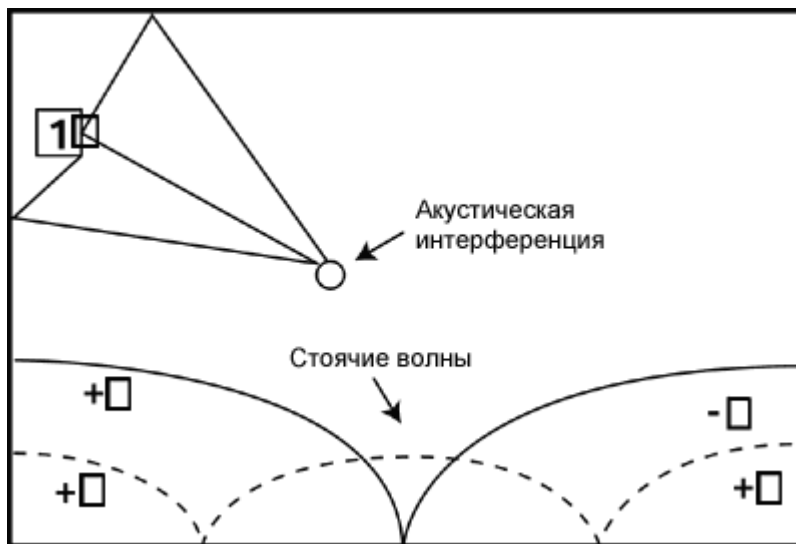


На рисунке 5 показан пример спектра для помещения с размерами 9 x 7,5 x 5,8 м.

Рис.5

На рисунке 6 - пример неравномерного распределения звукового давления в помещении на первой осевой резонансной частоте.





частности, для музыкальных студий минимально допустимый объем должен быть не менее 200 м

Плотность резонансных частот должна быть достаточно велика, чтобы не было заметно изменение тембра за счет резонансов. Исполнение музыки в помещениях с малым объемом неизбежно приводит к искажению тембра за счет дискретных резонансов, малого времени реверберации, недостаточного временного интервала между прямым звуком и первыми отражениями, и др. Музыка требует пространства, в

Таким образом, тембр существенно зависит от размеров и формы помещения, от распределения и величины затухания в нем, от наличия рассеивающих элементов, обеспечивающих диффузное звуковое поле, и многих других факторов. С учетом всего этого и складывается искусство создания залов с хорошей акустикой. Следует подчеркнуть, что влияние параметров помещения на тембр звучания очень существенно, о чем по собственному опыту хорошо знают музыканты-исполнители. Поэтому выбор оптимального значения времени реверберации для каждого стиля музыки, а также оптимальных значений рассмотренных выше других параметров, является обязательным условием обеспечения хорошего звучания музыкальных и вокальных произведений в данном помещении.

Созданные за последние годы методы аурализации компьютерного моделирования звукового

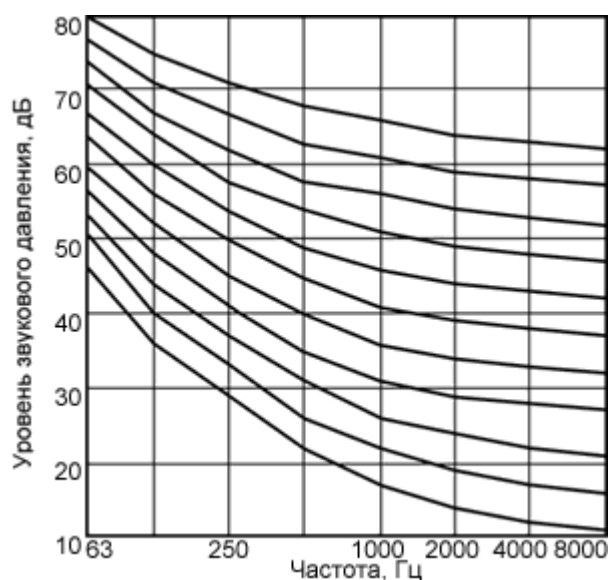


поля в помещениях, дающие возможность предварительного прослушивания звучаний различных источников (см. статью "Аурализация виртуальный звуковой мир", журнал "Звукорежиссер" 7/2000) открывают принципиально новые возможности в проектировании концертных залов, студий и др., позволяя проверить различные варианты акустических решений и оценить их влияние на тембр звучания музыки и речи. На это раньше уходили годы, и поиск проходил методом "проб и ошибок".

Наряду с акустическими параметрами помещений, которые определяют положительные впечатления от прослушивания в них музыки и речи, существует целый ряд параметров, которые являются мешающими факторами при прослушивании. К числу основных негативных факторов относятся:

Общий вид музыкальной студии Royaltone Studio

Эхо - заметное на слух повторение прямого звука. Заметность эха зависит от времени запаздывания и интенсивности отраженных сигналов. При времени запаздывания меньше 80 мс ощущение эха практически отсутствует даже при достаточно больших уровнях сигнала.



Порхающее эхо - многократная периодическая последовательность эха, что создает тональную окраску звука (эффект гребенчатого фильтра), особенно если период последовательности меньше 20 мс. Сильный эффект наблюдается при наличии длинных параллельных стен, что характерно для многих современных залов. Присутствие эха может приводить к нарушению локализации звуковых источников, что совершенно недопустимо в помещениях для прослушивания музыки.

В классических залах использовались специальные рассеивающие поверхности: колонны, ложи и др., а также выбиралась не прямоугольная форма помещения, что и сейчас используется в хороших "акустических" студиях (см. фото).

Мешающие шумы - общее впечатление от любого исполнения музыки или речи может быть в значительной степени испорчено, если в зале имеется высокий уровень мешающих внешних или внутренних шумов. В таких залах или студиях оказывается трудным, иногда практически невозможным, обеспечить звукозапись, и даже очистить фонограммы от шумов различного происхождения оказывается не всегда возможным, несмотря на наличие современных компьютерных технологий.

Уровень шумов в зале определяет динамический диапазон воспринимаемого музыкального или речевого сигнала, поскольку слабые уровни сигнала маскируются шумом, что приводит к значительной потере качества звучания музыки или к потере разборчивости речи.

Уровень шумов в помещении зависит от нескольких причин:

- проникновение внешних шумов от транспорта и др. Именно для борьбы с этими шумами применяются различные способы звуко- и виброизоляции при строительстве концертных залов и студий. Для этого строят студии в тихих местах, используют дополнительные стены на отдельном фундаменте типа "здание в здании", применяют специальные звуко- и виброизоляционные материалы и т.д.;
- возникновение внутренних шумов от вентиляционных, осветительных и других систем, а также шума от публики. При строительстве студий затрачиваются значительные средства на уменьшение уровней шумов от различных обеспечивающих систем.

Рис.7. Нормирующие кривые уровня шумов

Общий уровень шумов в хороших залах и студиях должен соответствовать международным нормам, т.е. быть ниже кривой NC-20, предпочтительнее NC-15. Соответствующие кривые допустимых шумов показаны на рисунке 7.

Общее акустическое впечатление от помещения, в котором прослушиваются музыка и речь, складывается из всех вышеперечисленных факторов.

Значения основных вышеуказанных параметров для трех залов, отнесенных экспертами к лучшим залам мира по качеству звучания музыки, приведены в таблице 1:

Название зала	Время реверберации ВР, с	Кол-во мест	Коэф. кросс-корреляции 1-КВСККр3	Ясность С80, дБ	Громкость СЗр3, дБ	Громкость на НЧ, СЗнч2, дБ	Разность времени прихода t1, мс
Мьюзик Верейнс-Саал, Вена	2,0	1680	0,71	-3,7	6,8	6,9	12
Симфонич. зал, Бостон	1,8	2625	0,65	-2,7	4,8	2,6	15
Консерт-Гебоув, Амстердам	2,0	2047	0,62	-3,3	5,8	5,1	21

Классификация лучших залов мира ,выполненная в работах Беранека по результатам измерений и субъективной оценки более 50 концертных залов, показала, что значения указанных выше объективных параметров существенно меняются при переходе от залов, отнесенных по общему звуковому впечатлению к высшей категории А, к залам третьей категории С. Усредненные значения параметров показаны в таблице 2:

Категория	1-КВСККр3	С80, дБ	СЗр3, дБ	СЗнч2, дБ	КНТ
А	0,66	-2,5	6,2	6,0	1,08
В	0,56	0,0	3,3	2,9	1,09
С	0,41	0,1	1,7	0,4	1,10

Способы, которыми обеспечиваются оптимальные значения объективных параметров, различаются в зависимости от назначения помещения: концертные залы, аппаратные звукозаписи, домашние помещения прослушивания и др.

Полученные результаты имеют существенное значение, поскольку они позволили выявить ряд объективных параметров, обеспечивающих устойчивую корреляцию с субъективной оценкой качества звучания в различных залах. К их числу относятся, наряду со временем реверберации ВР, отношение ранней энергии к реверберирующей С80, интервал времени между прямым звуком и первыми отражениями t1, меры громкости СЗр3, СЗнч2, коэффициент низких тонов КНТ, коэффициент кросс-корреляции КВСККр3 и др.

Измерение этих коэффициентов в студиях, концертных залах, аудиториях и др. может оказать существенную помощь звукорежиссерам в выборе и при модернизации помещений для звукозаписи, а также при моделировании соответствующих условий с помощью компьютерных технологий.