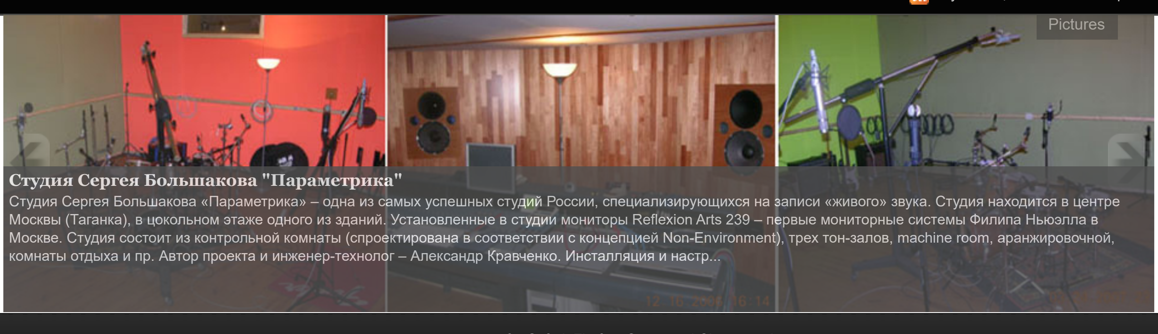
Публикации Комментарии



Стационарные и переходные частотные характеристики акустических систем

Кейт Холланд (Keith Holland) ISVR, Саутгемптонский университет, Великобритания

Филип Ньюэлл (Philip Newell) консультант, Испания

Питер Мэпп (Peter Mapp) Peter Mapp & Associates, Великобритания

1. Введение

Наверное, наиболее важной и общеизвестной характеристикой высококачественной акустической системы является её частотная характеристика. Большинство профессионалов и энтузиастов в мире аудио привыкли видеть в графиках частотных характеристик критерий оценки качества воспроизводимого системой звука. Этот факт вытекает из теории линейных систем, согласно которой отклик акустической системы на любой входной сигнал (в разумных пределах) может быть точно определён по одной лишь частотной характеристике.

Поэтому главная цель при разработке высококачественных акустических систем сводится к достижению такой частотной характеристики, которая бы равномерно охватывала как можно большую часть слышимого спектра частот. Цель эта вполне достижима на высоких частотах, чему свидетельством множество высокочастотных громкоговорителей, имеющих превосходную амплитудно-частотную характеристику на частотах гораздо выше предела слышимости человека; однако получение широкой амплитудно-частотной характеристики на низких частотах всегда приводило ко многим компромиссам в конструкции, а те, в свою очередь, – к ухудшению верности передачи звука.

Публикации [1,2] [1], в которых обсуждаются проблемы при создании студийных мониторов, приводят нас к выводу, что успех некоторых хорошо известных акустических систем этого типа отчасти обусловлен именно удачной настройкой воспроизведения низких частот. Данная статья построена на этих публикациях и рассматривает компромиссы, неизбежные при расширении нижней границы амплитудно-частотных характеристик мониторных систем, и соответствующие последствия этих компромиссов в конечном звучании этих систем. Рассматривается амплитудно-частотная характеристика многих имеющихся на рынке систем в диапазоне низких частот, проводится сравнение двух характеристик систем: их стационарной амплитудно-частотной характеристики – с одной стороны, и временной частотной характеристики (*взаимозависимость время/амплитуда/частота* – А.К.) – с другой.

2. Компромиссы в угоду низким частотам

В природе мы привыкли к тому, что излучение низкочастотных звуков в основном происходит от сравнительно больших предметов и объектов; ведь объекты малых размеров в качестве излучателей низких частот являются крайне неэффективными. Стало быть, для естественного воспроизведения низких частот громкоговоритель обязательно должен быть очень большим, или очень тихим. Принято считать, что частотный диапазон слуховой системы человека простирается от 20 Гц до 20 кГц, поэтому разумно было бы предполагать, чтобы отклик акустической системы простирался вниз до 20 Гц и ниже. Что ж, весьма целесообразно рассмотреть такую перспективу. В таблице 1 показаны длины волн ряда низкочастотных сигналов – как на уровне порога слышимости, так и при нормальной речевой громкости (60 фон). Обратите также внимание на крайние позиции смещения подвижных систем соответственно 6-дюймового (150mm) и 15-дюймового (340mm) громкоговорителей для того, чтобы звучание на расстоянии 2-х метров было на уровне речевой громкости, причём в условиях свободного поля (нет никаких препятствий и отражений от поверхностей помещения).

Частота (Hz)	Длина волны (m)	Порог (dB SPL)	Речевой уровень (dB SPL)	X (6″) (mm)	X (15″) (mm)
100	3,4	25	67	0,6	0,08
70	4,9	32	72	2	0,4
50	6,8	40	77	8	1,2
35	9,8	55	85	38	6
20	17,5	72	100	660	100

Таблица 1. Длина волны, уровень порога слышимости, уровень речевой громкости и соответствующее смещение диффузора громкоговорителя (X), необходимое для получения речевого уровня громкости на разных частотах.

Из таблицы 1 хорошо видно, что величина смещения подвижной системы громкоговорителя значительно увеличивается с уменьшением частоты воспроизводимого им звука. Воспроизведение звука на частоте 20 Гц шестидюймовым громкоговорителем практически нереализуемо, так как потребуется смещение его подвижной системы более чем на 25 мм только для того, чтобы звук воспроизводился на уровне порога слышимости. В то же время есть практический смысл в использовании 15-дюймового громкоговорителя, так как для воспроизведения звука на пороге слышимости потребуется смещение его подвижной системы всего лишь на 4 мм. Нужно заметить, что эти требования понижаются при использовании нескольких громкоговорителей [3] и/или если звукоизлучение происходит в помещении (*о проблеме взаимодействия громкоговорителей между собой и с помещением можно также узнать из статьи «Fold-down or melt-down», а также из 12-й главы книги Ф.Ньюэлла «Project-студии…»* – А.К.)

Вышеприведенные цифры свидетельствуют о том, что в стремлении улучшить воспроизведение самых низких частот мы неизбежно столкнёмся не только с проблемой необходимости использования громадных по размерам громкоговорителей, но также и с проблемой чрезмерно большой амплитуды смещения их диффузоров и подвижных систем. Во избежание этого отклик акустических систем в диапазоне самых низких частот принято ограничивать электромеханическим или электрическим способом. Это выглядит достаточно разумным, по крайней мере, для случаев воспроизведения большинства речевых и музыкальных сигналов, т.к. они содержат ничтожно мало информации на самых низких частотах. Для акустических систем с закрытым корпусом смещение диффузора на частотах ниже басовой резонансной частоты является практически постоянным. Ведь известно, что чем ниже резонансная частота закрытого корпуса акустической системы, тем большим может быть максимальное смещение подвижной системы и диффузора громкоговорителя, расположенного в ней. Поэтому если резонансная частота закрытого корпуса акустической системы выше, чем это необходимо для излучения самых низких частот, то тем самым автоматически уменьшается и диапазон смещения подвижной системы и диффузора громкоговорителя, а значит – и уровень воспроизведения на этих частотах.

Однако в случае с использованием фазоинверторных конструкций корпусов акустических систем такой чёткости определений уже нет. В этом случае смещение диффузора громкоговорителя уменьшается в области частоты настройки фазоинвертора, но при дальнейшем понижении частоты величина смещения диффузора начинает быстро увеличиваться до уровня, который имеет место при резонансе громкоговорителя в воздухе (без какого-либо акустического оформления); причём этот резонанс находится ниже, чем резонанс громкоговорителя в закрытом корпусе акустической системы.

Если предполагается использовать акустические системы на высоких уровнях, как это обычно и происходит с контрольными мониторами в студии, то очень важно, чтобы смещение диффузора громкоговорителя на нижних частотах удерживалось в пределах, не допускающих существенных искажений сигнала и/или повреждений громкоговорителя. Для этого в большинстве акустических систем большой мощности используются защитные фильтры верхних частот, которые отсекают в сигнале самые низкие частоты.

Таким образом, в конструкции низкочастотной акустической системы может использоваться несколько разных видов управления низкими частотами с целью добиться компромисса между необходимой отдачей на низких частотах и защитой громкоговорителей от чрезмерного смещения их подвижных систем. В таблице 2 перечислены некоторые варианты настройки низких частот, которые встречаются в современных акустических системах высокой мощности.

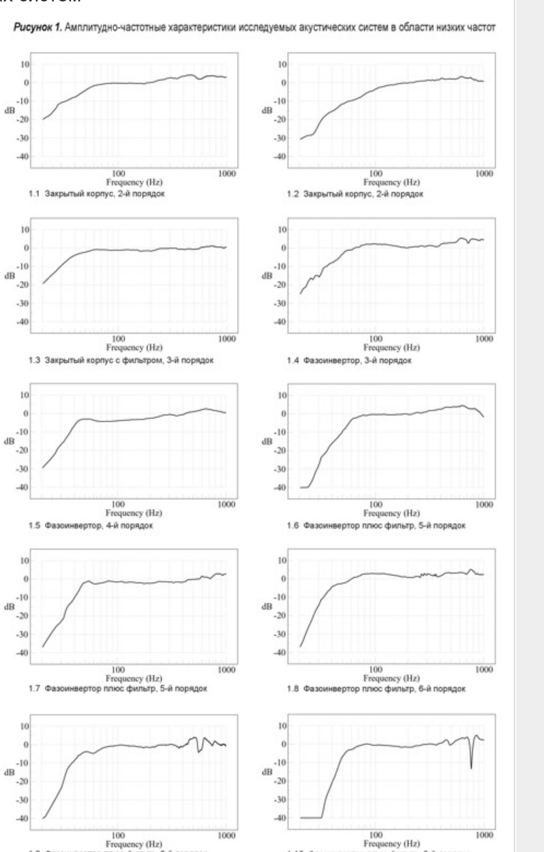
Описание	Порядок фильтра
Закрытый корпус	2
Закрытый корпус и фильтр 1-го порядка	3
Задемпфированный фазоинвертор	3
Демпфированный фазоинвертор с фильтром 1-го порядка	4
Фазоинвертор	4
Закрытый корпус и фильтр 2-го порядка	4
Демпфированный фазоинвертор с фильтром 2-го порядка	5
Фазоинвертор с фильтром 1-го порядка	5
Фазоинвертор с фильтром 2-го порядка	6

Таблица 2. Некоторые распространённые методы настройки низких частот акустических систем и соответствующие им порядки крутизны среза

Принимая во внимание различные характеристики настроек низких частот можно предположить, что две одинаковые по размерам акустические системы могут по-разному откликаться на различные сигналы; тогда очевидно, что их звучание также будет отличаться.

3. Низкочастотный отклик некоторых систем

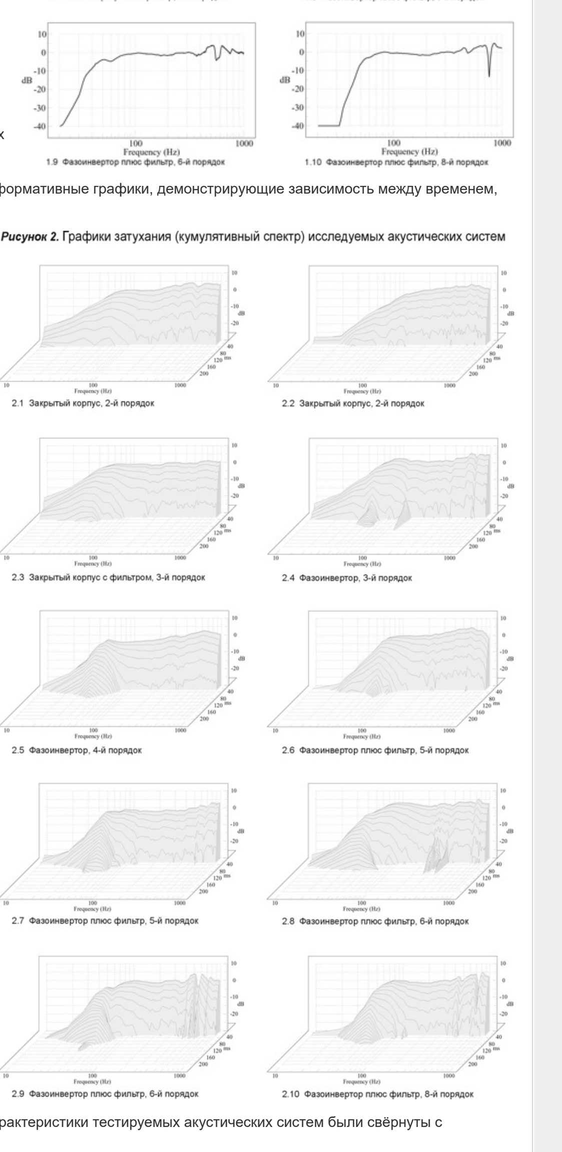
Рисунок 1. Амплитудно-частотные характеристики исследуемых акустических систем в области низких частот



В этом разделе будет рассмотрен низкочастотный отклик десяти различных акустических систем. Все модели схожи по габаритам, но зато в них используются самые разнообразные решения в плане воспроизведения низких частот. В некоторых из них используются пассивные кроссоверы; другие акустические системы являются активными – со встроенными усилителями, схемами защиты и т.д. Характеристики всех тестируемых акустических систем измерялись практически в идентичных условиях в большой безэховой камере ISVR. На графиках 1.1-1.10 продемонстрированы амплитудно-частотные характеристики десяти тестируемых акустических систем в частотном диапазоне от 20 Гц до 20 кГц, а также даны короткие комментарии в отношении способа их низкочастотного оформления. Все тестируемые системы пронумерованы, а наименования моделей и фирм-производителей – опущены. Несмотря на приблизительно одинаковые габариты, объём низких частот у каждой из десяти акустических систем сильно отличается. Например, у систем №1 и №3 спад –10 дБ происходит на частоте 30 Гц; в то же время система №2 имеет тот же спад –10 дБ уже на частоте 55 Гц.

Из графиков на рисунке 1 можно сделать вывод, что отклик всех тестируемых систем будет создавать похожие уровни на частоте среза низких частот или выше её. Однако не следует забывать: различия в низкочастотном оформлении акустических систем приводят к различиям их фазовых характеристик, причём даже на частотах, которые находятся выше частоты среза. На графиках 2.1-2.10 продемонстрированы характеристики затухания2 тех же моделей акустических систем. Такие графики получают путём изображения последовательности коротких преобразований Фурье, взятых от отдельных участков импульсной характеристики акустических систем через равные промежутки времени. Получаются очень информативные графики, демонстрирующие зависимость между временем, частотой и уровнем.

Рисунок 2. Графики затухания (кумулятивный спектр) исследуемых акустических систем

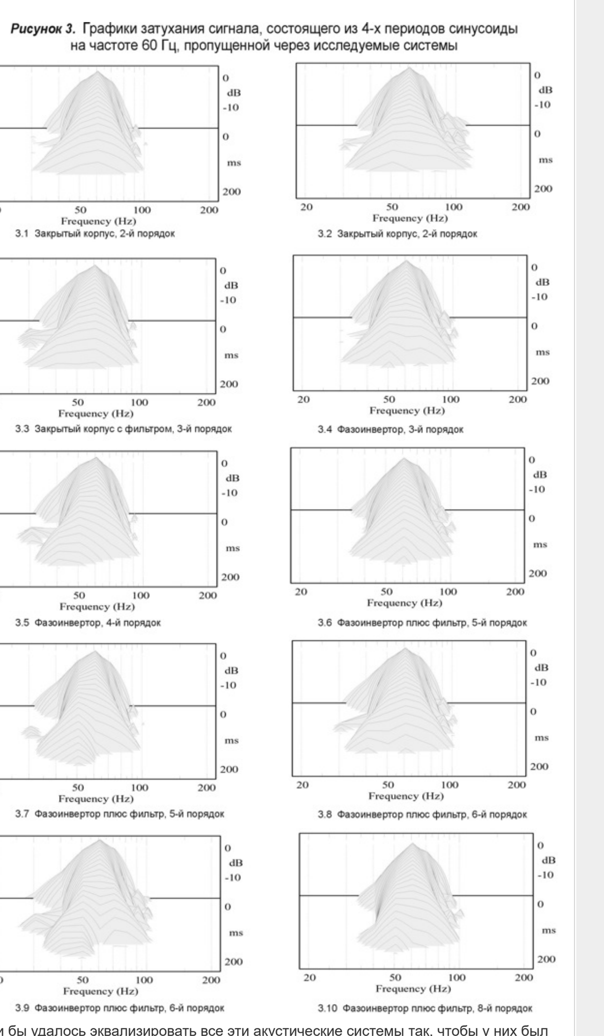


Характеристики затухания на рисунке 2 показывают, что системы с более высоким порядком среза низких частот склонны к «зависанию» или «звону» на частотах, которые находятся в районе частоты среза. В то же время, в акустических системах с меньшим порядком среза такой эффект практически отсутствует. Воспроизведение импульсных сигналов поможет обнажить этот феномен и сделать его слышимым.

По определению, импульсные сигналы являются кратковременными и имеют широкий диапазон частот. Атака и затухание музыкальной ноты на частоте, которая находится вблизи частоты среза акустической системы, возбуждают «звон» или некоторое «зависание» этой ноты, что, как выясняется, заставляет слышимую ноту менять свою частоту на частоту этого «звона». Это может вызывать субъективный критицизм типа «бас в одну ноту», который уже успел прижиться в отношении некоторых моделей. Чтобы продемонстрировать это, на графиках 3.1-3.10 показаны характеристики затухания при воздействии на каждую систему 4-х периодов колебания на частоте 60 Гц. Эти графики были получены в результате свёртки этой тональной посылки с импульсной характеристикой каждой из тестируемых акустических систем с последующим составлением графиков затухания, аналогичных показанным на рисунке 2. На графиках чётко прослеживается распределение частот в начале и в конце действия тона, равно как и сдвиги по частоте по мере затухания тона у акустических систем с более крутым низкочастотным срезом.

Подобно тому, как «звон» влияет на слышимую частоту атаки, а также отчасти и на затухание ноты, он может вообще маскировать многие детали низкочастотного сигнала. Для исследования этого явления импульсные характеристики тестируемых акустических систем были свёрнуты с модулированным шумовым сигналом.

Рисунок 3. Графики затухания сигнала, состоящего из 4-х периодов синусоиды на частоте 60 Гц, пропущенной через исследуемые системы



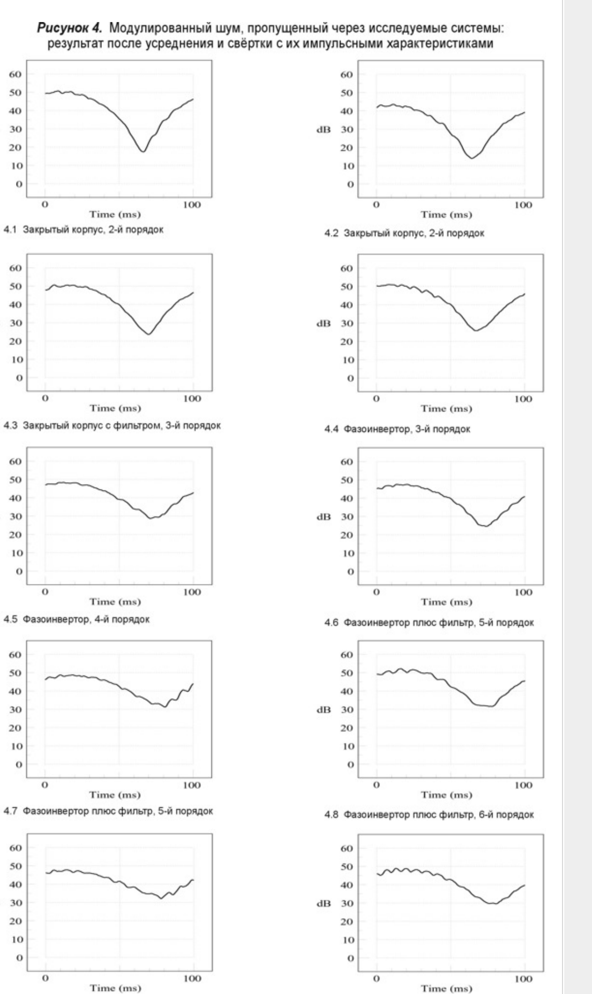
Этот сигнал состоит из псевдослучайного шума с октавной шириной полосы с центром на частоте 50 Гц (т.е. приблизительно между 35 и 70Гц), который амплитудно модулирован синусоидой с частотой 10 Гц. На графиках 4.1-4.10 показаны результаты усреднения возведённого в квадрат спектра от 100 периодов такого сигнала длительностью 100мс после свёртки с характеристиками систем. Этот процесс очень напоминает метод, используемый при измерении индексов передачи речи (STI); чем меньше на графике модуляция полученной огибающей, тем больше акустическая система проявляет склонность к маскированию динамики низкочастотной информации.

Из рисунка 4 можно увидеть, что системы довольно сильно отличаются по способности воспроизводить модуляции шума. Глубина модуляции для этих систем меняется от 32дБ (или 40:1) у акустической системы №1 до 14 дБ (5:1) у системы №9. Отчётливо просматривается общая тенденция: глубина модуляции уменьшается по мере увеличения крутизны среза нижних частот.

4. Эквализация акустических систем

Некоторые из систем в этой группе имеют встроенные электронные кроссоверы и усилители, которые могут включать в себя электронную фильтрацию для настройки низкочастотных характеристик, такую, как упомянутые ранее защитные обрезные фильтры верхних частот. Следовательно, справедливо было бы ожидать, что различия в отклике на импульсные сигналы исчезли бы, если бы удалось эквализировать все эти акустические системы так, чтобы у них был одинаковый срез низких частот.

Рисунок 4. Модулированный шум, пропущенный через исследуемые системы: результат после усреднения и свёртки с их импульсными характеристиками



Вопрос возможности и успешности эквализации акустических систем имеет более широкий смысл, чем просто получение широкой и плавной амплитудно-частотной характеристики. Рассмотрим пару мониторов, которые используются в студии для контроля записи бас-бочки и бас-гитары. Количество низких частот в готовом миксе будет зависеть от низкочастотных характеристик этих мониторов. При мастеринге записи мастеринг-инженер корректирует все недостатки низких частот при помощи электронной эквализации. Что ж, это вполне справедливо, за исключением того факта, что баланс уровней бас-бочки и бас-гитары в миксе будет зависеть от переходной характеристики мониторов, которые использовались до мастеринга (т.е. на этапе сведения). К примеру, монитор, имеющий расширенные низкие частоты, но не самую лучшую переходную характеристику, может привести к созданию микса с выделенной бас-бочкой, так как на этом мониторе протяжные ноты бас-гитары будут звучать громче и обманывать звукоинженера. Эквализацией на стадии мастеринга невозможно изменить баланс уровней бас-бочки и бас-гитары, и от этого страдает вся фонограмма. Успех или поражение этой пост-эквализации зависит от того, насколько поддаются эквализации сами мониторы, используемые при записи и сведении.

В общем и целом фазовую характеристику акустических систем можно представить в виде двух характеристик: минимально- и неминимально-фазовой составляющих. Применение обычного фильтра реального времени (*аналогового или другого, который способен моделировать естественные фильтры без специальных фазовращателей* – О.Н.) для эквализации амплитудно-частотной характеристики системы автоматически приведёт к эквализации минимально-фазовой составляющей фазовой характеристики, но не затронет неминимально-фазовую составляющую. Полную (*или комплексную* – О.Н.) частотную характеристику разделить на две составляющие можно так:

- на минимально-фазовую характеристику, которая содержит амплитудно-частотную характеристику от полной частотной характеристики и минимальную фазовую составляющую;
- на неминимально-фазовую характеристику, содержащую амплитудно-частотную характеристику в виде прямой горизонтальной линии на всех частотах и амплитудой, равной единице, и неминимальной фазовой составляющей.

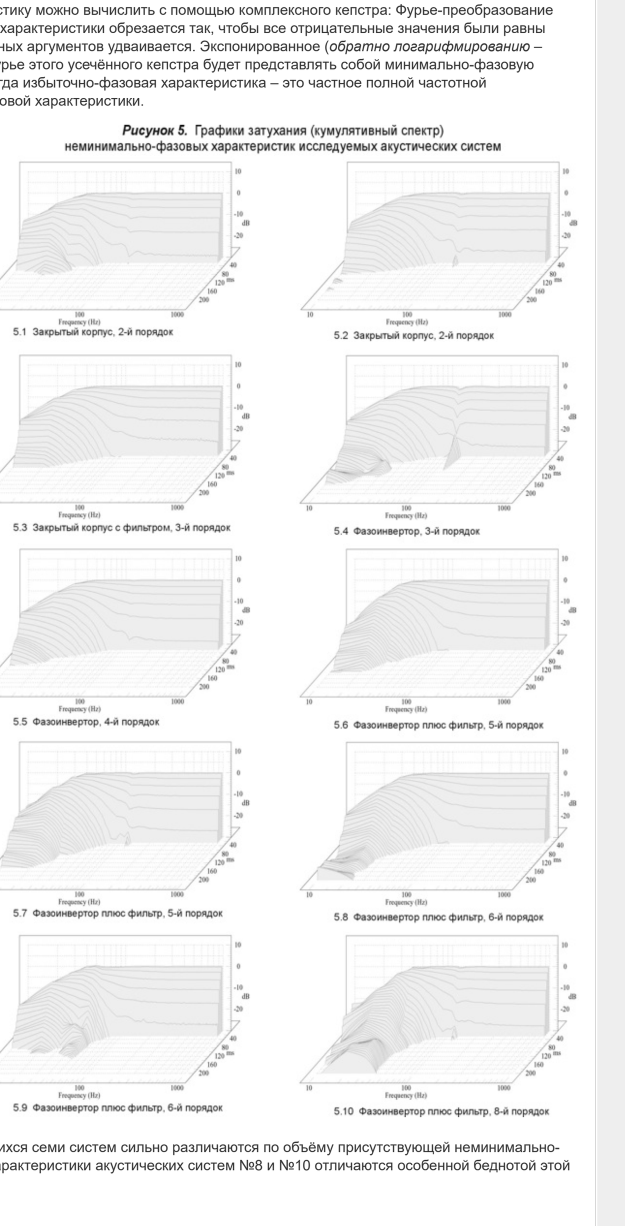
Тогда полная частотная характеристика представляет собой произведение 2-х компонент:

$H(\omega) = |H(\omega)| \exp\{j\Theta_m\} \exp\{j\Theta_e\}$,

где Θ_m и Θ_e – минимальная и неминимальная фазовые составляющие соответственно.

Минимальную фазовую характеристику можно вычислить с помощью комплексного кепстра: Фурье-преобразование логарифма амплитудно-частотной характеристики обрезается так, чтобы все отрицательные значения были равны нулю, а значение всех положительных аргументов удваивается. Экспонированное (*обратно логарифмированию* – О.Н.) обратное преобразование Фурье этого усечённого кепстра будет представлять собой минимально-фазовую составляющую характеристики. Тогда избыточно-фазовая характеристика – это частное полной частотной характеристики и минимально-фазовой характеристики.

Рисунок 5. Графики затухания (кумулятивный спектр) неминимально-фазовых характеристик исследуемых акустических систем



Неминимально-фазовая характеристика представляет собой полную частотную характеристику системы после эквализации «совершенным» фильтром реального времени; стало быть, она является мерилом успеха такой эквализации (*т.е. показывает, насколько выпрямится фазочастотная характеристика системы после применения совершенного эквалайзера* – О.Н.) Поскольку неминимально-фазовая характеристика простирается линейно до 0 Гц, а также учитывая ненадёжность измерений реальных характеристик на самых низких частотах, есть необходимость в приложении к характеристикам фильтра верхних частот. Поэтому в качестве характеристики совершенной акустической системы был выбран фильтр верхних частот 2-го порядка с частотой среза 20 Гц. На графиках 5.1–5.10 продемонстрированы характеристики затухания отфильтрованных этим фильтром неминимально-фазовых характеристик всех десяти тестируемых акустических систем.

Характеристики затухания акустических систем №1-№3 немногим отличаются от характеристики самого фильтра верхних частот с частотой среза 20 Гц (которая здесь не показана), что даёт основания предполагать возможную успешную эквализацию данных акустических систем. Это означает, что пост-эквализация микса, созданного на этих мониторах, будет наверняка успешной. Характеристики оставшихся семи систем сильно различаются по объёму присутствующей неминимально-фазовой составляющей, причём характеристики акустических систем №8 и №10 отличаются особенной беднотой этой характеристики.

5. Прочие обсуждения

Представленные выше результаты настойчиво указывают на то, что само по себе расширение амплитудно-частотной характеристики системы в сторону низких частот не является достаточной мерой для решения проблемы их точного воспроизведения. Звучание акустической системы, обладающей возможностью воспроизводить более низкие частоты, но имеющей на них большую крутизну спада амплитудно-частотной характеристики, может впечатлять слушателей сильнее и казаться полнее, насыщеннее, чем звучание акустической системы с небольшой крутизной спада и более высокой частотой раздела (среза).

В любом случае, изложенные материалы приводят к интересному выводу. Акустическая система с более пологим спадом и более высокой частотой среза имеет, судя по всему, более точный отклик на широкое разнообразие входных сигналов. Совершенно очевидно, что акустические системы №1, №2 и №3 демонстрируют намного лучшие переходные характеристики по сравнению с другими системами. Интересно также обратить внимание на то, что конструкция этих трёх акустических систем представляет собой конструкцию с закрытым корпусом, в то время как остальные акустические системы имеют корпуса фазоинверторного типа. Сравнивая две модели, имеющие акустическое оформление 3-го порядка, мы видим, что фильтр 1-го порядка, приложенный к системе №3, не ухудшает её переходной характеристики так сильно, как одно лишь применение демпфированного фазоинвертора в системе №4.

Одним из фактов, не затронутых в данной статье, остаётся объём присущих различным акустическим решениям нелинейных искажений. Большинство причин нелинейных искажений, присущих акустическим системам на низких частотах – вызванных, например, проблемами подвижной системы громкоговорителя или взаимодействием магнита и катушки – связаны со смещением диффузора; с другой стороны, фазоинверторное решение всегда ценилось за способность сокращать это смещение диффузора на частоте настройки фазоинвертора и около неё. В том случае, когда необходимы высокие уровни воспроизведения без заметных нелинейных искажений с использованием акустических систем малых размеров – фазоинверторное решение, несомненно, является разумной и практичной рекомендацией. Но если основное требование к системе – высокая верность воспроизведения, например, для контроля качества записи, – тогда предпочтительней оказывается акустическая система с закрытым корпусом и, если нужно, с использованием электронного фильтра для улучшения низкочастотных характеристик. Здесь важно заметить, что вопрос слышимости низкочастотных искажений остаётся объектом дальнейших исследований.

Другой важный аспект – это низкочастотные характеристики различных акустических систем при работе помещениях. Частоты, ниже которых в комнате не существует гармонических резонансов – так называемая «зона давления» – находятся в зависимости от размеров комнаты. В условиях абсолютно герметичной, закрытой комнаты давление воздуха прямо пропорционально смещению диффузора, а не ускорению, как это происходит в свободном поле. Выше было сказано, что смещение диффузора в закрытом корпусе на частотах ниже резонанса не зависит от частоты. Отсюда следует, что акустическая система с закрытым корпусом, помещённая в герметично закрытую комнату, будет иметь прямую амплитудно-частотную характеристику на низких частотах, а частоту среза такой системы желательно настраивать в соответствии с размерами комнаты.

6. Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать ряд интересных выводов.

- Похожие по размерам акустические системы могут быть сделаны на основе разного низкочастотного оформления.
- Всегда имеет место важный компромисс между отдачей на низких частотах и максимальным смещением диффузора.
- Системы, имеющие низкочастотное оформление низших порядков, дают более точное воспроизведение переходных процессов, чем имеющие оформление высших порядков.
- Системы, имеющие низкочастотное оформление низших порядков, лучше подготовлены к эквализации, чем имеющие оформление высших порядков.
- Фазоинверторное оформление ухудшает переходную характеристику акустических систем на низких частотах.
- Закрытые корпуса отличаются превосходной переходной характеристикой по сравнению с эквивалентными фазоинверторными моделями, но, возможно, за счёт увеличения искажений на высоких уровнях громкости.

7. Литература

1. P R Newell, K R Holland & J P Newell, “The Yamaha NS10: Twenty Years a Reference Monitor, Why?”, PROC IOA 28(8), 2001, 29-40.
2. P R Newell, K R Holland & P Mapp, “The Perception of the Reception of a Deception”, PROC IOA 29(8), 2002, (CD Only).
3. K R Holland & P R Newell, “Mutual Coupling in Multi-Channel Loudspeaker Systems”, PROC IOA, 19, 1997.

Перевод Олега Науменко

Техническое редактирование Александра Кравченко

Popularity: 9% [?]

Рассказать другим:

Отзывов нет к “Стационарные и переходные частотные характеристики акустических систем”

ВАШ ОТЗЫВ:

Имя (обязательно):

Почта (обязательно, не публикуется):

Сайт:

Сообщение (обязательно):

XHTML: Вы можете использовать следующие теги: `<a href="" title=""> <abbr title=""> <acronym title=""> <b> <blockquote cite=""> <cite> <code> <del datetime=""> <em> <i> <q cite=""> <strike> <strong>`

МЕТКИ

AFS Dolby Electromotive Laboratories Maxi Sound Neva Audio Park Audio Reflexion Arts SSL surround VI Sound Westlake Audio Большаков Киношита Молдова Музычи НТВ-Кино Наше время Ньюэлл Параметрика Хидли Шоу-Мастер акустические измерения вебинар домашний кинотеатр звуковая система звукоизоляция каменная комната книга коммутация контрольная комната кроссовер мастеринг мебель мониторинг мониторная система площадь поддельные мониторы потолок проектирование студия тон-зал усилитель FAQ (10) мнение (15) новости (83)

Облако тегов плагина WP Cumulus для "WordPress" требует для просмотра Flash Player 9 или выше.

КАЛЕНДАРЬ

Октябрь 2020						
Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Вс
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

« Янв

НОВОЕ НА САЙТЕ

Об измерениях
Проектирование студии. На что обратить внимание?
Electromotive Laboratories!
Вебинар по контрольным комнатам
Музычи. Студия «А»

НАШИ АДРЕСА

Киев, Украина
тел.: +380 (67) 4302480
факс: +380 (44) 4280998
e-mail: vita46@gmail.com
skype: kravchenko.alex

РУБРИКИ

FAQ (10)
мнение (15)
новости (83)

АРХИВЫ

Январь 2020 (1)
Июль 2019 (1)
Август 2018 (1)
Январь 2018 (1)
Ноябрь 2017 (1)
Октябрь 2016 (1)
Август 2016 (1)
Ноябрь 2015 (1)
Октябрь 2015 (1)
Сентябрь 2014 (1)