

Некоторые характеристики линейно-фазных громкоговорителей

Составлено Богданом Рачинским, март 2013 г.

Источник: https://www.linkwitzlab.com/Attributes_Of_Linear_Phase_Loudspeakers.pdf

Повышение чёткости рисунков и редактирование теста с выделением - Georgi.

Перевод с применением переводчика сайта: https://translate.yandex.ru/?source_lang=en&target_lang=ru

Вступление

“...Ранние психоакустические исследования показали, что слуховая система человека нечувствительна к различиям в относительных фазах спектральных составляющих многокомпонентного звука. Однако исследования, проведенные за последние два десятилетия, свидетельствуют о том, что слушатели могут обнаруживать фазовые различия между компонентами стимула, которые взаимодействуют в пределах одного слухового фильтра.

Наиболее впечатляющая демонстрация чувствительности к фазовым различиям определяется фазовым эффектом маскировки, то есть изменением эффекта маскировки более чем на 20 дБ, вызванным комплексом гармоник при изменении фазовых соотношений между его компонентами. Эта маскирующая парадигма широко используется для получения психоакустической оценки фазовой реакции улитки....”

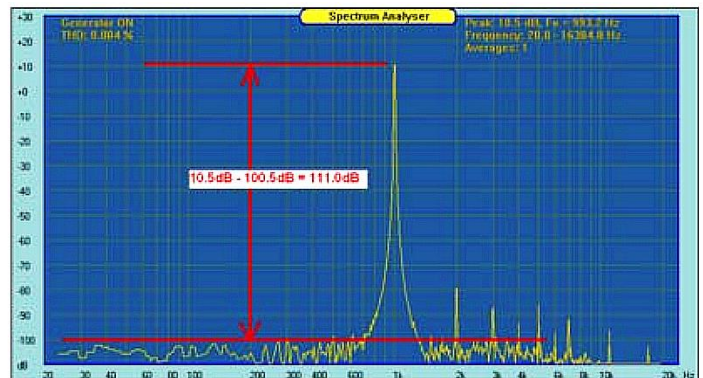
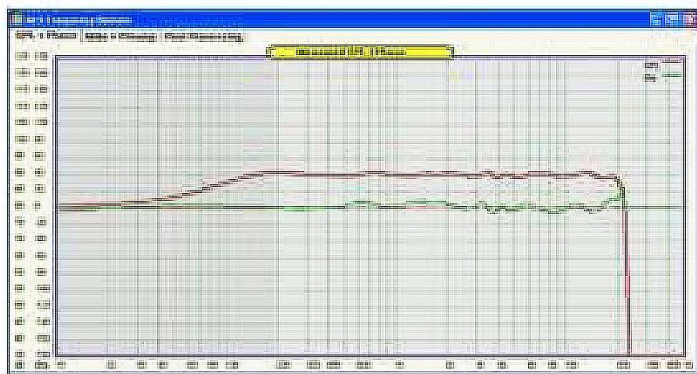
Должен признаться, я не знал о вышеупомянутом исследовании и его результатах. Я изучал Интернет около года, прежде чем наткнулся на вышеприведенную простую информацию. Этой информации есть и гораздо больше.

Теперь я понял, что существуют исследования и результаты, которые ясно указывают на то, что вместо вопроса “слышно ли фазовое искажение?”, нам следует задать вопрос “как проявляется фазовое искажение?”.

По наивности и без какого-либо предварительного опыта в том, как я должен это делать, я провел собственные тесты на прослушивание, сравнив звучание традиционных низкочастотных динамиков со звучанием линейно-фазных динамиков. Я говорю здесь об акустическом линейно-фазном динамике. Во время моих коротких первоначальных тестов на прослушивание линейно-фазных динамиков я был удивлен тем, насколько безразличен моему уху линейно-фазовый режим. Правильно ли я поступил тогда?. Этот результат, безусловно, потребовал дальнейшего изучения на гораздо более разнообразном материале для прослушивания.

Особенности прослушивания

Традиционно, когда я оцениваю качество звука, воспроизводимого моим аудиовоспроизводящим оборудованием, я уделяю особое внимание тональному балансу (частотной характеристике), динамике звука (SNR), минимальному уровню остаточного шума (не слышно), искажениям (не слышно). Интересно, что все вышеперечисленные характеристики могут быть оценены и визуализированы в частотной области. Это был просто самый простой способ прослушать звук и оценить то, что я слышал, но теперь я понимаю, что рассматривал только стационарный анализ в частотной области - смотрите фотографии ниже.



Frequency response, distortion, dynamics and noise floor – all in frequency domain. (Частотная характеристика, искажения, динамика и уровень шума – все это в частотной области.)

Я проводил один и тот же анализ снова и снова в течение многих лет и постепенно привык к этому ритуалу. Это было легко сравнить с результатами измерений, поэтому я чувствовал себя комфортно, поскольку могу соотнести свои измерения с тем, что я легко слышу (или

не слышу).

В последнее время для меня многое изменилось. Я наткнулся на простую статью, http://www.audiophilerecordingstrust.org.uk/articles/speaker_science.pdf, которая вдохновила меня на более тщательный анализ моих тестов на аудирование.

Я повторно изучил информацию из других интернет-источников и в результате пришел к выводу, что мои тесты на прослушивание были лишь отправной точкой для того, что я должен был прослушать при изучении линейно-фазных громкоговорителей. Проще говоря, мне нужно было значительно расширить оценку временных характеристик громкоговорителя в моих привычках прослушивания. В кратких выводах моих первоначальных тестов на прослушивание, представленных в http://www.bodziosoftware.com.au/Home_Theatre_Conclusions.pdf я указал одно заметное отличие – я чувствовал себя ближе к сцене/музыкантам. Это было скорее случайное и неожиданное впечатление, на которое я не обратил особого внимания. Но это действительно относится к временным характеристикам громкоговорителя, а не к частотной области.

Да, похоже, я осветил только половину того, на что мне следовало обратить внимание. И статья, упомянутая выше, сделала это поразительно ясным для меня.

Новые привычки к прослушиванию

Дальнейшая часть этой статьи - моя грубая попытка обобщить звуковые характеристики линейно-фазных громкоговорителей. Это то, на что вам нужно обратить внимание при оценке линейно-фазных громкоговорителей. Я не претендую на то, что список является полным, но это только начало.

Это явно указывает на временные характеристики громкоговорителя, и это то, к чему многие из нас (до недавнего времени, включая меня) не привыкли. Я просто не знал, к чему прислушиваться.

Ниже я привожу “номинированные атрибуты”, указывающие источник, за которыми следует краткое описание из первоисточника. 1. Более плотные басы 2. Более широкая и глубокая звуковая сцена (довольно драматичная) Источник: <http://redspade-audio.blogspot.com.au/2012/03/bathurst-2011-audio-event-of-year.html>

Демонстрация DEQX “...Главным событием этого года стала демонстрация возможностей DEQX. Это произошло в результате обсуждения моих сравнений с активным прослушиванием crossover, в ходе которых небольшая группа не смогла услышать никаких улучшений с DEQX. Терри утверждал, что мы приглушили DEQX и помешали ему показать, на что он способен. Это, конечно, правда. Мы хотели протестировать только качество звука и в связи с этим не нашли причин тратить больше по сравнению с более дешевыми вариантами. Однако Терри подготовил демонстрационную версию, в которой были созданы два профиля на DEQX. Один из них был ограничен вычислительной мощностью miniDSP и DCX. Другой позволял DEQX демонстрировать свои возможности. В частности, было разрешено корректировать фазовую и групповую задержку.

Затем мы протестировали это вслепую с мгновенным переключением, не зная, что именно звучит. Я был первым, кто сел в кресло и сделал демонстрацию, и довольно скоро мне не нужно было объяснять, что к чему, потому что разница была очевидна. В DEQX были замечены изменения: гораздо более плотные басы, более широкая и глубокая звуковая сцена (довольно впечатляющая). У обоих был базовый уровень синхронизации с цифровыми задержками. Оба были близки по уровню и отклику. Эти различия были связаны с коррекцией групповой задержки. По сравнению с этим, без него звук был плоским и почти безжизненным. Затем я наблюдал, как другие участники прослушивали демо, и каждый из них замечал те же различия, отличающиеся только количеством времени, затраченного на то, чтобы озвучить услышанное...”

Лично я могу засвидетельствовать, что в линейно-фазовом режиме басы становятся более плотными. Я использую большие 18-дюймовые сабвуферы в вентилируемом корпусе, настроенные на частоту 20 Гц. При воспроизведении импульсивных звуков в режиме минимальной фазы сабвуферы пропускают, а затем добавляют и продлевают звучание резких, похожих на импульсы сигналов. К сожалению, эта нежелательная вялость слышна в режиме минимальной фазы низкочастотных импульсивных сигналов. http://www.bodziosoftware.com.au/LP_MP_Subwoofer_Tests.pdf Однако в линейно-фазовом режиме удар по-прежнему получается глубоким, но плотным, без “остаточных звуков”.

3. Реализм

Источник: http://www.audiophilerecordingstrust.org.uk/articles/speaker_science.pdf

(Эту статью обязательно нужно прочитать целиком)

"... Еще одна область, в которой громкоговорители пользуются дурной славой, - это пренебрежение временными рамками. Традиционное мнение состоит в том, что все, что имеет значение, - это

способность воспроизводить непрерывные синусоидальные волны в диапазоне человеческого слуха. Очень небольшое количество исследований и размышлений покажет, что это ошибочное мнение. Частотная характеристика важна, но не настолько, чтобы достичь ее. В идеале реакция должна быть в ущерб реалистичности.

Устаешь слышать, что "фаза не имеет значения" в аудио или "ухо не слышит фазу". Это устаревшие взгляды, к которым давным-давно пришли в результате неудачных экспериментов и которые расходятся с результатами недавних психоакустических исследований.

Ухо работает двумя различными способами, между которыми оно перемещается, чтобы получить наилучший результат при соблюдении фундаментальных ограничений, обусловленных неравенством Гейзенберга. То неравенство Гейзенберга гласит, что с увеличением частотного разрешения увеличивается и временное разрешение вниз и наоборот.

Реальные звуки не являются непрерывными, а содержат начальные переходные звуки. Во время таких переходных звуков ухо работает во временной области. Прежде чем слушатель осознает звук, анализ во временной области сравнивает время поступления переходного сигнала в оба уха и определяет направление. После создания переходного сигнала реальным источником звука звуковое давление должно выровняться до уровня окружающей среды. Скорость, с которой это происходит, зависит от физического размера источника.

Ухо, снова действуя во временной области, может измерить время релаксации и оценить размер источника. Таким образом, перед восприятием любого звука ментальная модель получает информацию о местоположении и размере источника звука. Фактически, это было первое использование слуха как средства восприятия угрозы для выживания.

Частотный анализ слуха, согласующийся с эволюцией речи и музыки, появился гораздо позже. После анализа начального переходного процесса ухо переключается на работу в частотной области для анализа тембра. В этом режиме использования для стационарных сигналов фаза не очень важна.

Однако распознавание начального переходного процесса и времени ослабления имеют решающее значение для реалистичности. Все в системе воспроизведения звука, что искажает начальный переходный процесс, является вредным. В то время как аудиоэлектроника может точно обрабатывать переходные процессы, традиционные громкоговорители не позволяют измерять как переходные процессы, так и время релаксации.

Недостаточное внимание к временной области в сетях с перекрестным подключением приводит к тому, что громкоговорители воспроизводят одиночный звук в виде последовательности шагов, по одному для каждого устройства в разное время..."

4. Глубина 5. Разрешение 6. Разделение атмосферы

Источник: http://www.bostonaudiosociety.org/bas_speaker.htm

<http://www.bostonaudiosociety.org/pdf/bass/> Бостонское аудиосообщество придерживается интересного мнения о динамиках с временной коррекцией.

“... Если динамика от стереодинамиков отличается по времени сдвига более чем на тридцать миллионных долей секунды (или, возможно, на более высокую допустимую величину для критически настроенных слушателей), стереоизображение будет заметно размытым.

Для сохранения мельчайших деталей в стереополе два динамика должны "говорить" друг с другом на всех частотах. Это, попросту говоря, может быть основным преимуществом громкоговорителей с "линейной фазой" или "временной коррекцией".

Производители, стремящиеся свести к нулю временную дисперсию громкоговорителей, возможно, также заботятся о том, чтобы не было существенных различий во времени распространения сигнала между двумя громкоговорителями в стереопаре. Таким образом, тонкая информация о времени в стереозаписи точно сохраняется и передается слушателю в неизменном виде...” Они также указывают на некоторые преимущества таких громкоговорителей:

1. Глубина.

Это может удивить некоторых слушателей, когда они впервые услышат это, поскольку во многих выступлениях (и записях) наблюдается лишь общий разброс голосов слева направо. Но изначально понятие "стерео" подразумевало трехмерное звучание, в котором голоса или инструменты могут быть локализованы на различном видимом расстоянии от слушателя, а также в различных боковых положениях. Слушатели динамиков, настроенных по времени, постоянно сообщают, что слышат стереоизображение необычной глубины.

2. Разрешение.

Стереοизοбразжение воспроизводится точно, каждый голос или инструмент имеет свои особенности. расположение и ширина. В сложных источниках звука, таких как симфонический оркестр, отдельные инструменты могут быть воспроизведены с неожиданной четкостью. Как гласит старое клише: "Я слышу детали, о существовании которых в записи и не подозревал. "Некоторые слушатели ошибочно объясняют улучшенное разрешение деталей более точной характеристикой переходных процессов, но лучшее определение деталей - это просто результат уменьшения смешивания в стереοизοбразжении.

3. Разделение атмосферы.

С громкоговорителями, стереοизοбразжение которых слегка размыто из-за изменения времени, любое атмосфера зала или реверберация в записи, как правило, слегка смешиваются со звуками инструментов, придавая этим звукам особую окраску. Следовательно, при использовании таких динамиков записи с близким расположением микрофонов, как правило, звучат лучше из-за их отчетливо выраженного звучания. Но благодаря динамикам с временной коррекцией окружающая среда воспринимается как отдельный звук, и в записях можно наслаждаться большей атмосферой зала ..."

7. Межканальная точность воспроизведения звука.

Источник: <http://www.cirrus.com/en/pubs/whitePaper/DS668WP1.pdf>

".... 5. Слышимость фазовых искажений

Одна из проблем, связанных с различимостью фазы, заключается в том, что обсуждение, как правило, рассматривается как отдельная тема, в то время как на самом деле следует рассматривать две различные ситуации. Различимость фазовых искажений должна оцениваться следующим образом:

1) Межканальные фазовые искажения. Характеризуется различиями в фазовой характеристике между двумя или более каналами.

2) Внутриканальное фазовое искажение. Характеризуется нелинейной фазовой характеристикой внутри канала при условии, что фазовая характеристика согласована между всеми каналами в системе (т.е. межканальное фазовое искажение равно 0 мс)

6. Межканальное фазовое искажение

Мы используем соотношение амплитуды и фазы звуков, воспринимаемых нашими ушами, чтобы определить источник звука. Современные аудиосистемы используют этот параметр для создания так называемого визуального эффекта, или ощущения того, что звучит инструмент или вокал из места, которое отличается от фактического расположения динамиков.

Слышимые эффекты межканальных фазовых искажений можно легко продемонстрировать, просто поменяв местами подключения динамиков на одном канале стереосистемы, настроенной должным образом. Ухудшение качества изображения сразу заметно даже тем, у кого нет развитого слуха. Конечно, этот тест довольно впечатляющий, и межканальное фазовое искажение на 180 градусов не является показателем стандартной работы, но оно демонстрирует потенциальные последствия. В результате этого теста вам было бы трудно найти кого-то, кто бы утверждал, что межканальные фазовые искажения в 180 градусов допустимы, но где между этими двумя крайностями находится порог слышимости?

Том Холман сообщает [10] что в его лабораторной среде в Университете Южной Калифорнии, где преобладает прямой звук, слышен временной сдвиг от канала к каналу, равный одному периоду дискретизации на частоте 48 кГц. Это соответствует 20 мкс межканальных фазовых искажений во всем звуковом диапазоне. Холман [10] также упоминает, что "разница в смещении изображения между входами для левого и правого уха составляет 10 мксек".

7. Внутриканальное фазовое искажение

Напомним, что мы используем различия в амплитуде и фазе сигнала для локализации или определения источника звука, и могут быть слышны относительно небольшие межканальные фазовые искажения. Но как реагирует наш слух, когда каждый канал в многоканальной системе подвергается нелинейной фазовой характеристике, но фазовая характеристика согласована между всеми каналами?

Дуглас Прейс [11] провел обширный обзор существующей литературы, а опыт и исследования Тома Холмана [10], проведенные во время его работы в Университете Южной Калифорнии, дают нам интересное представление об этом явлении. Оба сообщают, что порог слышимости зависит от частоты, которая коррелирует со всеми другими порогами слышимости.

В лабораторных условиях при использовании тестовых сигналов и наушников исследования показали, что человеческое ухо чувствительно к разнице фаз внутри канала, составляющей 0,25 мс [8]

или $\pm 0,5$ мс [9] в среднем диапазоне, при этом порог увеличивается на более высоких и более низких частотах. В Прейсе говорится, что “указанные допуски ... не применимы непосредственно к речевым или музыкальным сигналам, излучаемым громкоговорителями в условиях реверберации. Скорее всего, пороговые значения восприятия для этих условий было бы более чем в два раза больше, чем показано на рисунке”. По сути, полученные данные свидетельствуют о том, что для высоких частот при качественном воспроизведении музыки или речи в реверберационной среде внутриканальное фазовое искажение в 1 мс не слышно подготовленному слушателю. Обратите внимание, что это пороговое значение является относительно консервативным и все же на два порядка больше, чем для межканальных фазовых искажений!.....”

8. Эффект приоритета или “закон первого волнового фронта”.

Источник: http://en.wikipedia.org/wiki/Precedence_effect

“..... Эффект приоритета или закон первого волнового фронта является бинауральным психоакустическим эффектом. Когда за звуком следует другой звук, разделенный достаточно короткой временной задержкой (ниже порога эха слушателя), слушатели воспринимают единый слитный слуховой образ; его воспринимаемое пространственное местоположение определяется местоположением первого поступающего звука (фронт первой волны). Запоздывающий звук также влияет на воспринимаемое местоположение. Однако его эффект подавляется первым поступающим звуком..... Эффект приоритета проявляется, если последующие волновые фронты появляются от 2 до 50 мс позже, чем первый волновой фронт. Эффект приоритета важен для слуха в закрытых помещениях. С помощью этого эффекта можно определить направление на источник звука (например, на динамик) даже при наличии отражений от стен....”

9. Важность фазы в переходных процессах

Источник: <http://sound.media.mit.edu/Papers/kdm-phdthesis.pdf>

Страница 44 “....Со времен Гельмгольца между сторонниками его “спектральной теории” музыкального звучания и исследователями, которые признавали важность временных свойств звука, идет, образно говоря, “перетягивание каната”.

Исследование, основанное на анализе путем синтеза, заключается в попытке обнаружить методы синтеза реалистичных звуков выявили несколько критических ограничений чисто спектральных теорий.

Кларк продемонстрировал, что записи, воспроизводимые в обратном порядке, которые имеют те же спектры амплитуды, что и их обычные аналоги, очень затрудняют идентификацию источника звука. Синтез, основанный на спектрах Фурье, без учета фазы, не дает реалистичных звуков, отчасти потому, что не улавливаются начальные свойства звука (Clark et al., 1963).

Хотя большинство музыкальных инструментов воспроизводят спектры, близкие к гармоническим, то есть частоты их компонентов (измеряются в небольших временных интервалах) точно моделируются целыми числами, кратными основному — отклонения от строгой гармоничности имеют решающее значение для звуков, производимых некоторыми инструментами.

Например, компоненты фортепианных тонов ниже среднего - С (261 Гц) должны быть негармоничными, чтобы звучать как фортепьяно (Fletcher et al., 1962). На самом деле, все свободно вибрирующие струны (например, если их щипать, ударять по ним или освобождать от смычка) и колокольчики создают негармоничные спектры, а негармоничность важна для звучания многих инструментов (Freedman, 1967; Grey & Moorer, 1977). Без неустойчивого частотного поведения во время атаки ноты синтезированные пианино звучат так, как будто их молоточки сделаны из замазки (Moorer & Grey, 1977). Таким образом, теория Гельмгольца верна в той мере, в какой она верна: относительные фазы компонентов чисто периодического звука мало что значат для восприятия. Однако, как только музыкальный тон меняется со временем — например, при включении или выключении, — временные свойства становятся актуальными. В реальном мире не существует чисто периодических звуков, и амплитудный спектр инструмента - всего лишь одна из его граней.....”

10. Высота тона, тембр и разделение источников

Источники:

“Near”, “Far”, and Harmonic Coherence

- Humans can *immediately* hear if a sound is “near” or “far” with a single ear.
 - But how do we perceive it, and how can it be measured?
- The author believes that engagement, near/far, pitch perception, timbre perception, direction detection, and stream formation all derive from the same property of sound
 - **the phase coherence of harmonics in the vocal formant range, ~630Hz to 4000Hz.**

Example: The syllables one to ten with four different degrees of phase coherence. The sound power and spectrum of each group is identical



Перевод текста из вышеприведенного фрагмента:

«Близкий», «Дальний» и гармоническая согласованность

- * Люди могут сразу же услышать «близок» звук или «далек» одним ухом.
 - Но воспринимаем ли мы его сейчас и можно ли его измерить?
- * Автор считает, что взаимодействие, ближний/дальний звук, восприятие высоты тона, восприятие тембра, определение направления и формирование потока происходит от одного и того же свойства звука
 - **фазовой когерентности гармоник в диапазоне вокальных формант, от ~630 Гц до 4000 Гц.**

Пример: Слоги от первого до следующего с четырьмя различными степенями фазовой согласованности. Сила звука и спектр каждой группы идентичны.

11. Подтверждение двухэтапной обработки на слух, как описано в (3).

Источник: http://www.hauptmikrofon.de/theile/ON_THE_LOCALISATION_english.pdf

4.3.1 “Закон первого локализационного стимула”

“...Для обычного стереозвука фантомный источник смещается от $= 0^\circ$ до $= 30^\circ$, если разница во времени между сигналами двух широкополосных громкоговорителей увеличивается с нуля примерно до 600 мкс (0,6 мс). Ассоциативная модель могла бы объяснить этот феномен (как временную, так и уровневую стереофонию) с помощью психоакустических принципов стадия гештальт-ассоциации. Стимул локализации, поступающий на стадию гештальт-ассоциации первым, имеет больший вес по сравнению со вторым стимулом (эквивалентом стереофонии на основе уровней будет стимул локализации с более высоким уровнем).

Несмотря на их идентичность и относительную временную задержку, локализационные стимулы можно распознать, поскольку каждый из них присутствует в бинауральной корреляционной схеме в полной и различимой форме (см. раздел 4.1). Однако дальнейшее увеличение разницы во времени между каналами приводит к превышению максимальной временной задержки t_{\max} . Для стационарных широкополосных сигналов (непрерывный шум) это приводит к нарушению выбора стимула локализации, что проявляется, например, в уменьшении подавления эффекта гребенчатого фильтра. В этой конкретной совокупности звуковых полей закон первого волнового фронта не может быть соблюден в соответствии с ассоциативной моделью. Анализируемых волновых фронтов, которые позволили бы определить локализацию воздействующих звуковых компонентов, не существует.

Напротив, для нестационарных импульсных сигналов (щелчки, речь, импульсивные звуковые сигналы) увеличение межканальной разницы во времени имеет другой эффект. В ассоциативной модели оценка огибающей амплитуды гарантирует, что основной и запаздывающий звук (отражение) могут быть распознаны как локальные стимулы. Согласно гипотетической функции стадии гештальт-ассоциации, первичный локализационный стимул определяет слуховое событие. Это происходит тем сильнее, чем больше разница во времени между поступающими локализационными стимулами. Только если разница во времени составляет около 10... 30 мс последующий стимул локализации

приобретает перцептивный вес. При превышении порога эхо-сигнала (определение см. в BLAUERT 1974) он будет восприниматься как отдельное слуховое событие.

Похоже, что “закон первого волнового фронта” можно интерпретировать как “закон первого локализационного импульса”...

“... 6. Краткое содержание

Согласно ассоциативной модели, представленной в предыдущих главах, функционирование слуховой системы в отношении пространственного восприятия обусловлено двумя различными механизмами обработки.

Каждый из этих двух механизмов обработки проявляется сам по себе в виде ассоциативно управляемого выбора паттерна. Текущий стимул, исходящий от достаточно широкополосного источника звука, вызывает ассоциацию местоположения на первом этапе и ассоциацию гештальта на втором, более высоком уровне обработки, благодаря слуховому опыту.

Хотя эти два этапа работают независимо друг от друга, они всегда определяют свойства одного или нескольких одновременных слуховых событий совместно. Строгая дифференциация этих двух этапов оценки стимулов полностью соответствует две элементарные области слухового восприятия.

Принимаемые ухом сигналы могут быть отнесены к двум характеристикам источника звука - “местоположение” и “сигнал”, которые независимы друг от друга, но всегда возникают попарно. Таким образом, представленная ассоциативная модель согласуется со многими явлениями, связанными с локализацией в наложенном звуковом поле.....”

12. Подтверждение необходимости обработки временной информации:

Источник: <http://arxiv.org/pdf/1208.4611v2.pdf>

Дал следующее краткое изложение:

“..Принцип частотно-временной неопределенности гласит, что произведение временной и частотной протяженностей сигнала не может быть меньше $1/(4 \text{ PI})$.

Мы изучаем способность человека одновременно определять частоту и время звучания звука. Наши испытуемые часто превышали предел неопределенности, иногда более чем в десять раз, в основном благодаря замечательной точности определения времени.

Наши результаты устанавливают нижнюю границу нелинейности и сложность алгоритмов, используемых нашим мозгом для анализа переходных звуков, исключают простые модели “линейного фильтра” ранней слуховой обработки и подчеркивают точность определения времени как центральную особенность обработки слуховых объектов...” .

И далее: “...Во многих приложениях, таких как распознавание речи или сжатие аудио (например, MP3 [18]), первый вычислительный этап состоит из генерации из исходного звука фрагментов сонограммы, которые становятся входными данными для последующих этапов. Наши данные свидетельствуют о том, что это неточное описание ранних этапов слуховой трансдукции и обработки информации, которые, по-видимому, сохраняют гораздо более точную информацию о времени и фазе звуковых компонентов [12, 19, 20], чем об их интенсивности....”

И, наконец: “...В начале прошлого века ряд слуховых феноменов, таких как остаточная высота звука и отсутствие основных звуков, начали указывать на то, что традиционный взгляд на процесс слуха как на форму спектрального анализа должен быть пересмотрен. В 1951 году Ликлайдер [25] заложил основу для временных теорий восприятия высоты звука, в которых используется детальная схема потенциалов действия в слуховом нерве [26, 28], в отличие от спектральных или пространственных теорий, в которых общая амплитуда паттерна активности оценивается без подробного доступа к информации о фазе.

Новаторская работа Ронкена [22] и Мура [23] выявила нарушения в продуктах, подобных неопределенности, и доказала, что они являются доказательством в пользу временных моделей. Однако этому направлению работы препятствовали четыре фактора: отсутствие формальной основы для частотно-временных распределений которые мы имеем сегодня, концентрация только на частотном различии, технические трудности при генерации стимулов и, не в последнюю очередь, отсутствие понимания улитковой динамики, поскольку активные улитковые процессы еще не были обнаружены.

Возможно, по этим причинам эта новаторская работа не получила широкого распространения, и в результате большинство современных инструментов анализа и обработки данных продолжают использовать модели, основанные на спектральных теориях. Мы считаем, что пришло время вернуться к этому вопросу.....”

13. Переходные процессы и локализация

Некоторая очень интересная информация о переходных процессах и локализации взята из работы Джозефа Менеджера по разработке. Рекомендуется прочитать всю статью целиком.

Источник: http://www.manger-audio.co.uk/PDFs/acoustical_reality.pdf

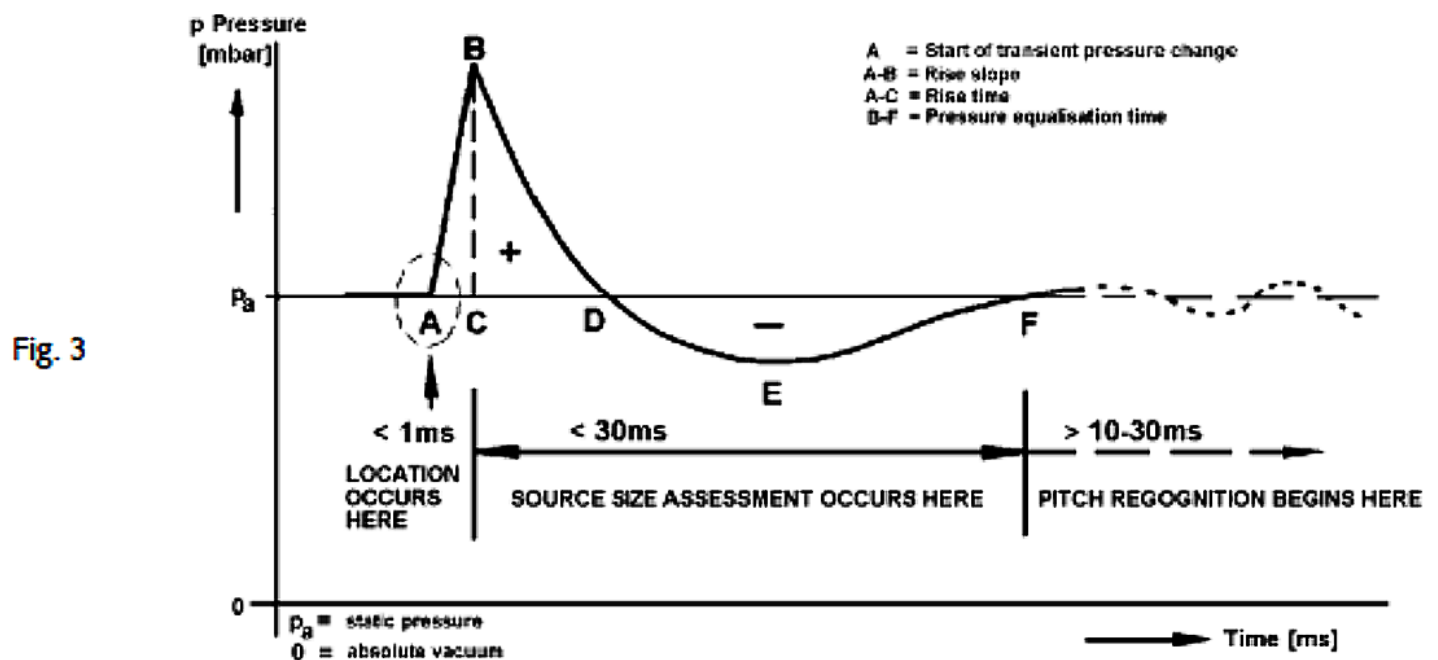
Восприятие и слух по новым исследованиям

Слуховой механизм человека не только определяет наличие звука, но и оценивает направление источника, а также анализирует содержание звука, чтобы определить наиболее вероятную причину. В музыкальных звуках также определяется высота звука. Джозеф Мангер изучает эти механизмы уже более 20 лет. Он обнаружил, что каждому механизму требуется разное время для срабатывания после начального переходного процесса. Местоположение и характер источника звука полностью определяются еще до того, как будет распознана высота звука.

Распознавание высоты тона и тембра описывается с помощью хорошо зарекомендовавшей себя теории, описанной в части I, в которой различные части базилярной мембраны резонируют в соответствии с частотами звука. Однако различные авторитетные специалисты, такие как Кейдель, Спренг, Клинке и Зеннер, предположили, что существует другой, более быстродействующий механизм, который работает во временной области.

Эта теория не может быть применена к обычным громкоговорителям. Подтверждение этой теории было невозможно до тех пор, пока Йозеф Мангер не использовал свою новую разработку в качестве источника звука.

Рис.3 иллюстрирует этот принцип анализа переходных процессов и показывает идеализированную форму переходной волны давления, возникающей после акустического события. На рисунке выделены три важных момента:



- 1 - Определение местоположения ($dT < 1\text{ ms}$);
- 2 - Оценка размера источника ($1\text{ ms} < dT < 30\text{ ms}$)
- 3 - Распознавание высоты тона ($dT > 10-30\text{ ms}$).

A = Начало скачка давления
A-B = Рост скачка давления
A-C = Время нарастания скачка давления
B-F = Время спада давления

1 Для распознавания источника звука нет необходимости в полном цикле. Требуется только начальное кратковременное изменение давления A-B. Время поступления переходного сигнала на оба уха будет разным и позволит определить причину, т.е. источник, расположенный сбоку, примерно за миллисекунду.

2 После события, вызвавшего переходный процесс, давление воздуха выравнивается по линии B-F. Промежуток времени между B и F варьируется и позволяет слушателю определить вероятный размер источника звука.

3 Только после распознавания источника по переходному сигналу можно распознать высоту звука в соответствии с теорией Лейка о базилярной мембране в той части формы волны, которая находится правее точки F. Информация, содержащаяся в исходной форме сигнала давления, выходит за рамки определения местоположения источника.

На фиг.4 показано, как размер источника звука влияет на время выравнивания давления.

Показаны сигналы давления от пистолета, винтовки и пушки. Видно, что чем больше источник, тем больше время выравнивания давления.

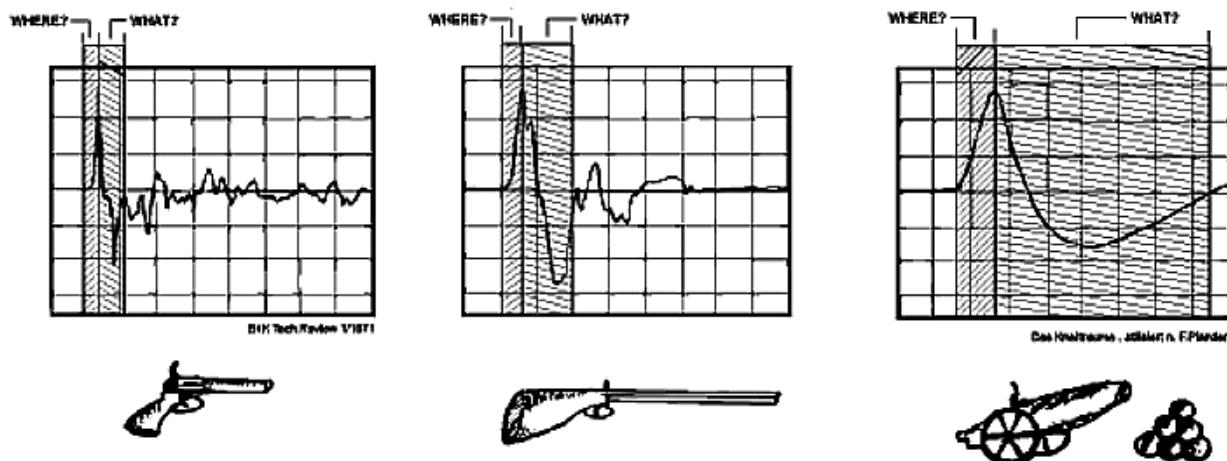
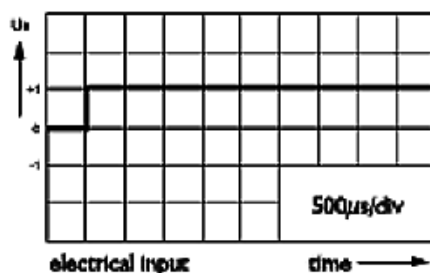
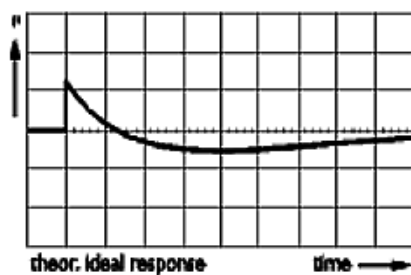


Fig. 4

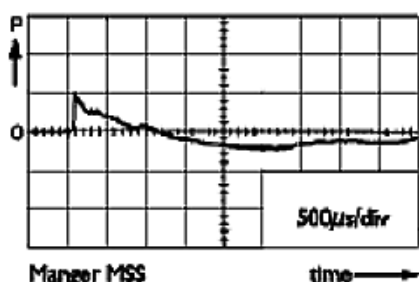
How distorted transients can be – Manger illustrates it on the following pictures:



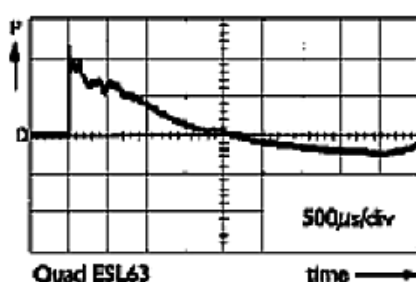
electrical input



theoretical ideal pressure
step response in air



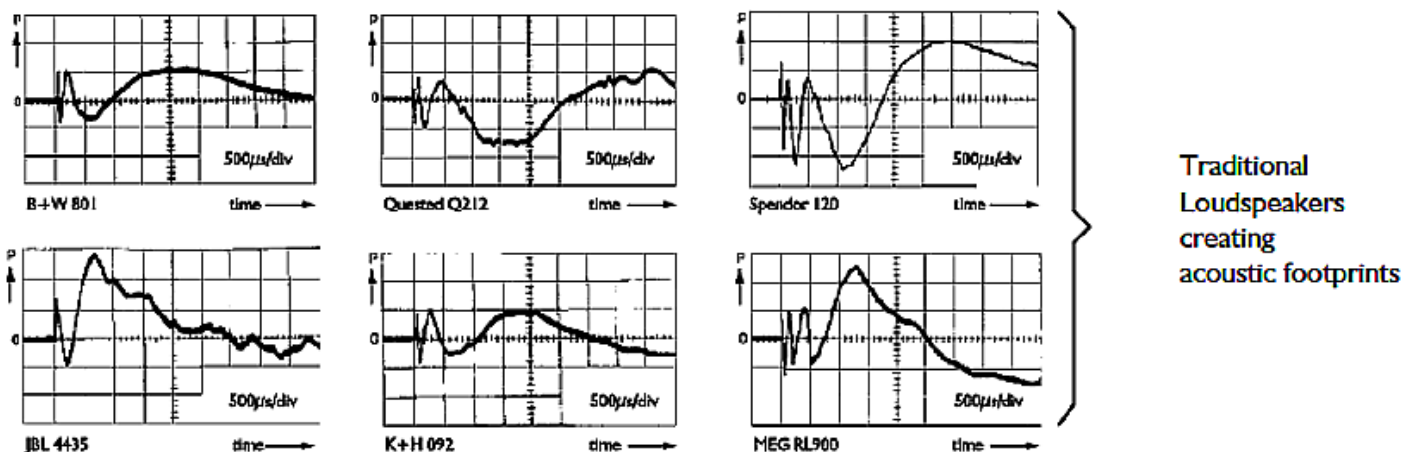
Manger MSS



Quad ESL63

closed to the ideal

На нижеследующих рисунках показано насколько искаженными могут быть переходные процессы у некоторых акустических систем. Под каждым рисунком (слева внизу) приведены названия акустических систем, для которых получены графики переходных процессов



14. Технический документ AES по фазовой точности и переходным процессам.

В 2002 году AESTD1001.1.01-10 впервые установил 10 μs в качестве максимально допустимой разницы во времени между стереодинамиками во всем звуковом диапазоне. Источник:

<http://www.aes.org/technical/documents/AESTD1001.pdf>

Некоторые комментарии представлены в

http://www.bodziosoftware.com.au/AES_Document_Comments.pdf

Таблица 3. Рекомендуемые характеристики для эталонных мониторных и домашних громкоговорителей.

Table 3. Suggestions for reference monitor loudspeakers and advice for home loudspeakers.

Parameters	Units/Conditions	Value
Amplitude/frequency response	40 Hz–16 kHz 0°	Tolerance 4 dB
	$\pm 10^\circ$ Horizontal $\pm 30^\circ$	Deviation to 0°, 3 dB Deviation to 0°, 4 dB
Difference between front loudspeakers	In the range >250 Hz to 2 kHz	0.5 dB
Directivity index	250 Hz–16 kHz	8 dB ± 2 dB
Nonlinear distortion attenuation (SPL = 96 dB)	<100 Hz >100 Hz	–30 dB (=3%) –40 dB (=1%)
Transient fidelity Decay time t_s , for reduction to a level of $1/e$, i.e., 0.37 of output level	t_s [s]	$< 5/f$ [Hz] (preferably $2.5/f$)
Time delay Difference between stereo loudspeakers	∂t	$\leq 10 \mu\text{s}$
System dynamic range Maximum operating level (measurement acc. to IEC 60268, § 17.2, referred to 1 m distance)	$L_{\text{eff max}}$	>112 dB (at IEC 60268 program simulation noise or special condition)
Noise level	L_{noise}	≤ 10 dBA

15. Слышимость переходных процессов

Я наткнулся на интересную статью в JAES, Том 38, № 11, ноябрь 1990 г., "О взаимосвязи между субъективной оценкой звука и объективной оценкой акустических параметров для выбранного источника". Авторы провели субъективный и объективный анализ нескольких низкочастотных динамиков, воспроизводящих импульсные сигналы, и пришли к выводу:

"... Подробный анализ результатов субъективной оценки громкоговорителей показал, что на субъективную оценку полученных звуков решающее влияние оказала работа громкоговорителя в переходном состоянии. Оно оказалось, что чем больше длительность конечного переходного процесса и чем меньше значение коэффициента D , тем резче звуки, издаваемые громкоговорителем..."

16. Переходные процессы и локализация

В следующей статье четко указано, что переходные процессы имеют решающее значение в процессе локализации.

Источник: <http://www.pa.msu.edu/acoustics/rooms1.pdf>

Я нашел интересную информацию в статье "Локализация звука в помещениях", опубликованной в JASocAm. 74 (5) ноября 1983 года. Статья написана У.М. Хартманом из Мичиганского государственного университета, кафедра физики, и содержит следующее краткое изложение:

"... Эта статья посвящена локализации источников звуков людьми - слушателями в помещениях. В ней представлены результаты экспериментов по идентификации источника, направленных на определение того, зависит ли способность локализовать звук в помещении от акустики помещения и как это зависит от природы исходного сигнала.

Эксперименты показывают, что локализация импульсивных звуков с сильными переходными периодами атаки не зависит от времени реверберации в помещении, хотя может зависеть от геометрии помещения.

Для звуков без переходных периодов атаки локализация монотонно улучшается с увеличением спектральная плотность источника.

Локализация непрерывного широкополосного шума зависит от времени реверберации в помещении....."

Другие статьи Хартманна и Ракерда. "Локализация звука в помещениях, II: Влияние одной отражающей поверхности".

<http://www.pa.msu.edu/acoustics/rooms2.pdf> "...Наши результаты указывают на следующее:

- (1) Звук должен содержать переходные элементы, чтобы эффект приоритета помогал его локализации в помещениях.
- (2) Даже если переходные элементы присутствуют, эффект приоритета не устраняет всех воздействий помещения отражения.
- (3) Из-за интерференции отражений в помещении могут возникать большие различия в интенсивности звуковых сигналов, которые оказывают значительное влияние на локализацию; это верно даже для низких частот, для которых в свободном поле не существует сигналов IID.
- (4) Слушатели, по-видимому, имеют определенные ожидания относительно надежности и правдоподобия различных направленных сигналов и соответствующим образом оценивают их с точки зрения восприятия; мы предполагаем, что это может частично объяснить значительные различия в показателях затрат времени на торговлю, о которых сообщается в литературе, а также различные сообщения о важности для локализации.
- (5) В этом исследовании мы обнаружили, что начальные сигналы имеют определенное значение для локализации даже в свободном поле.

"Локализация звука в помещениях: III: Эффекты начала и продолжительности".

<http://www.pa.msu.edu/acoustics/rooms3.pdf>

Выводы

"...(1) Быстрое появление облегчает локализацию в свободном поле на поддающуюся измерению, но небольшую величину, около 0,5 град. Это значительно облегчает локализацию в помещениях, поскольку при запуске включается эффект приоритета, а без эффекта приоритета локализация будет плохой из-за сбивающих с толку сигналов в стационарном звуковом поле.

(2) Эффект приоритета максимально эффективен, когда сигнал поступает мгновенно. Его эффективность начинает снижаться по мере увеличения продолжительности приема.....”

17. Подробнее о локализации и переходных процессах Источник:

<http://www.pa.msu.edu/acoustics/rakhar2.pdf>

В статье Брэда Рейкерда и Уильяма М. Хартманна “Локализация шума в отражающей среде” (Мичиганский государственный университет), они делают вывод:

“...(1) Локализация шума усиливается за счет переходного процесса при атаке. Переходный процесс при атаке особенно полезен, когда соотношение прямого и отраженного звука низкое. Переходные процессы при атаке дают преимущество перед медленным нарастанием, когда отражения не сильно задерживаются по сравнению с прямым звуком. Напротив, переходные процессы атаки имеют лишь незначительную ценность, когда шум слышен в наушниках или звуковые сигналы звучат в безэховой комнате (Тобиас и Шуберт, 1959; Рейкерд и Хартманн, 1986).

(2) Шумы являются отличным средством выравнивания между людьми. В то время как способность распознавать устойчивые звуки в устойчивом состоянии сильно различается у разных слушателей, способность распознавать звуки с переходным процессом в начале показывает разницу между лучшими и худшими менее чем на 1,5 градуса среди наших семи слушателей....”

18. Еще больше о локализации и переходных процессах

Источник: библиотека AES. Препринт 2745. 86-е соглашение.

“Локализация звука в помещении с отражающими стенами” У.М. Вагенаарс. “

ВЫВОДЫ

В этом исследовании была протестирована локализация звука в комнате с отражающими стенами. Было использовано одиннадцать стимулов, различающихся по спектральной и временной информации. Для такой комнаты можно сделать следующий вывод:

- Ширина полосы сигнала является важным показателем для локализации. Чем шире частотный спектр звука, тем лучше качество локализации.
- Смещения, по-видимому, являются таким же важным признаком для локализации, как и входы. Характеристики локализации аналогичны для сигналов с резким началом, смещением или и тем, и другим.
- Эффективность локализации для стационарных синусоид зависит от частоты. Для синусоид с простым стробированием эффективность не зависит от частоты.

Хотя многие из допущенных ошибок были ошибками расстояния, испытуемые могут довольно хорошо определять расстояние. Кроме того, испытуемые обычно выбирают правильную сторону, даже для синусоид, которые трудно локализовать в стационарном состоянии.....”

19. Качество звука и характеристики переходных процессов.

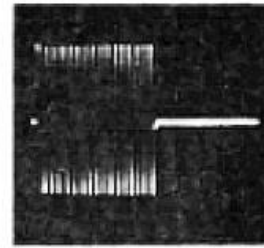
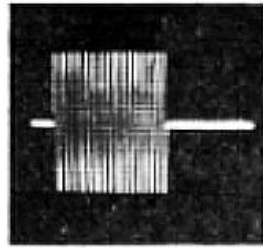
В следующей статье: “Корреляция измерений переходных процессов на громкоговорителях с Тесты на аудирование” М. Коррингтона, опубликованная в журнале JAES, январь 1955 года, ТОМ 3

Во-первых, мы находим интересный метод измерения, позволяющий отделить “переходный процесс с выступом” - смотрите ниже

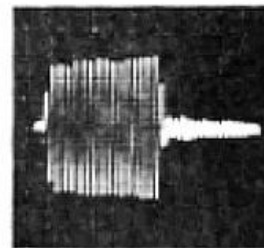
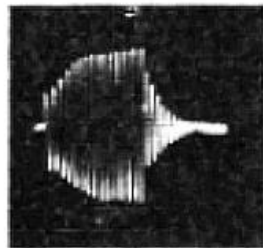
8 INCH LOUDSPEAKER

F=900 CPS F=3300 CPS

ELECTRICAL
INPUT



ACOUSTIC
OUTPUT



TRANSIENT
DISTORTION

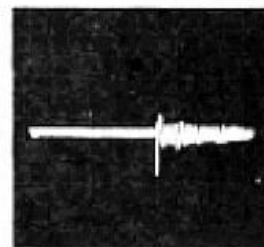
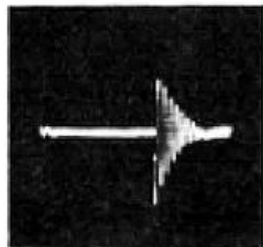


FIG. 3. Transient distortion for 8-in. loudspeaker.

Статья читается хорошо, и в ней содержится следующий интересный вывод:

“...Эта информация дополняет результаты измерений стационарного звукового давления. Мы никогда не находили ни одной системы с низкими временными искажениями, которая не имела бы плавной кривой звукового давления;

с другой стороны, мы измеряли системы с довольно резкими и небольшими пиками в характеристике звукового давления, которые приводили к нежелательным временным искажениям.

Существует очень хорошая корреляция между временными искажениями и субъективными тестами на прослушивание. Всякий раз, когда наблюдаются пики временных искажений, можно быть уверенным, что тесты на прослушивание выявят неприятные искажения, даже несмотря на то, что кривая звукового давления довольно плавная....

Многочисленные измерения показывают, что для качественной аудиосистемы кривая звукового давления должна быть плавной и правильной формы, а временные искажения должны быть снижены как минимум на 18 дБ во всем диапазоне. Тогда можно быть абсолютно уверенным, что система пройдет очень тщательные тесты на прослушивание...”

20. Подтверждение двухэтапной обработки на слух, как описано в (3) и (11).

Еще одна интересная статья.

В ней ранние отражения рассматриваются в несколько ином ракурсе. “Значение ранних высокочастотных отражений от громкоговорителей в Комнаты для прослушивания”, Препринт 4094, Дэвид Моултон, David Moulton Professional Сервисные службы, Гротон, Массачусетс

“...Любое реверберирующее пространство создает эффект гребенчатой фильтрации, и практически все прослушивания музыки через громкоговорители осуществляются в таких помещениях. Следовательно, логически рассуждая, все прослушивание осуществляется в неблагоприятных условиях, когда основной признак точного воспроизведения звука (четкая амплитудная характеристика) сведен на нет. Тем не менее, мы должны признать, что системы воспроизведения музыки, похоже, работают хорошо: слушатели получают удовольствие от прослушивания, они легко и точно распознают звуки (и будут свидетельствовать об их реалистичности), а некоторые слушатели способны обнаружить поистине микроскопические различия между альтернативными компонентами системы воспроизведения. Эта аномалия поднимает вопрос: как люди могут эффективно слушать громкоговорители в реверберационных помещениях и почему вездесущая гребенчатая фильтрация не работает?

Интерференционные эффекты всегда создают проблемы для слушателя? Я полагаю, что ответ кроется в природе нашей слуховой локализации, которая использует интерференционные эффекты, такие как гребенчатая фильтрация, для выполнения задачи локализации источника звука. Эта задача выполняется на подсознательной неврологической стадии, и большинство ранних размышлений - это информация о локализации, которая не передается сознательному разуму.

Кроме того, мы сознательно не воспринимаем амплитудные характеристики эффектов гребенчатой фильтрации, которые возникают в реверберационных пространствах, как результат ранних размышлений, хотя такие эффекты явно поддаются измерению....” Вышеприведенное утверждение подтверждает более ранние выводы Гюнтера Тейла, Уоткинсона и Мангера о том, что ухо обрабатывает поступающий звуковой стимул в два этапа: принимаемые ухом сигналы могут быть отнесены к двум характеристикам источника звука - “местоположению” и “сигналу”, которые независимы друг от друга, но всегда возникают в паре – это мудрый способ.

20. Общие выводы из представленных Выше статей

Прежде всего, о самой комнате. Согласно Бернду Тайссу, Малкольму О. Дж. Хоксфорду в препринте AES 4462.:

“...Ранние отражения < 2,5 мс. Известно, что ранние отражения, возникающие менее чем через 2,5 мс после первоначального звукового ощущения, приводят к смещению изображения в свою сторону и размыванию изображения.

Ранние отражения < 5 мс. Известно, что ранние отражения, возникающие более чем через 2,5 мс, но менее чем через 5 мс после первоначального звукового ощущения, приводят к размытию изображения, хотя и сохраняют направление изображения постоянным....”.

Поэтому, если вашей целью является получение максимально четкого изображения или наиболее точная локализация, я бы посоветовал вам позаботиться о временном источнике (громкоговорителях), а также обеспечьте некоторую акустическую обработку стен/помещения. Есть три основные области, в которых линейно-фазные громкоговорители отличаются от минимально-фазных громкоговорителей.

1. Линейно-фазные громкоговорители предоставляют более точную пространственную информацию, а не тембральную. Тональный баланс одинаков для обоих типов громкоговорителей. Вот тут-то и возникают проблемы с тестированием, потому что слушатели ищут тональные различия, а не тонкие пространственные подсказки - более четкое изображение, лучшее расположение солистов, глубину сцены. Это неуловимо, но это есть.

2. Одинаковая фазовая характеристика для всех громкоговорителей в системе. Фазовая характеристика в правильно выровненной многоканальной линейно-фазовой системе в каждом громкоговорителе 0 градусов. Таким образом, он сразу же соответствует стандарту AESTD1001.1.01-10 по точности фазы и переходным процессам. Результаты измерений линейно-фазного громкоговорителя представлены на моем веб-сайте, а комментарии к AESTD1001.1.01-10 представлены в разделе - http://www.bodziosoftware.com.au/AES_Document_Comments.pdf

3. Более плотные басы. Даже доктор Флойд Тул цитировал других исследователей (Крейвена и Герзон) на эту тему на странице 420. Наиболее очевидным отличием является более низкий бас. Я провел обширные тесты на эту тему - http://www.bodziosoftware.com.au/LP_MP_Subwoofer_Tests.pdf

21. Тестирование прямоугольных громкоговорителей

Еще один интересный доклад с 94-й конференции AES.

Я бы рекомендовал прочитать этот доклад целиком.

Источник: "Рекомендации по квалифицированной оценке громкоговорителей",
Препринт AES 3603, Питер М. Пфлайдерер, 1993.

Статья заканчивается следующим резюме:

”...Резюме

Электронные компоненты в цепи электроакустического воспроизведения достигли почти невероятного уровня совершенства благодаря грамотному применению измерительной техники. С другой стороны, в случае с громкоговорителями компетентные методы измерений в настоящее время даже не используются на практике.

Очевидно, что требуются методы тестирования, способные выявить значительные изменения в форме сигнала, вызванные линейными и акустическими погрешностями.

Измерения с использованием прямоугольных сигналов должны быть включены в стандартную процедуру тестирования, чтобы иметь возможность выявлять ошибки с качеством звука и пространственным отображением во всех компонентах HiFi, но особенно в системах громкоговорителей.

Многие технические и акустические неисправности, в частности, не могут быть зарегистрированы с помощью измерений SPL или частоты, хотя они и вносят значительные изменения в соответствующую форму звукового сигнала.

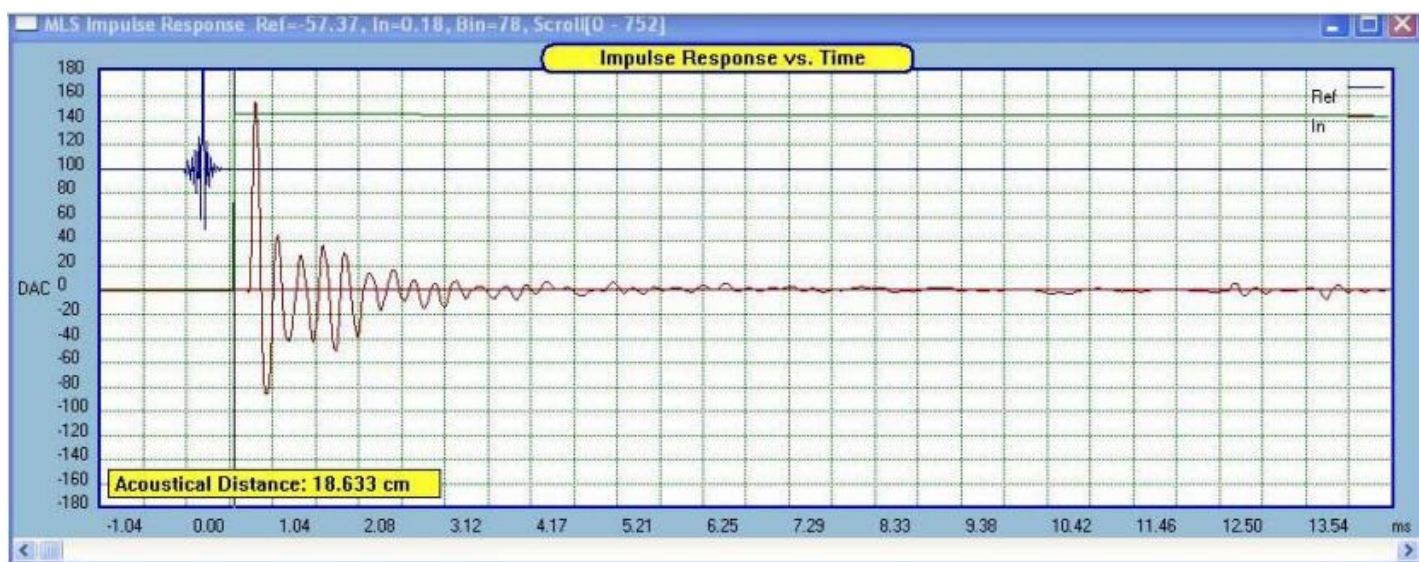
Именно по этой причине громкоговорители с проверенной характеристикой на прямоугольных частотах являются важной предпосылкой для естественного воспроизведения звука. Кроме того, обнаружить акустические неисправности можно только с помощью этого типа технически безупречных эталонных громкоговорителей. Следует четко отметить, что все остальные компоненты тока в цепи электроакустического воспроизведения уже правильно передают прямоугольные сигналы.

Правильное воспроизведение прямоугольных сигналов громкоговорителями имеет такое же значение, как и правильное воспроизведение прямоугольных сигналов усилителями в 1960-х годах. И то, и другое является фундаментальным достижением и создает важные условия для высокого качественного воспроизведения музыки. Ничто так не способствует распространению концепции высокой точности, как подобные достижения...”

Тестирование прибора во временной области Пример реального громкоговорителя

Рассматриваемая здесь тестируемая система состоит из фильтра и громкоговорителя в корпусе. Эти два компонента, которые создают временную задержку, - это фильтр и комбинация драйвера и самого корпуса. Чтобы проиллюстрировать вышеизложенное, был измерен 12-дюймовый гитарный громкоговоритель в вентилируемом корпусе, и его минимально-фазовые характеристики были следующими полученными с помощью метода измерения MLS – см. ниже.

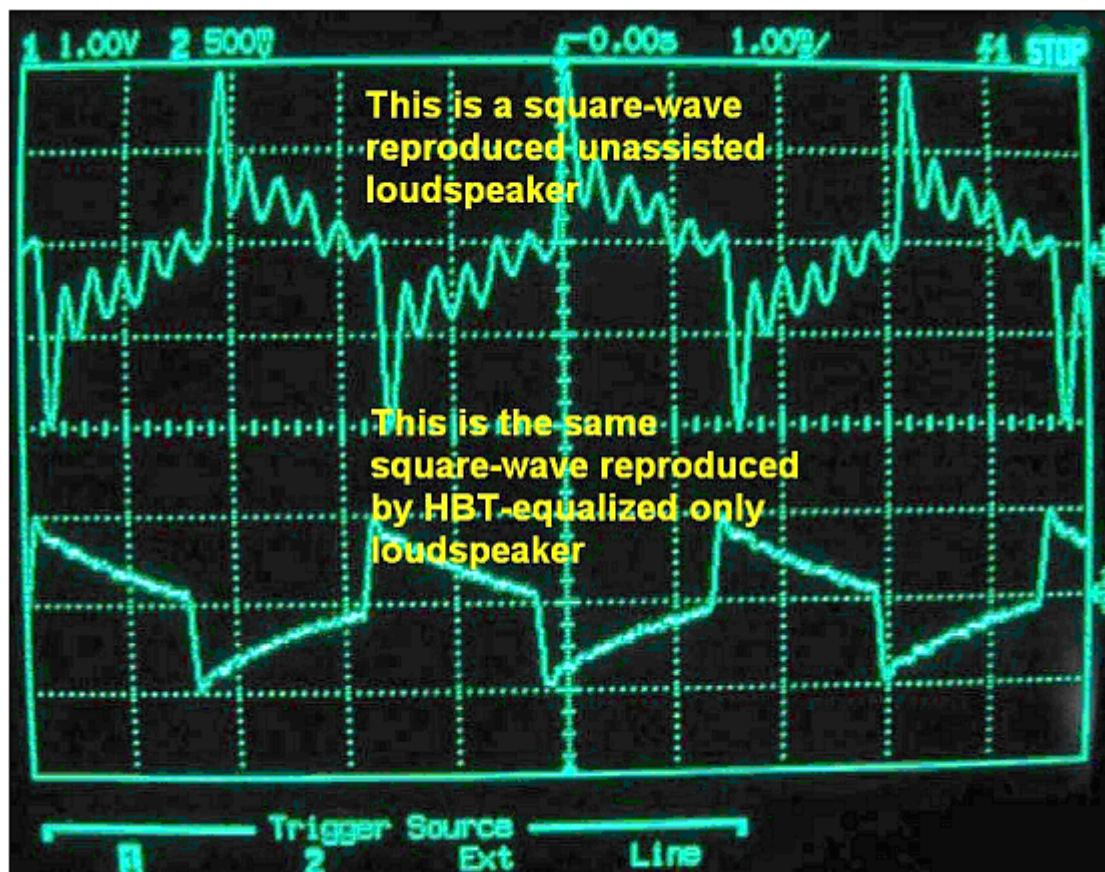
Сразу видно, что громкоговоритель имеет довольно неравномерную частотную характеристику. Поскольку громкоговоритель, по сути, является устройством с минимальной фазой, соответствующая фазовая характеристика также сильно неравномерна и определенно не является плоской.



Давайте определим интересующую нас частотную характеристику, которая представляет собой диапазон частот, в котором SPL будет выровнен до плоской характеристики. В моем примере это будет: 90 Гц – 5500 Гц.

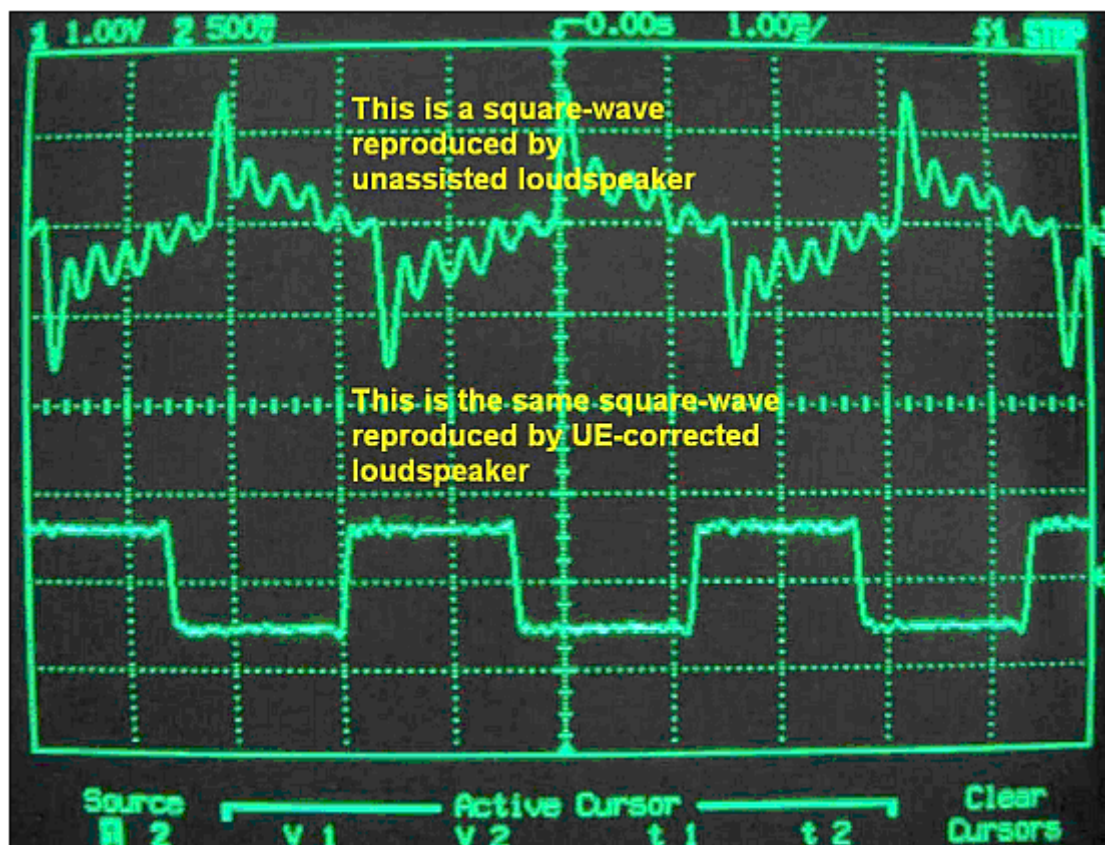


Прямоугольная волна частотой 300 Гц, воспроизводимая этим громкоговорителем, сильно искажена. Сильный звон обусловлен резким пиком SPL на 10 дБ, расположенным на частоте 3,5 кГц. Вы можете видеть, что около 11 периодов сигнала вызова в одном периоде прямоугольной волны частотой 300 Гц.



Это прямоугольный сигнал, воспроизводимый динамиком без посторонней помощи (верхняя кривая).

Это тот же прямоугольный сигнал, воспроизводимый только динамиком с НВТ-эквалайзером (нижняя кривая).



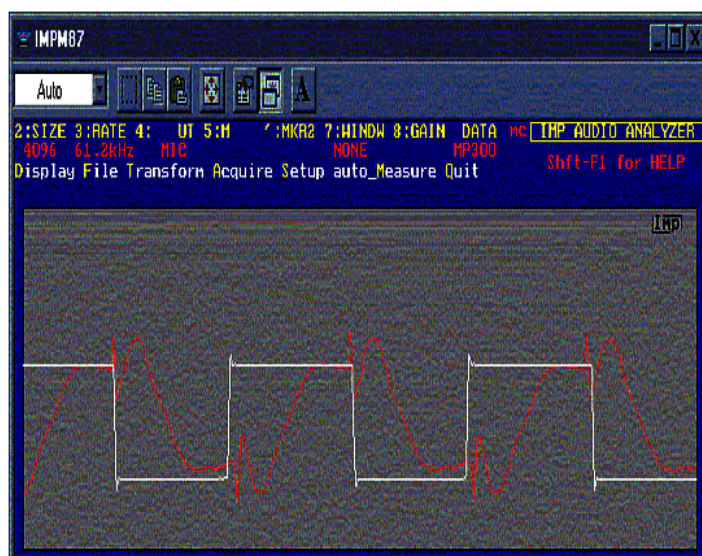
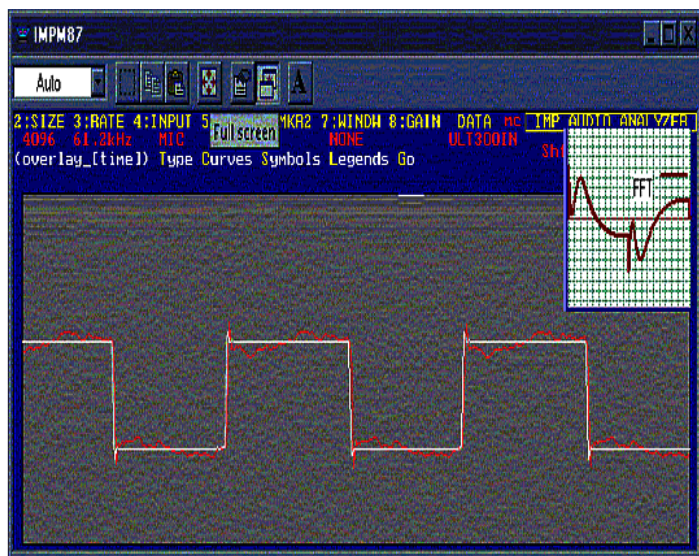
Это прямоугольный сигнал, воспроизводимый динамиком без посторонней помощи (верхняя кривая).

Это тот же прямоугольный сигнал, который воспроизводится динамиком с UE-коррекцией (нижняя кривая).

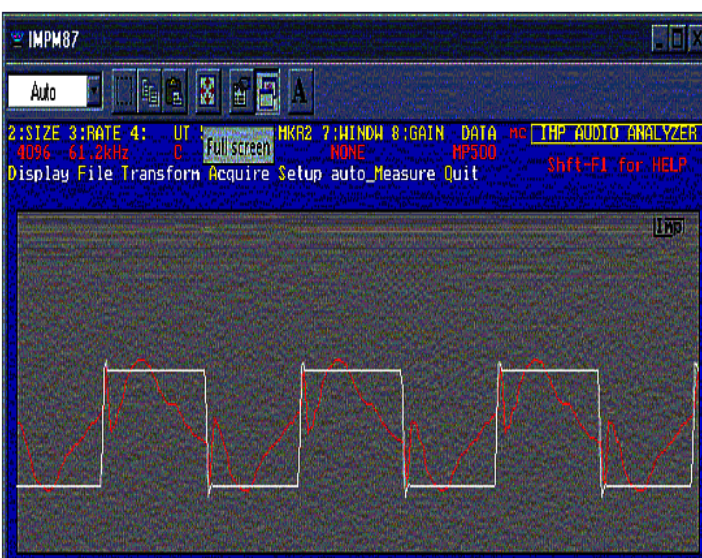
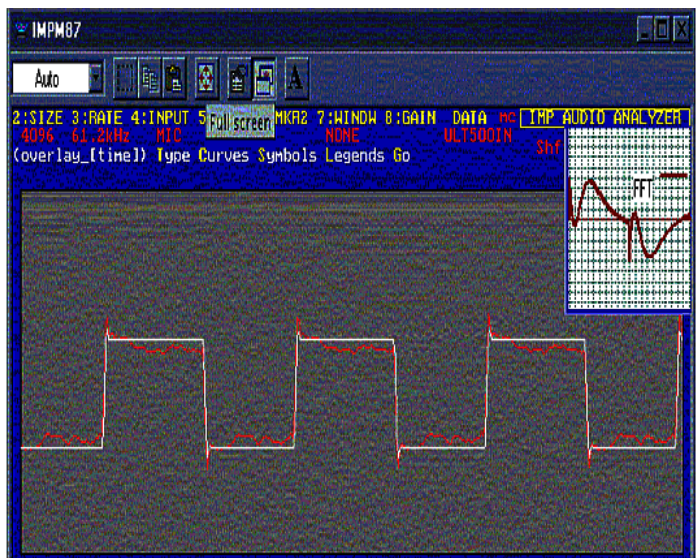
Результаты инструментальных испытаний линейно-фазных громкоговорителей показывают их истинное превосходство во временной области. Джон получил следующие результаты тестирования Кресковский, профессор музыки и дизайна (<http://www.musicanddesign.com>)

Как отмечает Джон: “....Измерения проводились не в безэховой среде и относятся к типу непрерывных по времени, регистрируются в течение нескольких циклов, переключение в течение периода без отражения невозможно. Таким образом, имеется некоторое загрязнение от отражений в помещении, что приводит к некоторому ухудшению наблюдаемого отклика.

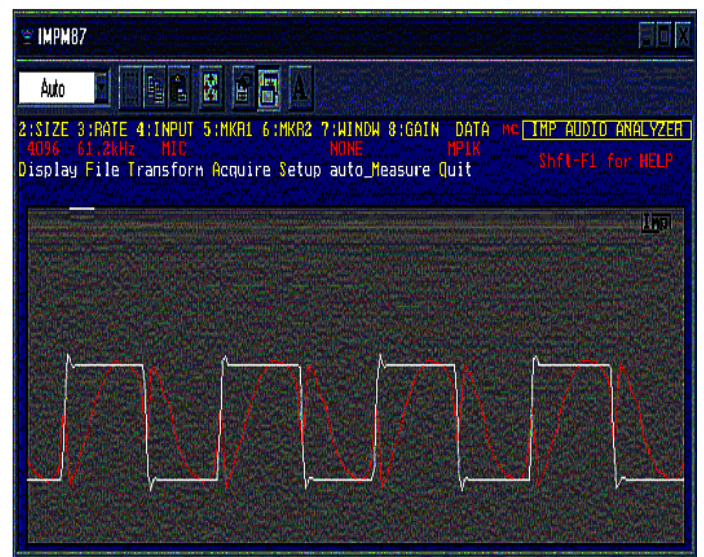
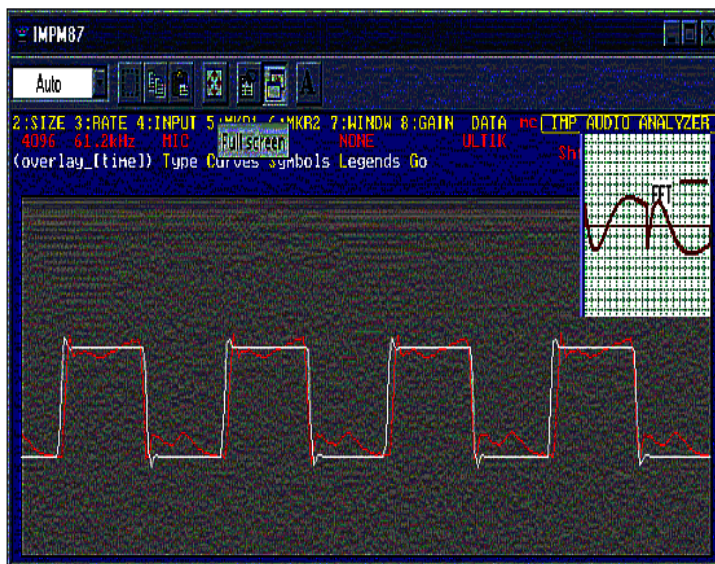
На первом рисунке показан отклик в 300 Гц. Это близко к отключению низких частот в системе, где чередование фаз и групповая задержка из-за отключения высоких частот на частоте 200 Гц обычно приводят к потере эффекта плоской вершины, а переход на частоту 2 кГц приводит к искажению начального уровня. Это показано на вставке в правом верхнем углу графика для линейаризованной системы и подтверждается нижним графиком, который соответствует стандартной системе LR4. Белая линия - это входной сигнал, красная - выходной сигнал акустической системы.



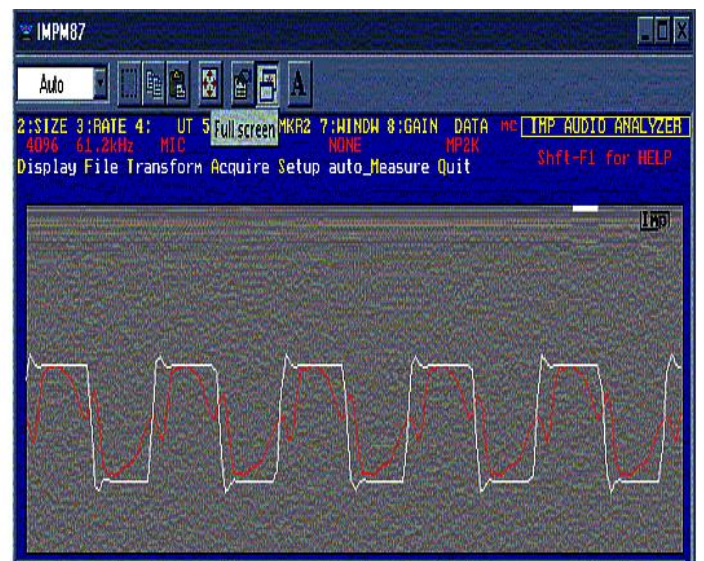
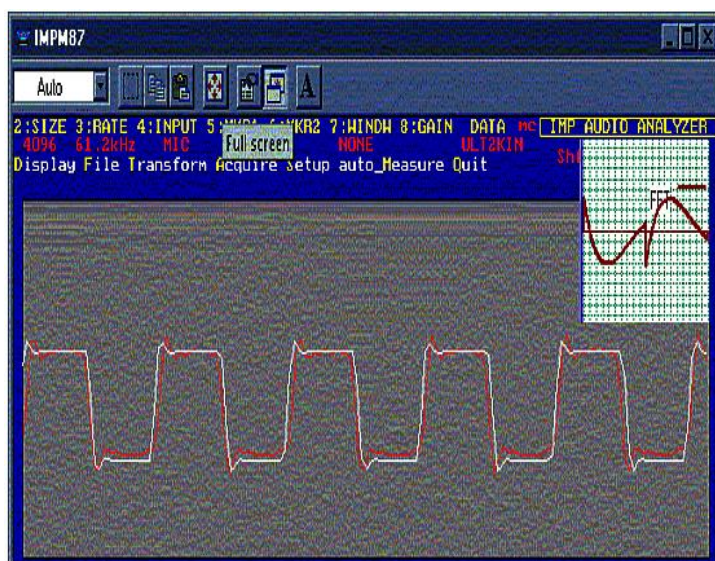
Прямоугольный отклик линейаризованной системы частотой **300 Гц** слева и стандартного кроссовера LR4 справа.



Прямоугольный отклик линейаризованной системы частотой **500 Гц** слева и стандартного кроссовера LR4 справа.



Прямоугольный отклик линейаризованной системы на частоте **1 кГц** слева и стандартный кроссовер LR4 справа.



Прямоугольный отклик линейаризованной системы на частоте **2 кГц** слева и стандартный кроссовер LR4 справа.” Конец цитаты.

Мои собственные измерения на 18-дюймовых сабвуферах McCauley еще раз подтверждают превосходство линейно-фазных динамиков во временной области.



Прямоугольная частота **20 Гц**: режим с линейной фазой и режим с минимальной фазой

Приведенные выше результаты измерений для сравнения во временной области говорят сами за себя. Следует помнить, что в данном случае мы имеем дело с 18-дюймовым драйвером с очень массивным

корпусом и фильтром нижних частот в вентилируемом (резонирующем) корпусе, и, тем не менее, точность воспроизведения во временной области близка к идеальной. Довольно удивительно видеть вентилируемый громкоговоритель, поддерживающий акустическое давление почти постоянным в течение 25 мс.

Далее я использовал импульсы длительностью 2 мс, разделенные промежутком в 350 мс, в качестве исходного сигнала. При импульсе в 2 мс версия с минимальной фазой производила скорее “глухой удар”, чем хлопок или щелчок. В этом, пожалуй, нет ничего удивительного, поскольку длительность импульса после вызова составила 130 мс и намного превысила 30-мс “эффекта памяти” слуховой системы. Здесь драйвер, фильтр и вентилируемый корпус добавили свою собственную комбинированную особенность.

Также можно заметить, что версия сабвуфера с минимальной фазой преобразовала явно асимметричный импульс в гораздо более симметричный биполярный импульс с последующими сигналами. Это хорошо видно на снимках экрана ниже.



Однополярный импульс 5 мс в линейно-фазовом режиме и минимально-фазовом режиме

Когда для возбуждения использовался биполярный импульс продолжительностью 2 мс, версия с минимальной фазой сделала обратное и преобразовала симметричный биполярный импульс в импульс с явной асимметричной тенденцией. Звук после импульса усиливается из-за более удаленного расположения микрофона, так что теперь микрофон улавливает некоторые отражения в комнате.



Биполярный импульс длительностью 2 мс в линейно-фазовом режиме и минимально-фазовом режиме.

Когда для возбуждения использовался биполярный импульс продолжительностью 10 мс, версия с минимальной фазой имела еще более асимметричную тенденцию.



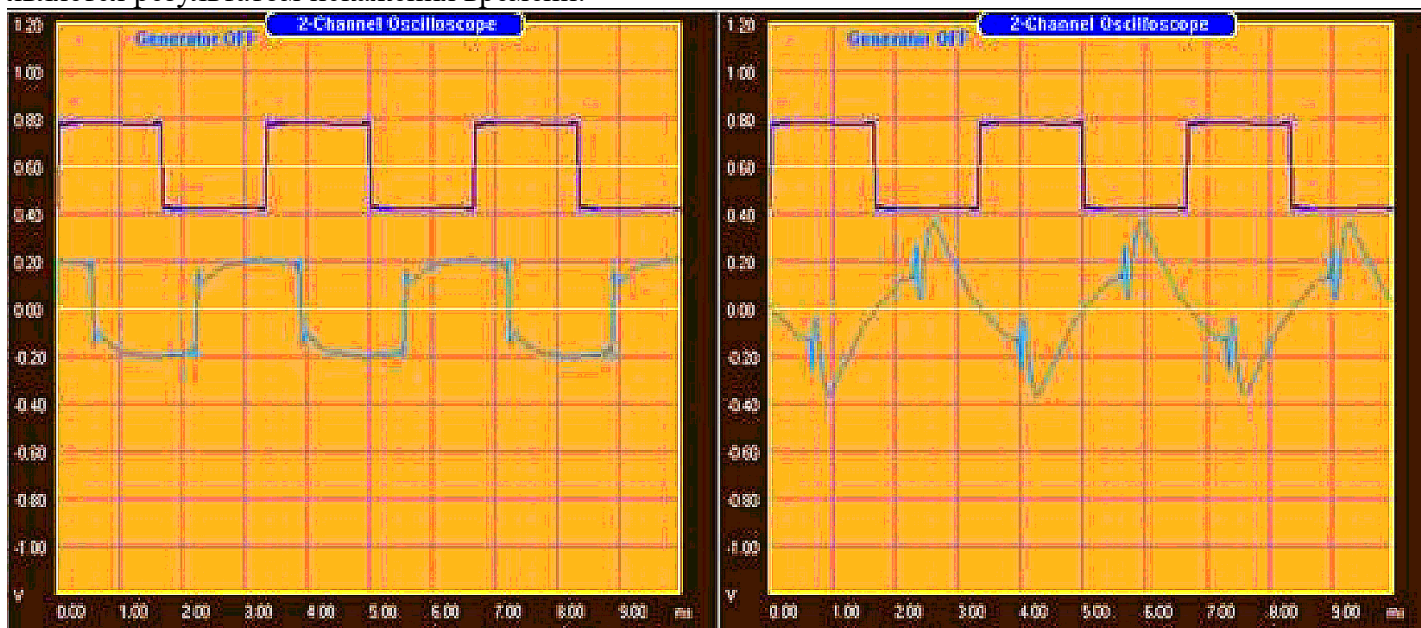
Биполярный импульс длительностью 10 мс в линейно-фазовом и минимально-фазовом режимах

Наконец, еще несколько измерений прямоугольной формы из Руководства пользователя UE. Результат измерения линейной фазы показан слева, а результат измерения нелинейной фазы - справа. Следует отметить, что в форме волн наблюдаются некоторые искажения, которые, вероятно, связаны с отражениями от помещения.

Тестирование прямоугольными волнами - это стационарный тест, и без настоящей безэховой камеры невозможно устранить влияние отражений от помещения. Тем не менее, для случая 300 Гц, показанного на первом рисунке, линейная фаза системы показывает ожидаемый резкий подъем и довольно плоскую верхнюю часть.

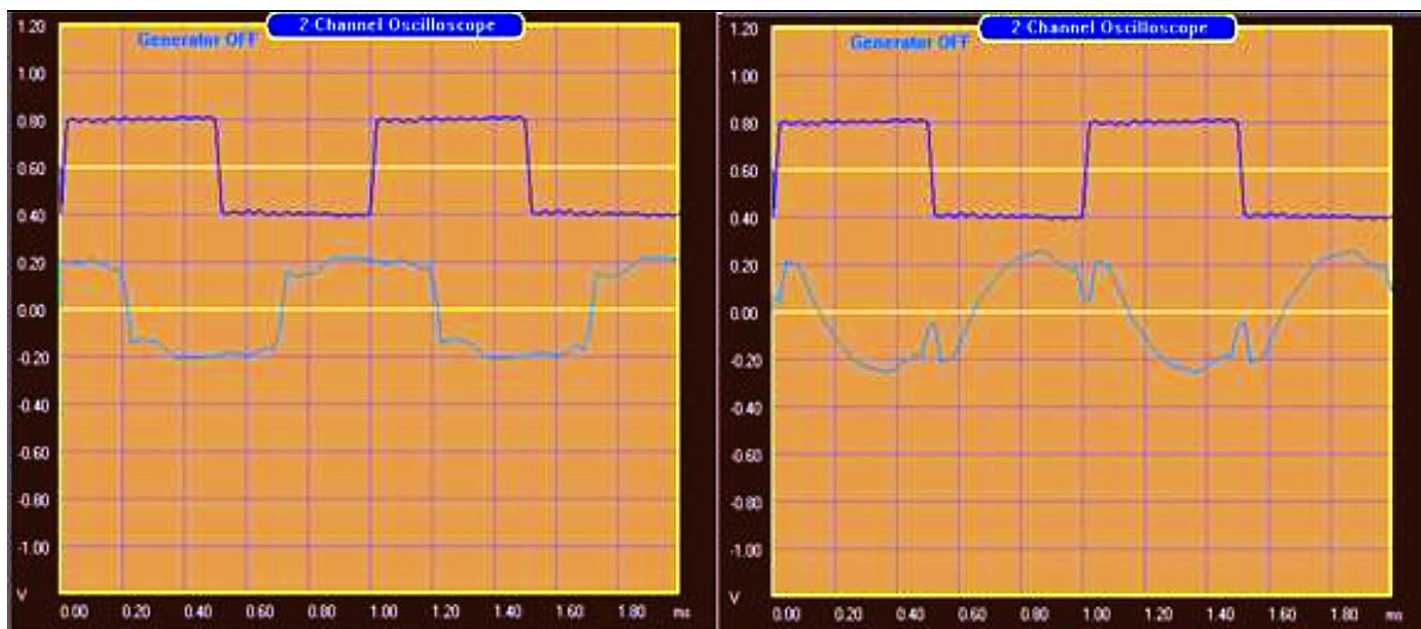
В случае нелинейной фазы наблюдается ранний отклик высокочастотного динамика, за которым следует отклик низкочастотного динамика, а скошенная верхняя часть является следствием нелинейной фазы. Отклик также значительно превышает необходимый уровень. Этот последний эффект редко обсуждается при сравнении линейных и нелинейных фазовых систем.

Несмотря на то, что амплитуда частотной составляющей диапазона корректно воспроизводится в нелинейной фазовой системе, отсутствие линейной фазы означает, что различные частотные составляющие неправильно суммируются, поскольку это задерживаются на различную величину. Сбой является результатом искажения времени.



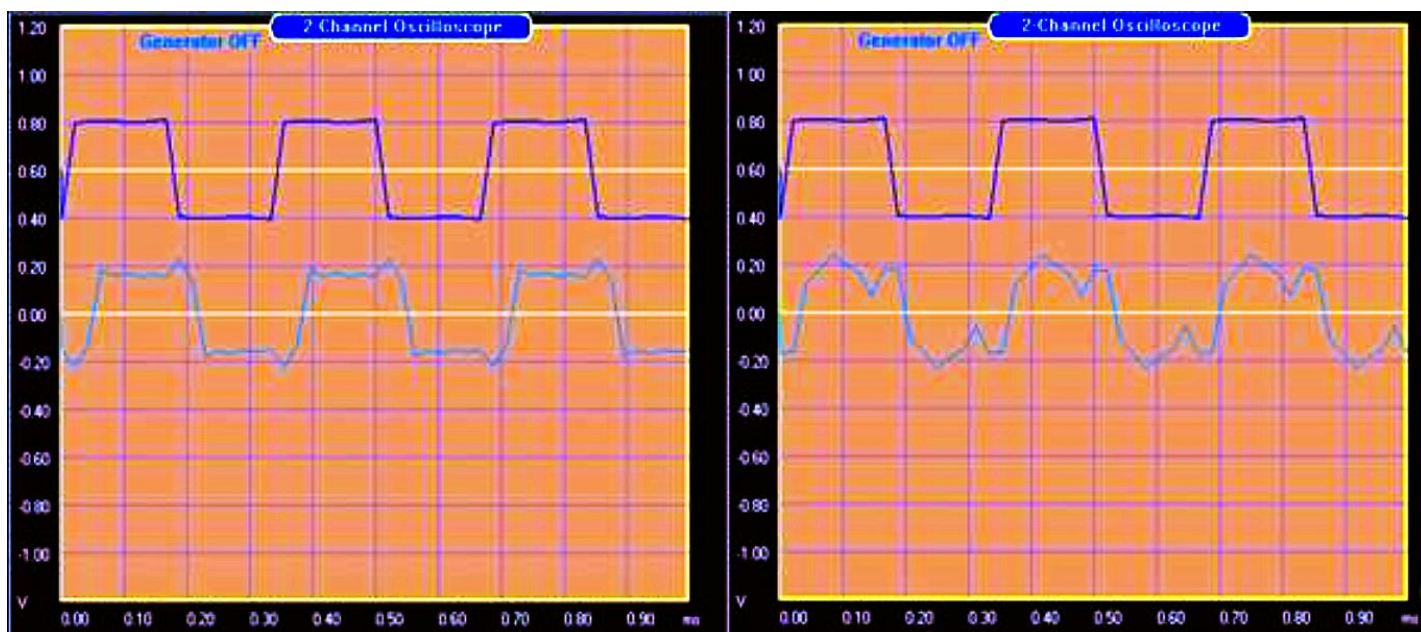
Частота прямоугольных колебаний 300 Гц, линейная фаза слева; нелинейная фаза справа

На следующем рисунке показано аналогичное сравнение для прямоугольных колебаний частотой 1 кГц. Опять же, наблюдаются некоторые искажения из-за отражений от помещения. Однако в случае с линейной фазой снова наблюдается ожидаемый резкий подъем и относительно плоская вершина. Нелинейная фазовая система более четко показывает временную задержку между откликом низкочастотного и высокочастотного динамиков.



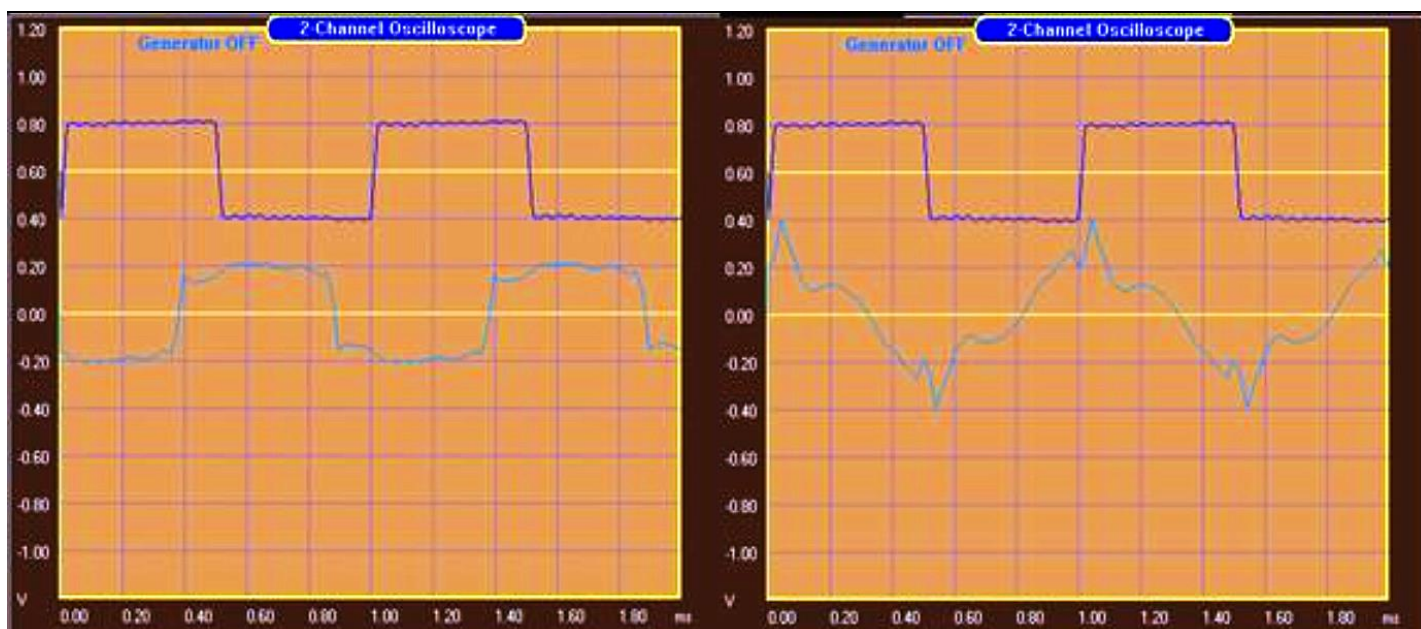
Прямоугольный сигнал частотой **1 кГц**, линейная фаза слева; нелинейная фаза справа.

На следующем рисунке показан результат для прямоугольной волны частотой **3 кГц**. Различия между линейной и нелинейной фазой, хотя и очевидны, менее существенны, поскольку основная частота находится выше точки пересечения, а низкочастотный динамик вносит незначительный вклад из-за низкочастотной характеристики 4-го порядка. Благодаря разработанной системе можно изучить еще одну интересную особенность линейно-фазовой системы - эффект поперечного наклона.



Частотный диапазон **3 кГц**, линейная фаза, слева; нелинейная фаза, справа.

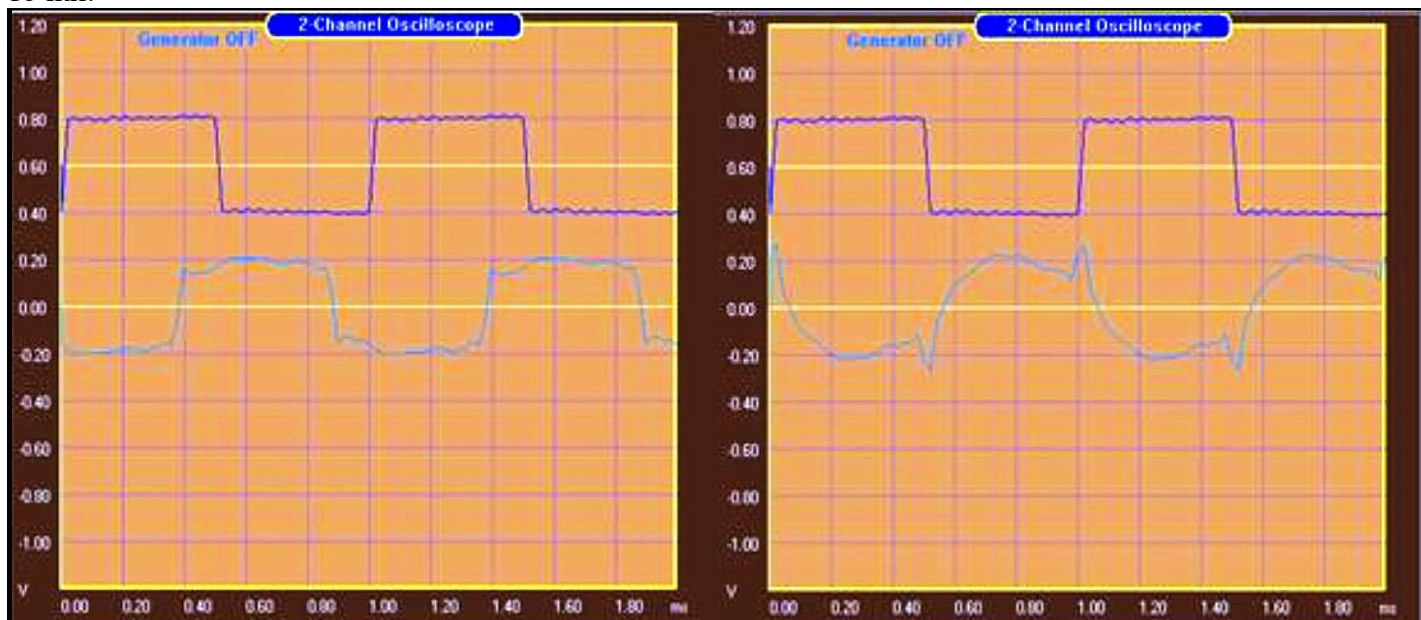
На следующем рисунке показан частотный диапазон **1 кГц** системы линейной фазы и нелинейной фазы, когда угол пересечения низкочастотного и высокочастотного динамиков увеличивается до 8-го порядка, 48 дБ/октава. С помощью эквалайзера Ultimate это легко сделать, выбрав новые значения 48 дБ/октава и нажав "Показать всю систему", чтобы рассчитать и загрузить новые фильтры.



Отклик линейной и нелинейной фазовых систем на частоте **1 кГц** с пересечением **8** порядка.

Этот результат следует сравнить с результатом на рисунке, где пересечение было 4-го порядка. Изменение порядка не влияет на линейную фазовую систему в расчетной точке. Отклик нелинейной фазовой системы существенно отличается исключительно из-за изменения порядка пересечения.

Наконец, на последнем рисунке показан эффект уменьшения пересечения до 2-го порядка. Отклик нелинейной фазовой системы теперь выглядит несколько лучше. Однако для в нелинейной фазовой системе высокочастотный динамик должен быть подключен с обратной полярностью, и поэтому начальный импульс высокочастотного динамика направлен в неправильном направлении. Следует отметить, что многие аудиоэнтузиасты считают, что кроссовер 2-го порядка звучит лучше, чем кроссоверы более высокого порядка. Это может быть результатом улучшенной формы волны, наблюдаемой здесь, и может свидетельствовать о потенциале линейного кроссовера и динамиков любого порядка, поскольку все они будут сохранять форму волны относительно проектной точки.



Отклик линейной и нелинейной фазовой системы на частоте **1 кГц** с пересечением **2**-го порядка.

Выводы

На момент написания этой статьи линейно-фазные громкоговорители все еще оставались новинкой в мире. Предыдущие попытки их создания привели к тому, что линейно-фазовые громкоговорители оказались слишком дорогими для широкого использования.

Для наиболее точной реализации линейно-фазовых громкоговорителей требуется полный набор измерений отдельных динамиков в сочетании с использованием технологии DSP в дополнение к системе активного усиления. Это действительно делает линейно-фазовую систему высокоточно

настраиваемым устройством - это огромная разница по сравнению с современным подходом в производстве акустических систем. Однако именно эта особенность делает линейно-фазовую систему идеальным устройством для самостоятельного изготовления.

В нашем мире все изготавливается на заказ с целью, как правило, превзойти аналогичные коммерческие образцы. Линейно-фазные громкоговорители предлагают все, что могут предложить громкоговорители с минимальной фазой, а затем часто вознаграждают вас значительно более высокой производительностью во временной области, как описано на страницах выше.

Похоже, что мои плохие и устаревшие привычки слушать/оценивать в сочетании с отсутствием стандартной методики прослушивания для оценки во временной/пространственной области акустические системы сговорились помешать мне по-настоящему критически прослушать полный комплект моих динамиков во время некоторых из моих оценочных тестов.

Во-вторых, не каждый музыкальный материал в одинаковой степени раскрывает все характеристики во временной области. Например, плотный, четко выраженный бас будет проявляться при звуках выстрелов и взрывов в DVD -фильмах, но не будет выделяться при низкочастотных сейсмических воздействиях на канале LFE. В ходе более тщательных тестов я выбрал характеристику “более плотный бас”, поскольку она была слишком очевидна для больших 18-дюймовых сабвуферов. Кроме того, ранее я указывал на эффект ощущение близости к оркестру, как будто я могу лучше различать расположение сидящих. Оба эти эффекта на самом деле не имеют ничего общего с частотной областью – они скорее относятся к пространственно-временной области.

Очевидно, что проектирование громкоговорителей с использованием характеристик частотной области в качестве основного (или единственного) критерия приводит к застою, чрезмерному упрощению и, в конечном счете, к неточной системе. Если бы я продолжал разрабатывать громкоговорители, которые никогда не раскрывали бы тонкостей временной или пространственной области, я бы даже не узнал о существовании поэтому у меня никогда не было бы мотивации что-то менять в таких тонкостях, что позволило бы порочному кругу продолжаться.

Очевидно, что ухо анализирует поступающий звуковой стимул в два этапа: (1) местоположение - здесь исследуется переходный процесс стимула, и (2) сигнал – здесь исследуются спектральные свойства стимула. Эти два процесса всегда работают в тандеме. Поэтому важно, чтобы громкоговоритель подавал неискаженные сигналы в слуховую систему для обеспечения правильной обработки обоих каскадов. Итак, я здесь.

Я изо всех сил пытаюсь выйти из “рамок частотной области” и окунуться в новый мир временных, частотных и пространственных характеристик современных громкоговорителей. Но даже на этих ранних этапах внедрения новой технологии я нахожу это уже очень полезным. Это связано с тем, что очевидно, что новая, точная и реалистичная технология акустической трансдукции реализуется гораздо более доступным коммерческим способом.

Спасибо за чтение. Богдан

Приложение А Источник: http://en.wikipedia.org/wiki/Sound_localization

Боковая информация (слева, впереди, справа)

Для определения бокового направления входного сигнала (слева, спереди, справа) слуховая система анализирует следующую информацию о сигналах уха: • Межфонические временные различия Звук с правой стороны достигает правого уха раньше, чем левого.

Слуховая система оценивает:

межфонические временные различия по фазовым задержкам на низких частотах
и групповые задержки на высоких частотах.

Различия в уровне звуковых сигналов

Звук, исходящий с правой стороны, имеет более высокий уровень в правом ухе, чем в левом, потому что голова закрывает левое ухо. Эти различия в уровнях являются весьма существенными. Перепады уровней сильно зависят от частоты и увеличиваются с увеличением частоты.

Для частот ниже 800 Гц в основном оцениваются межфонические временные различия (фазовые задержки), для частот выше 1600 Гц в основном оцениваются межфонические различия в уровнях.

Между 800 и 1600 Гц существует переходная зона, где оба механизма играют определенную роль.

Точность определения местоположения составляет 1 градус для источников, находящихся перед слушателем, и 15 градусов для источников, расположенных по бокам.

Люди могут различать разницу во времени между звуками, составляющую 10 микросекунд или меньше.