

# Измерение и калибровка систем звуковоспроизведения

Флойд И. Тул, пожизненный член AES  
([soundnwine@sbcglobal.net](mailto:soundnwine@sbcglobal.net))

*Консультант в Harman International*

Перевод В.В.Золотарёв  
[www.vitalymusic.com](http://www.vitalymusic.com)

Измеренный статичный амплитудный отклик в месте прослушивания, в помещении, является общепринятым показателем качества звука в системах воспроизведения. Схемы эквализации настраивают кривую помещения в соответствии с заданной целью, полагая, что это обеспечивает хорошее и стабильное звучание. В этой статье рассматриваются как небольшие, так и крупные площадки, от домашних кинотеатров до кинотеатров, в поисках методологии калибровки, которую можно было бы применить во всей индустрии звука. В настоящее время большая часть индустрии придерживается общей философии, но звук в кино является проблематичным исключением. Указаны некоторые изменения в текущей практике.

## 1 ВСТУПЛЕНИЕ

На протяжении десятилетий считалось, что амплитудный отклик статичного состояния, измеренный с помощью омни микрофона в месте прослушивания, является важным показателем того, как будет звучать система. Такие измерения стали известны как общие “кривые комнаты”. Это убеждение имеет давнюю историю в профессиональной среде, и теперь оно проникло в потребительское аудио с продуктами включающими автоматизированные возможности измерения и эквализации. Подразумевается, что путём проведения измерений на месте и манипулирования входным сигналом таким образом, чтобы кривая помещения соответствовала заданной целевой форме, можно устранить дефекты громкоговорителей и помещений. Это заманчивая маркетинговая история.

В профессиональном звуке (кроме кино), для измерения статичного амплитудного отклика, использовался традиционный процесс анализа розового шума в реальном времени (АРВ). Сегодня, проектирование и настройка системы звукоусиления обычно включает измерения в окне времени, которые могут улавливать прямой звук с возможностью выбора количества ранних и поздних отражений. Как правило, целью является плоский и плавный отклик прямого сигнала с небольшими отклонениями. Несмотря на то, что окончательные корректировки могут включать субъективное мнение, данные измерения обеспечивают основу для определения эффективности системы.

Качество звука имеет фундаментальное значение во всех аспектах звукоиндустрии, но возможно, больше всего при воспроизведении. Тембральный/спектральный характер громкоговорителей и помещений влияет на творение, как во время его создания в студиях звукозаписи и на стадиях дубляжа, так и при воспроизведении в потребительской среде.

Если потребители хотят услышать, то что создали артисты, необходимо получить серьёзное единообразие на протяжении всего процесса. Это “круг ошибок”, показанный на рис. 1. Чтобы система функционировала разумно, инженеры по микшированию и мастерингу должны воспринимать звук, подобный тому, что слышат их клиенты.

Зная, что потребительские аудиосистемы не обязательно очень хороши, в студиях часто использовали “плохие” громкоговорители для проверки своих миксов. Проблема в том, что громкоговорители могут быть “плохими” бесчисленными способами. Доминирующими характеристиками недорогих аудиоустройств являются отсутствие низких частот и низкая выходная мощность. Для имитации этого можно использовать фильтр высоких частот в тракте воспроизведения сигнала. Книга автора [1] (гл. 2 и 18) иллюстрирует прошлую и нынешнюю ситуацию в области потребительских и профессиональных громкоговорителей. Плоская АЧХ на оси, несомненно, является инженерной задачей для большинства этих систем. Те, которые значительно отклоняются, получают более низкие оценки при двойных слепых тестах. Хотя есть ещё кое-что, что следует учитывать, ровная АЧХ прямого звука, является основой для большинства воспроизводимых звуков.

С точки зрения качества звука лучшие образцы потребительских громкоговорителей неотличимы от лучших студийных мониторов. Цель этой статьи - определить ключевые переменные в системах воспроизведения звука, которые могут привести к процессу калибровки для мониторинга во время творческого процесса, а также для систем воспроизведения в аудиториях любых размеров.

Следующие обсуждения будут охватывать как большие, так и малые звуковые системы: публичные кинотеатры, домашние кинотеатры и стереосистемы для частного пользования,

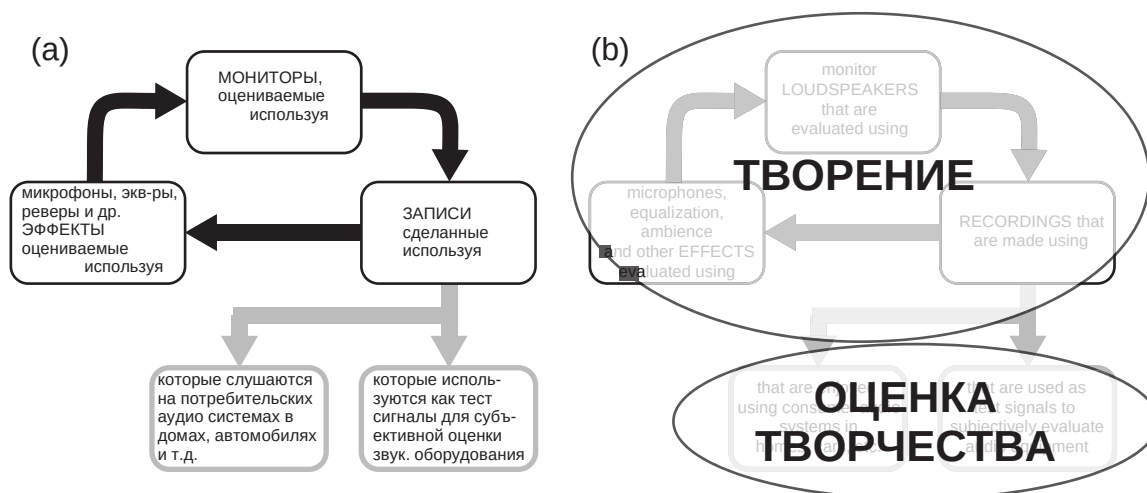


Рис. 1. “Круг ошибок” в индустрии звука. Инженерам по микшированию и мастерингу необходимо слышать то, что, скорее всего, услышат их клиенты. Две области, показанные на (b), должны иметь фундаментальное сходство. Из [1] Рисунок 2.3.

студии дубляжа в кино, и студии записи музыки. Физика возникновения и распространения звука в них одинакова, как и процессы восприятия слушателей, поэтому общие принципы должны быть одинаковыми.

## 2 ЗВУКОВЫЕ ПОЛЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ

Звуки, достигающие места прослушивания, включают как характеристики источника звука (например, спектральная/амплитудная характеристика и направленность) так и помещения, через которое передаётся звук (тип и расположение акустических материалов и их влияние на отражённое звуковое поле). Слушатели определяют аспекты качества звука (тембр), а также (благодаря би-науральному слуху) пространственные атрибуты: локализацию, визуализацию, охват и т.д. Некоторые данные свидетельствуют о том, что восприятие тембра и пространства сопоставимы по важности, и, возможно, не полностью отделимы (обсуждается в [1] 8.2.1 и 20.1). Звуковые сигналы, способствующие пространственному восприятию, не выявляются при измерениях статичной амплитудной характеристики, а отсутствие распознавания направления делает измерения с временным окном неоднозначными. Поэтому необходимо понимать спектральные и направленные свойства источников звука, а также звукоотражающее поведение мест прослушивания, чтобы предвидеть акустические и перцептивные события [2].

### 2.1 Зависимость направленности источника звука от частоты

Длина волн слышимого спектра (20Гц–20кГц) находится в диапазоне от 17м до 17мм. В результате распределение излучаемых звуков изменяется с частотой в зависимости от размера звукоизлучающей поверхности. Не имеет значения, рассматриваем ли мы голоса, музыкальные инструменты или громкоговорители. Низкие частоты от большинства источников, в общем, излучаются всенаправленно, поскольку длины волн намного больше размеров источника: индекс направленности (ИН) близок к нулю.

ИН можно интерпретировать как разницу в дБ между звуком на оси и общей излучаемой звуковой мощностью, которая в помещении представлена разницей между прямым звуком и отражённым звуковым полем. По мере увеличения частоты увеличивается и направленность большинства источников. Чем выше ИН, тем выше уровень прямого звука по сравнению с более поздними поступающими отражениями. Поэтому, как правило, люди подвергаются воздействию более сильных отражённых звуковых полей на низких частотах, нежели на высоких, будь то живой концерт, беседа в коридоре или громкоговоритель в комнате. На рис. 2 показаны примеры ИН некоторых музыкальных инструментов, голоса и громкоговорителей.

Некоторые музыкальные инструменты, особенно струнные, демонстрируют очень сложные диаграммы направленности, поэтому это упрощение; Мейер показывает гораздо более подробные данные в своей книге [3]. Важно отметить, что они попадают в тот же диапазон направленности, что и громкоговорители. У громкоговорителей очень чётко показана важность размера источника низкочастотной энергии, при этом кривая индекса направленности постепенно выравнивается по мере уменьшения площади излучения — размера и/или количества низкочастотных динамиков. Также наблюдается уменьшение ИН по мере расширения угловой дисперсии высокочастотного рупора, ещё больше уменьшаясь у небольшого купольного твитера в домашней колонке.

Независимо от спектра прямого звука музыкальных инструментов или громкоговорителей, воспроизводящих записи этих инструментов, статичное звуковое поле в обычной комнате будет демонстрировать версию этого спектра, повышающегося на более низких частотах. Концертные залы с высокой отражающей способностью пытаются сохранить ограниченную звуковую отдачу музыкальных инструментов и голосов в отражениях, донося её как можно больше до слушателей, не маскируя при этом временные детали в музыке и все же создавая приятное ощущение окружения. Это сложный акт акустической балансировки. Комнаты в которых мы слушаем музыку гораздо менее отражающие:

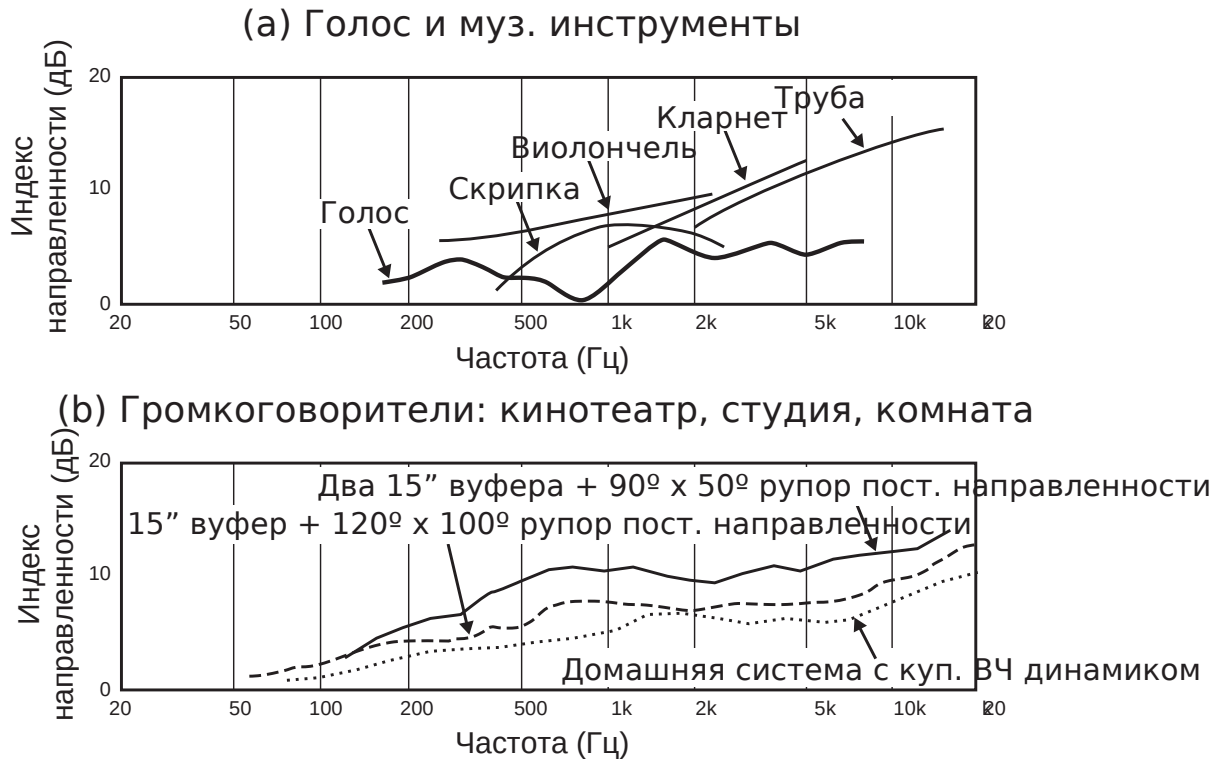


Рис. 2. (а) Упрощённые индексы направленности (ИН) для некоторых музыкальных инструментов [3]. Голосовые данные взяты из [1] Рис. 10.3. (б) Индексы направленности для большой системы громкоговорителей кинотеатра с двумя низкочастотными динамиками и рупором  $90^\circ \times 50^\circ$ , студийной мониторной системы с одним низкочастотным динамиком с рупором  $120^\circ \times 100^\circ$  и трёхполосной домашней конусно-купольной системой.

при этом ощущение пространства мы получаем из самих записей, и регулятор громкости изменяет громкость по желанию. Громкоговорители, спроектированные с плоскими частотными характеристиками, чтобы точно воспроизводить изначальную тембральную характеристику записанных звуков, поэтому будут демонстрировать повышенную выходную мощность звука на более низких частотах. Единственными исключениями будут устройства, предназначенные для поддержания высокого ИН на низких частотах.

## 2.2 Зависимость отражений от частоты в помещении

Значительная НЧ энергия в фильмах и музыке требует серьёзной звукоизоляции, чтобы предотвратить её проникновение в соседние помещения. Подавление передачи звука на НЧ требуют массивных и жёстких стен с большими промежутками между слоями. При небольшом мембранном поглощении басовых звуков внутри помещения, уровень их отражений увеличивается, как и время реверберации. Низкочастотное поглощение в больших помещениях и на необходимом уровне очень дорого и часто не обеспечивается. На рис. 3(а) показано время реверберации в кинотеатрах и студиях дубляжа, представленное в отчёте SMPTE B-chain[4]. Существует широкий разброс на низких частотах, и только “эталонный” кинотеатр (В) и две студии дубляжа (Е и F) демонстрируют существенное низкочастотное поглощение. Очевидно, что эти помещения оправдали дополнительные расходы на акустическую обработку.

В кинотеатрах сиденья занимают большую часть внутренней поверхности, и направленные громкоговорители нацелены на эти места.

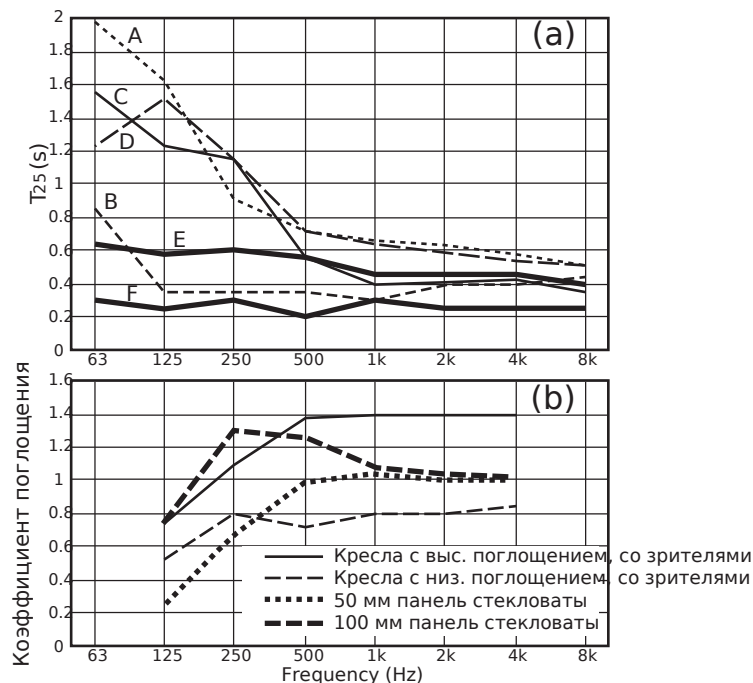


Рис. 3. (а) Время реверберации в четырёх кинотеатрах (А – D) и двух студиях дубляжа (Е и F) из [4]. Рис. 3(б) Коэффициенты поглощения двух типов театральные кресел из [5] и для двух размеров изоляции из стекловолокна серии R 700 от [www.owenscorning.com](http://www.owenscorning.com).

Рис. 3(б) показывает, что даже кресла с мягкой обивкой дают незначительное поглощение звука на НЧ (существует лишь небольшая разница между поглощением занятого и незанятого места) [5]. Волокнистые поглощающие материалы, обычно используемые на внутренних поверхностях, также оказывают незначительную помощь на низких частотах. На примере кинотеатров А, С и D видно, что широко используемый 50 мм материал способствует быстро растущему времени реверберации ниже 500 Гц, рис. 3(а). Только дорогостоящее применение низкочастотных поглотителей предотвращает накопление отраженной звуковой энергии на низких частотах, но это не распространено в большинстве кинотеатров. Большая часть СЧ и ВЧ звука поглощается при первом контакте с материалом, оставляя мало энергии для отражений. Поэтому рассеянная реверберация на них невозможна.

Особая проблема комнатных резонансов и стоячих волн в небольших помещениях является сильным стимулом для их подавления. Комнаты в деревянных каркасных домах имеют некоторое естественное низкочастотное мембранное поглощение [6]. В остальном поглощение, обеспечиваемое коврами, порттьерами и мягкой мебелью, аналогично кривым на рис. 3(б). Специально построенные домашние кинотеатры и комнаты контроля в студиях обычно акустически изолированы, что требует массивных стен. Поэтому они тоже демонстрируют проблемные стоячие волны, которые нуждаются в ослаблении.

Подводя итог, с живым и воспроизведённым звуком используя типичные громкоговорители в типичных закрытых помещениях, мы, как правило, можем ожидать, что по мере снижения частот звуковое поле помещения будет (а) содержать больше отражений и (б) повышать уровень звука по мере накопления отраженной энергии. Это естественная акустика в действии. Возможно, и даже наверняка, что эти свойства распознаются человеческим процессом восприятия и каким-то образом включаются в наши ожидания.

### 2.3 Звуковые поля в спец. помещениях со спец. громкоговорителями

Следующий пример взят из ранних исследований автора в 1985-86 годах. Громкоговоритель был трехполосный с плоской АЧХ на оси, но со значительно неравномерной вне оси. Местом проведения была прототипная комната для прослушивания, на которой был основан стандарт IEC 268-13 [7], описанный в приложении [8]. Время реверберации составляло около 0,3 с на частотах выше 300 Гц, увеличиваясь максимум до 0,8 с на 40 Гц. Все безэховые измерения проводились на расстоянии 2 м в камере с клиньями длиной 1 м, откалиброванной до 30 Гц с использованием эталона в открытом поле. Следующие данные взяты из [9], ч. 2, раздел 7.2.

На рис. 4(а) показаны измерения громкоговорителя в безэховой комнате, в которых четко видны отличные характеристики на оси, а также нежелательные нерегулярные характеристики вне оси. Аналогичные отклонения можно ожидать и в общей выходной мощности звука, в которой преобладает энергия, излучаемая вне оси.

На рис. 4(б) показаны основные компоненты звуковых полей в том виде, как они предполагались в месте прослушивания. В дополнение к прямому звуку (отклику на ось) существует энергия первых отражений от пола,

потолка и стен, полученная от соответствующих безэховых внеосевых откликов, предполагающая спектрально точные отражения и включающая затухание по закону обратных квадратов. Также присутствует оценка вклада общей мощности излучаемого звука, рассчитанная на основе взвешенной суммы измерений на экваториальной и полярной орбитах 360° вокруг громкоговорителя, изменённой в соответствии с частотно-зависимым поглощением в помещении, выявленным при измерениях времени реверберации.

Первое наблюдение состоит в том, что если кто-то хочет предугадать, как этот громкоговоритель может звучать в помещении, необходимо обратить внимание на мощность звука на НЧ - это самая высокая кривая на рис. 4(б) - и прямого звука на самых ВЧ по той же причине. На СЧ все три компонента вносят значительный вклад, поэтому необходимо измерить все три. АЧХ на оси сама по себе является недостаточной информацией. Полные 360° данные, обработанные должным образом, так же являются важной информацией. Суммарная энергия измеренных характеристик даёт расчётную статическую кривую помещения, показанную сдвинутой вверх на 10 дБ.

Затем громкоговоритель был размещён в трёх возможных, для стерео, местах в комнате для прослушивания. На рис. 4 (с) показаны усреднённые измерения в шести местах вместе с прогнозируемой кривой из рис. 4(б). Выше примерно 400 Гц кривые по существу идентичны, и прогноз хорошо согласуется с измерениями. Ниже этого преобладает эффект стоячих волн в помещении и относительное расположение громкоговорителя и слушателя/микрофона определяет акустическое взаимодействие на разных частотах. Прогнозируемая кривая даёт оценку верхнего предела установившихся уровней звука, но разрушительные помехи стоячих волн существенно снижают общую энергию низких частот. Ниже частоты перехода/Шрёдера, здесь около 300 Гц, доминирующим фактором является помещение; выше неё в значительной степени громкоговоритель.

На рис. 4(д) сделана попытка проиллюстрировать звуки в месте прослушивания в типичной домашней комнате или домашнем кинотеатре: разные части излучаемого звука доминируют на разных частотах определяемых частотно-зависимой направленностью громкоговорителя и отражающей природой помещения. Очевидно, что частоты, на которых происходит переход, будут зависеть от конструкции громкоговорителей и акустики помещения. В общем, по мере того, как громкоговорители становятся более направленными и/или помещения становятся менее отражающими, переход снижается по частоте.

Эти данные иллюстрируют фундаментально важные понятия:

- При достаточном количестве безэховых данных громкоговорителей можно с разумной точностью прогнозировать средние и высокочастотные акустические события в пространстве прослушивания с известными свойствами.
- Существует разница между спектром прямого звука, поступающего к слушателю, и спектром звука устойчивого уровня который достигается после поступления всех отражений. Форма статической кривой помещения определяется звуком громкоговорителя изменённого геометрии и



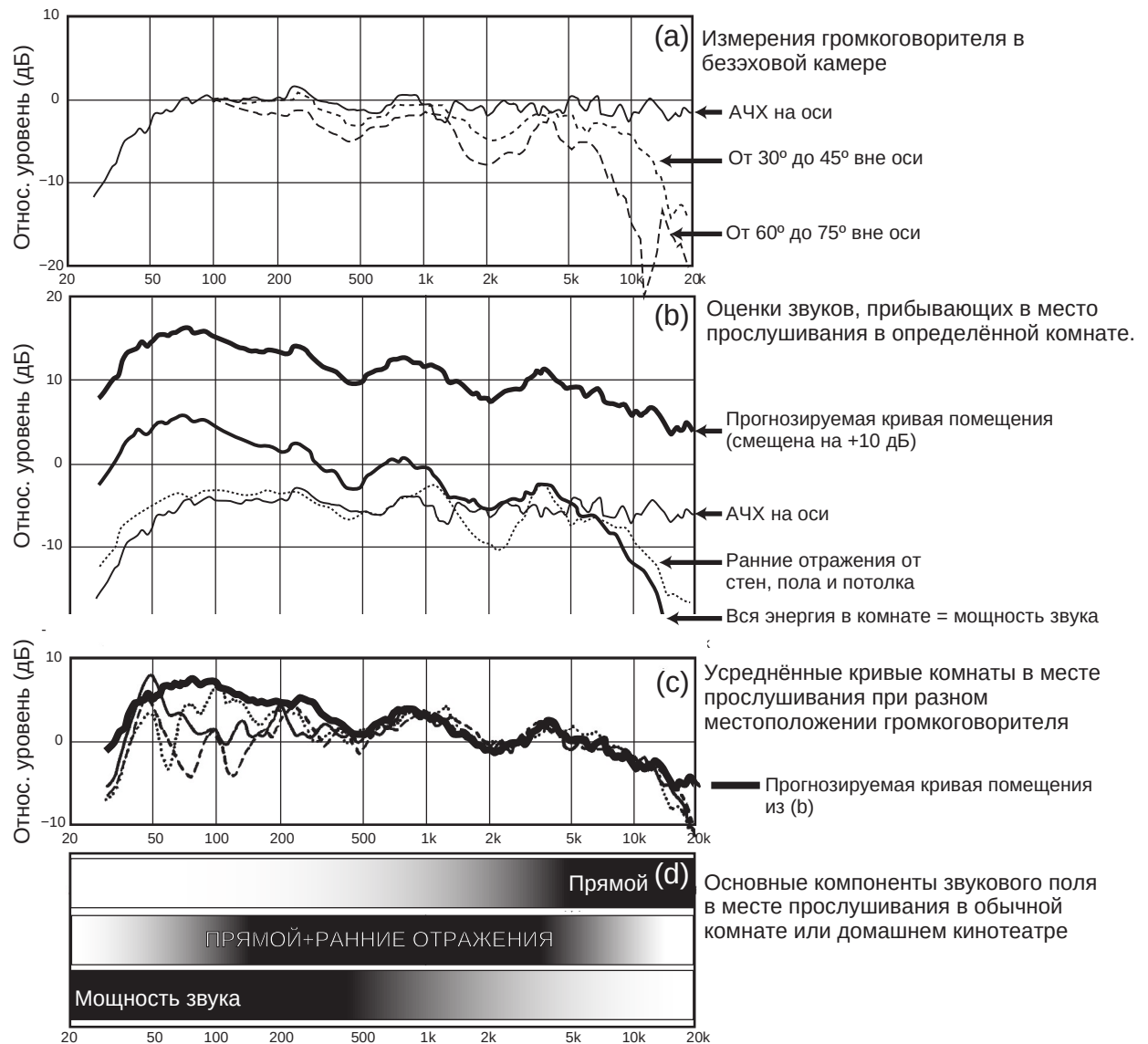


Рис. 4. Прогноз прямого и отражённого звуковых полей в помещении на основе безэховых измерений громкоговорителя. Описания приведены на рисунке и в тексте. Данные из [9] Часть 2.

частотно-зависимой отражающей способностью этого помещения. В безэховом помещении его кривая будет идентична отклику громкоговорителя на оси. По мере увеличения отражений в помещении его кривая будет подниматься к прогнозируемой кривой, так как звуки вне оси будут добавляться к результату. Уровни НЧ и СЧ будут нарастать в течение короткого промежутка времени, влияя на то, что измеряется и слышится. На очень высоких частотах прямой звук постепенно становится доминирующим. Поэтому, не зная свойств громкоговорителя и помещения, статичная кривая последнего будет передавать неоднозначную информацию.

- В обычных помещениях АЧХ на оси не является доминирующим физическим фактором. Однако прямой звук имеет высокий приоритет в восприятии, устанавливая эталон, с которым сравниваются более поздние отражения при определении таких

важных восприятий как локализация, пространственные эффекты и тембр. В этом примере при измерениях в помещении доминировал плохой, внеосевой звук, что при прослушивании приводило к ухудшению слышимости тембра. Выравнивание кривой помещения разрушило бы единственную хорошую особенность громкоговорителя — осевая АЧХ. Такое выравнивание не может изменить направленность громкоговорителя; решение проблемы - найти громкоговоритель получше. Соответствующие безэховые данные громкоговорителя выявили бы проблему до проведения измерений или прослушивания.

- Ниже частоты перехода/Шрёдера резонансы помещения и связанные с ними стоячие волны являются доминирующими факторами в том, что измеряется и слышится. Они уникальны для каждой комнаты и сильно зависят от местоположения. Реальность смогут прояснить только измерения на месте. Различные расположения громкоговорителей и слушателей

приведут к различному качеству и уровню НЧ.

- В комнатах и домашних кинотеатрах или в любом акустически хорошо заглушённом помещении, таком как кинотеатр, традиционная диффузная реверберация в основном отсутствует. Как обсуждалось в [2], звуковые поля в помещениях с низкой реверберацией отличаются от описанных в классической акустике.

Различные источники звука в разных помещениях изменяют структуру звуковых полей, показанную на рис. 4(d), перемещая области перехода вверх или вниз по шкале частот, но основные принципы остаются. Кинотеатры и студии дубляжа различаются, и отчёт SMPTE B-chain [4] даёт небольшой пример того, чего можно ожидать от типичных громкоговорителей и акустической обработки. Если грубо, то на НЧ имеются свидетельства значительных отражений в помещении. От 200 Гц до 600-1000 Гц, примерно первые 50 мс, слушатели получают смесь прямого звука и нескольких ранних отражений. Наконец, на верхних трёх октавах и выше, доминирующим является прямой звук.

## 2.4 “Эквализация комнаты” — неправильное название

Утверждение, что одно стационарное измерение в помещении — кривая помещения — может надёжно предсказать реакцию человека на сложное звуковое поле, очень смелое. Такие измерения не учитывают направление или время отражений. Временное окно измерения полезно для разделения событий во временной области, но оно также игнорирует направление, по которым поступают звуки. Слушатели как-то реагируют на эти сигналы, демонстрируя навыки отделения звука помещения от тембральной индивидуальности громкоговорителей и адаптации к различным обстоятельствам. В конце концов, это то, что происходит на живых (без усиления) музыкальных мероприятиях. Это означает, что не всё измеренное имеет значение для восприятия, и наша реакция на такие звуковые поля не может быть постоянной, мы адаптируемся (см. [1] главы 5-11 и раздел 11.3.1 и [2] раздел 2.5). Поэтому простые измерения не могут быть окончательными.

Полагая, что у нас была убедительная цель для кривой комнаты, не все неровности, замеченные в ней, указывают на наличие проблемы. Даже если проблема существует, визуальные сигналы не показывают однозначно её причину и, следовательно, не приводят к соответствующему решению, как было показано на рис. 4. Появление DSP принесло с собой множество исследований того, что можно сделать, когда отправной точкой является измерение в помещении, в котором преобладают акустические помехи с не минимальной фазой. Женеро [10] даёт хороший обзор ранних усилий, а Филдер [11] даёт подробный анализ других подходов. Результаты неоднозначны, при этом обнаруживаются существенные ограничения в отношении того, что можно исправить. Основная проблема заключается в том, что Дженоеро чётко сформулировал: “[Мы] не заинтересованы в устранении всех эффектов комнаты. Вместо этого мы хотим удалить любые слышимые оттенки, очевидные для слушателя”.

Применение DSP, требует руководства со стороны психоакустики, связывающей то, что мы измеряем, с тем, что мы слышим, и исторически этого значительно не хватало.

Эквализация очень ограничена в том, что она может “исправить”, однако существует мнение о том, что изменение сигнала, подаваемого на систему, состоящую из неизвестного громкоговорителя в неизвестной комнате, может её “выровнять” или “откалибровать”. Практически, в аудитории с несколькими слушателями, обычная эквализация не может:

- Добавить или удалить отражения
- Изменить времени реверберации
- Уменьшить изменения в НЧ от сиденья к сиденью
- Корректировать частотно-зависимую направленность мониторов
- Компенсировать частотно-зависимое поглощение акустических материалах и мебели. Исключение составляет сильно отражающее звуковое поле на очень низких частотах.

Важно разделять события выше и ниже частоты Шрёдера. Выше неё, на СЧ и ВЧ, возникают акустические помехи, когда прямые и отражённые звуки складываются в микрофоне. Если частотное разрешение измерения достаточно высокое — обычно 1/3 октавы или выше, — результирующие пики и провалы на кривой помещения могут выглядеть тревожно. Специалист по калибровке или автоматизированный алгоритм выравнивания будут стремиться сгладить кривую. Но т.к. эти явления не следуют обычной зависимости между частотой и фазой, то не могут быть исправлены обычным эквалайзером.

Однако прямые и отражённые звуки обычно исходят с разных направлений, которые микрофон не может различить, но бинауральный слух может. Ссылки [1, 2, 12–14] фокусируются на некоторых последствиях от отражений. Оказывается, что в большинстве помещений малого и среднего размера для воспроизведения звука, слушатели находят эти разнонаправленные отражения в основном безвредными, даже полезными, если громкоговоритель имеет относительно постоянную направленность. Общим ощущением оказывается информация о пространстве комнаты, а не разрушающая тембр комби-фильтрация. Это, безусловно, верно для любительского прослушивания, но профессионалы могут обнаружить, что менее отражающее пространство предпочтительнее для микширования, но, возможно, не для мастеринга [12]. Поэтому эти измерения вводят в заблуждение, и даже если бы эквализация была способна устранить такие отражения, нужно в начале решить, необходимо ли это. В целом, эквализация “ошибок” спектральных отклонений, обнаруженных в нескольких местах прослушивания, может добавить новые спектральные отклонения к общей выходной мощности громкоговорителя, которая излучается по всей комнате. Из-за этого, существует значительный риск ухудшения характеристик хороших громкоговорителей.

Ниже частоты Шрёдера эквализация играет определённую роль. В диапазоне верхнего баса взаимодействия на соседних границах влияют на звуковую энергию, излучаемую в помещение. Показанные Эллисоном [15, 16] и обсуждённые в главе 12 [1], эти колебания могут быть скорректированы эквалайзером,

используя пространственно-усреднённое измерение, что бы выявить нижележащую кривую. В диапазоне НЧ эквализация может быть очень полезной для ослабления заметных резонансов помещения в одной точке прослушивания. В помещениях со значительным поглощением НЧ, это будет более эффективно. В качестве альтернативы, с помощью пассивных и активных комбинаций нескольких сабвуферов можно управлять стоячими волнами и уменьшить колебания от места к месту. Тогда общая эквализация может быть полезна для нескольких точек (см. [2,17–20] и [1] гл 13). Поэтому измерения на НЧ в помещениях разных размеров будут по-разному полезны, с учётом того, что целевая АЧХ статичного состояния необязательно должна быть линейной.

В заключение, есть причины проявлять большую осторожность при применении эквалайзера на основе обычных измерений в помещении. Однако это определённо выгодно на более низких частотах, и последующие обсуждения покажут, что выравнивание, основанное на безэховых данных, также полезно при создании превосходных громкоговорителей.

### 3 КРИВЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ: ПРОГНОЗ И РЕАЛЬНОСТЬ

Цель, поставленная в этой статье, состоит в том, чтобы найти единую методологию для проектирования и калибровки систем воспроизведения звука всех видов. Следующие обсуждения посвящены звуку в кинотеатрах и в студиях дубляжа, т.к. здесь существуют стандарты [21, 22], и мы хотим объяснить, как они работают. Саундтреки к фильмам, созданные для кинотеатров, также доставляются широкой аудитории через CD, ТВ и потоковые передачи, системы воспроизведения которых не соответствуют этим стандартам, а это означает, что совместимость с миром звука за пределами кино вызывает озабоченность. Музыка использует эти средства доставки для потребителей и в свою очередь иногда проникает в мир кино в виде концертных видео, поэтому между кино и музыкой наблюдается значительное перекрытие, и всё это доказывает необходимость единого всеобъемлющего стандарта, изменяемого по мере необходимости с учётом особенностей мест воспроизведения.

На чем должна основываться цель: на прямом звуке или на статичном? Выбор есть, и ответом может быть комбинация двух, используемая в разных частях частотного диапазона. Только на открытом воздухе или в очень глухих помещениях прямой и статичный звук будет идентичен. В реальном мире помещения отличаются тем, как они передают ранние отражения, благодаря их геометрии и акустической обработке. Итак, прежде чем идти дальше, мы должны определить показатели, которые отражают важные различия между прямым и статичным звуковыми полями, которые неизбежно будут.

#### 3.1 Измерение отражений в комнате

Понятие времени реверберации (ВР) произошло при измерении рассеянных звуковых полей концертных залов и аудиторий. Желательное среднечастотное ВР, измеренное с использованием всенаправленного источника звука в этих пространствах, варьируется от 1 до 2 сек или около того. В зависимости от предполагаемой музыкальной программы — зал является частью представления, и предполагается, что для измерений, всенаправленный источник является адекватным приближением ор-

кестра. В кино и домашних театрах сигналы от направленных и пространственных эффектов, а также ощущение пространства передаются через записанный звук. Комната не обязана вносить какой-либо вклад, но она и не должна его ухудшать.

Время реверберации (ВР) это время, необходимое для снижения уровня звука на 60 дБ, что намного превышает диапазон восприятия относящийся к системам воспроизведения. ВР, в кинотеатрах [4], почти такие же, как и в домах, и которые рекомендуются для домашних кинотеатров. [1, 2, 7, 8]: примерно от 0,2 с до 0,5 с. Хотя измерительные приборы дают нам значение ВР, на самом деле измеряется последовательность постепенно ослабевающих отражений — Время затухания отражений или, как предложено в 9.1 [4], просто Время затухания. Как и там, здесь будет использоваться термин "время реверберации" из-за его известности, но имейте в виду, что на самом деле измеряется.

ВР, несомненно, полезно для оценки мест с высокой отражающей способностью, но для наших целей лучшим показателем может быть: время накопления энергии — время после прямого звука, необходимое для того, чтобы звуковое поле поднялось до установившегося уровня. Это гораздо более короткое время, чем ВР, и, по-видимому, непосредственно затрагивает процессы восприятия, когда речь идёт о коротких звуках. Например, рис. 8(б) показывает, что в кинотеатре с ВР 2,5 сек, на частоте 50 Гц, уровень в пределах 2 дБ устойчивого состояния достигается за 90 мсек. При частоте 500 Гц ВР = 800 мсек, а время накопления энергии составляет 25 мсек. Это огромные различия, и хотя ВР является родственным параметром, оно далеко от временных событий, которые, вероятно, будут иметь значение. События, происходящие на очень ранних стадиях спада ВР могут иметь значение, но потребуются новая форма интерпретации.

Выводы Брэдли и др. [23], указывают на то, что ранние отражения оказывают огромное влияние на разборчивость речи — критический фактор в кино. Они пришли к выводу, что энергия ранних отражений, поступающая примерно в течение первых 50 мс после прямого звука, оказывает такое же влияние на разборчивость речи, как и равноценное увеличение энергии самого прямого звука. Это было верным как для нормальных, так и для слабослышащих слушателей. Далее они говорят: "Хотя важно избегать чрезмерного реверберирующего звука, добавление большого количества поглощения для достижения очень короткого времени реверберации может ухудшить разборчивость из-за снижения уровня ранних отражений". В качестве нового показателя качества помещений, они предлагают отношение энергии в течение первых 50 мсек импульсного отклика к энергии прямого звука, называв его Пользой ранних отражений (ПРО).

В дополнение к увеличению уровня амплитуды звука по мере поступления отражений, продолжительность исходного звука эффективно увеличивается. Результатом дополнительной продолжительности является увеличение громкости и снижение порога обнаружения — возможно, мы сможем услышать больше, чем можно предположить только по физическим уровням звука. Снижение порога может составлять примерно 3 дБ при удвоении длительности сигнала в диапазоне от 20 до 100 мс, понижаясь и дальше для более долгих длительностей [24]. Аналогично стоит отметить, что ранние отражения также снижают порог для обнаружения резонансов в громкого-

ворителях [25], делая дефектные громкоговорители более заметными и выявляя больше тембральных тонкостей в музыке. При записи и прослушивании стерео, ранние отражения могут уменьшить ухудшение тембра и потерю разборчивости речи в фантомном центре. Это помогает заполнить большой спектральный провал вокруг 2 кГц, создаваемый межслуховыми перекрёстными помехами ([26] и [1] раздел 9.3.1).

Лембругген [27] показал примеры из отчета SMPTE [4], в которых данные об общей энергии, похоже относятся к деталям измерений в частотной области и, следовательно, возможно, к восприятию, а не к ВР. В контексте концертных залов Брэдли и др. [28] обнаружили, что воспринимаемая сила басовых звуков связана с ранними и поздними отражениями и не имеет существенно-го отношения к времени реверберации на НЧ.

Здесь нужно учитывать много факторов, но есть несколько убедительных причин обратить внимание на ранние отражения и рассмотреть альтернативные критерии оценки качества акустических характеристик помещений, а не только ВР. В любом случае, измерения как ВР, так и общей энергии зависят от частоты, что подтверждает, что прямые и статичные звуковые поля имеют разные спектры в большинстве помещений.

### 3.2 Прогнозирование звуковых полей

Следующее дополняет информацию, представленную на рис. 2(b). На рис. 5(a) кривые направленности инвертированы, что даёт нам оценку общей мощности излучаемого звука, когда громкоговорители настроены на плоскую осевую АЧХ (с компенсацией потерь из-за экрана в кинотеатрах). Измерения ближнего поля с временным окном показывают, что на частотах выше 1-2 кГц, в кинотеатрах и на студиях дубляжа, преобладает прямой звук [4, 29-32]. Соответственно, кривые были скорректированы таким образом, чтобы ВЧ части были выровнены. Наибольшее влияние здесь оказывает воздух (в зависимости от расстояния), а не помещение. Ниже этих частот, отражённый звук, от постоянно расширяющейся дисперсии громкоговорителей, является основой для быстро растущей кривой у больших систем громкоговорителей с двумя НЧ динамиками и более низкого наклона для системы с одним НЧ динамиком. Размер источника звука здесь имеет значение. Следующие обсуждения будут посвящены кинотеатральной системе с двумя низкочастотными динамиками.

На рис. 5(b) показаны упрощённые данные двух НЧ динамиков на рис. 5 (a) затуханием на ВЧ из-за воздуха (расстояние 10 м), слегка отклоняющимся от плоского прямого звука для реалистичности. На уровне восприятия люди могут или не могут инстинктивно понимать, что распространение на большие расстояния приводит к потере ВЧ. Это вполне возможно с реальными источниками звука, но верно ли это для фильмов, где ожидаемое расстояние, скорее всего, будет связано с изображением на экране — то есть, действительно ли мы начнём верить? Это интересный вопрос.

Кривые ниже 1 кГц показывают, что может произойти, когда различное кол-во излучаемой энергии, отражаясь от границ помещения, приходит к слушателям. Кривая “типично отражающих” представляет собой авторскую интерпретацию данных ВР и звукопоглощения, показан-

ных на рис. 3, специально для кинотеатров А, С и D. Точность здесь не требуется. Форма кривой просто показывает, что в этих пространствах наблюдается значительное поглощение от 20 кГц до примерно 500 Гц, снижаясь на более низких частотах (рис. 3(b)). Следовательно разница между кривыми прямого и статичного звука в этом диапазоне частот меньше, чем в местах с высокой отражающей способностью. Комнаты с различными свойствами могут давать кривые, которые находятся в любом месте затенённого участка.

SMPTE ST 202 [21], ISO 2969 [22] и другие рекомендации требуют, чтобы системы были настроены на плоскую, статичную АЧХ ниже примерно 1 кГц.

Рис. 5(c) показывает, что в этих случаях плоский прямой звук терялся во всем, кроме очень заглушённых комнат. Высокочастотная часть отклика не меняется, потому что здесь слушатели находятся в доминирующем, прямом звуковом поле.

Означает ли это, что в системе недостаточно басов или у них смазаны атаки? Величина накопленной энергии НЧ после поступления прямого звука будет зависеть от отражательной способности кинотеатров на НЧ, которая значительно варьируется. Это также может зависеть от прослушиваемой программы, с возможными различиями между устойчивыми и переходными басовыми звуками. Время накопления энергии невелико (<200 мс), но разница в амплитуде может быть большой ( $\leq 10$  дБ). Если что-то из этого заметно слышно, это означает что студии дубляжа и кинотеатры должны иметь одинаковые громкоговорители и акустику — см. рис. 1. Если это невозможно или не практично, то можно выбрать промежуточную целевую кривую (в пределах заштрихованной области) и применить необходимую эквализацию. Невозможно решить это с уверенностью без специальных психоакустических исследований, выясняющих, насколько сильны звуковые дефекты и является ли простая эквализация подходящей компенсацией. Вполне возможно, что слушатели рассматривают повышение басов после плоского прямого звука как невинный компонент звука в помещении, к которому они адаптируются.

Прежде чем двигаться дальше, важно отметить, что уровень звука и ИН низкочастотников изменяются в зависимости от их близости к стене позади, с боку или полу. Установка в стену создаёт телесный угол 2л. Всё это эффекты отражений от поверхностей, которые изменяют излучаемую мощность звука на более низких частотах. Как обсуждалось ранее, они измеряются путём пространственного усреднения по площади аудитории, и эквализация является подходящим средством. Однако во многих кинотеатрах громкоговорители не встраиваются в стену, или акуст. обработка пространства за экраном недостаточна, что создаёт слышимые артефакты, которые вряд ли могут быть выявлены с помощью статичных измерений. Только серьёзная акустическая инспекция помещения может выявить такие проблемы.

### 3.3 Громко-тели в кинотеатрах и Икс-кривая

Прежде чем изучать текущие данные, давайте рассмотрим некоторые из прошлого. На рис. 6 показаны статичные кривые помещения для киносистем, имеющих плоские АЧХ на оси. Кривая Сноу 1961 года была скорректирована чтобы получить плоскую АЧХ прямого звука [33],



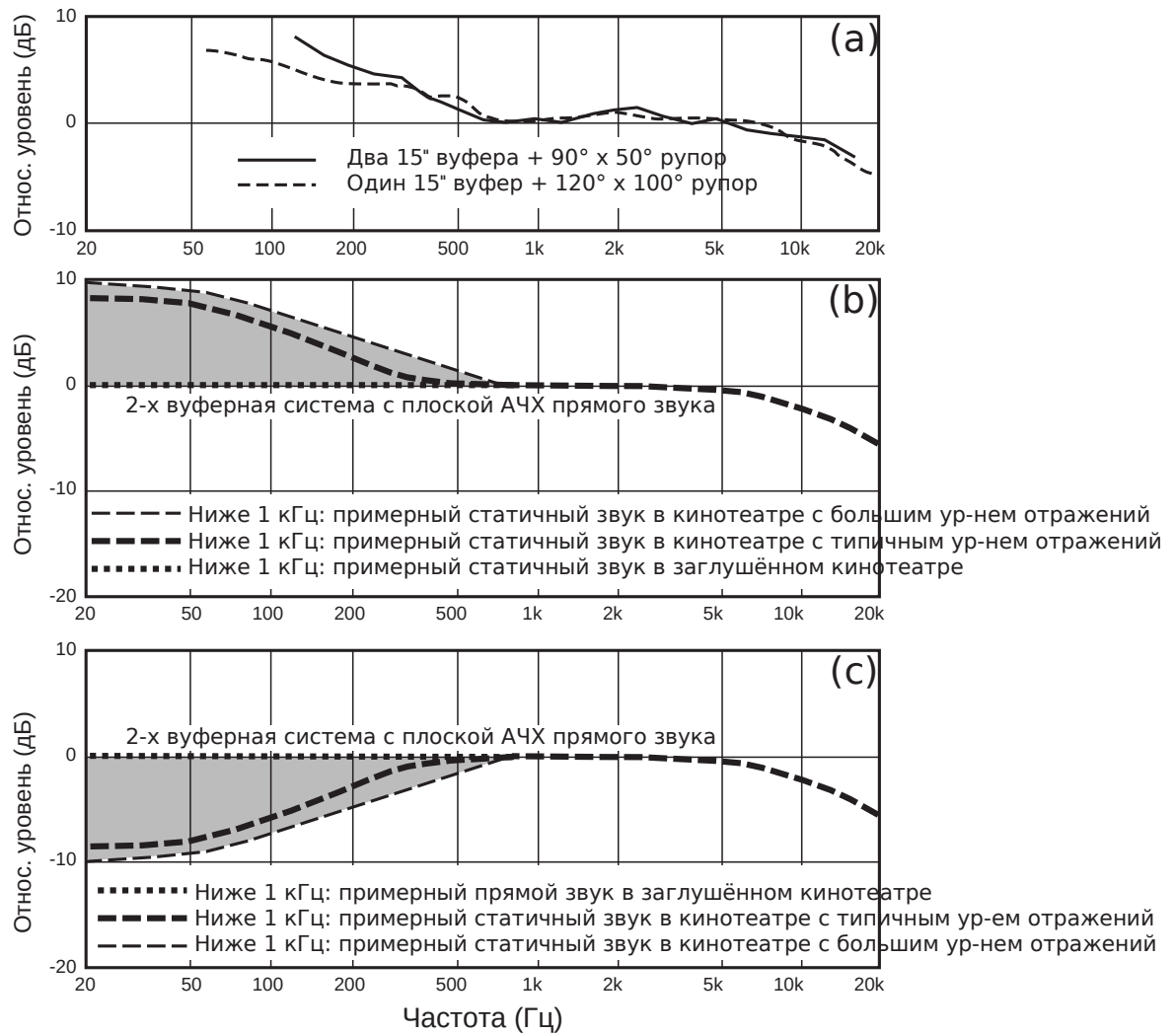


Рис. 5 (а) Расчётная мощность звука, излучаемая двумя системами громкоговорителей, показанных на рис. 2(б), при условии плоских АЧХ на осях. Рис. 5(б) Кинотеатральная система с двумя вуферами, с плоской АЧХ прямого звука, спереди экрана излучает звук в три разных места. Включает компенсацию потерь ВЧ из-за воздуха на расстоянии 10 м. Рис. 5(с) Последствия для прямого звука при выравнивании звуковой системы до плоской статичной кривой комнаты на низких частотах.

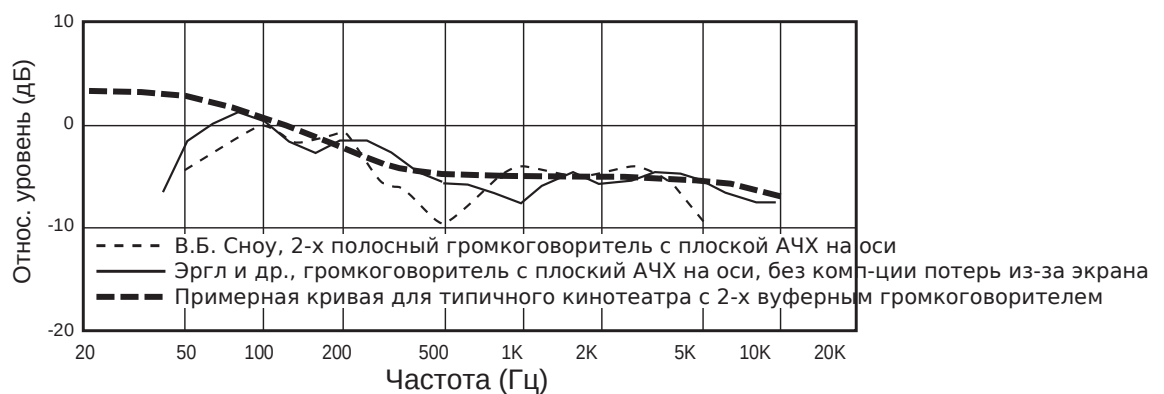


Рис. 6. Статичные кривые помещения для громкоговорителей кинотеатров большого формата с практически плоскими АЧХ прямого звука. Кривые сравниваются с предсказанной кривой в “типично отражающем” помещении с громкоговорителем с 2-мя вуферами, приведённым на рис. 5(б).

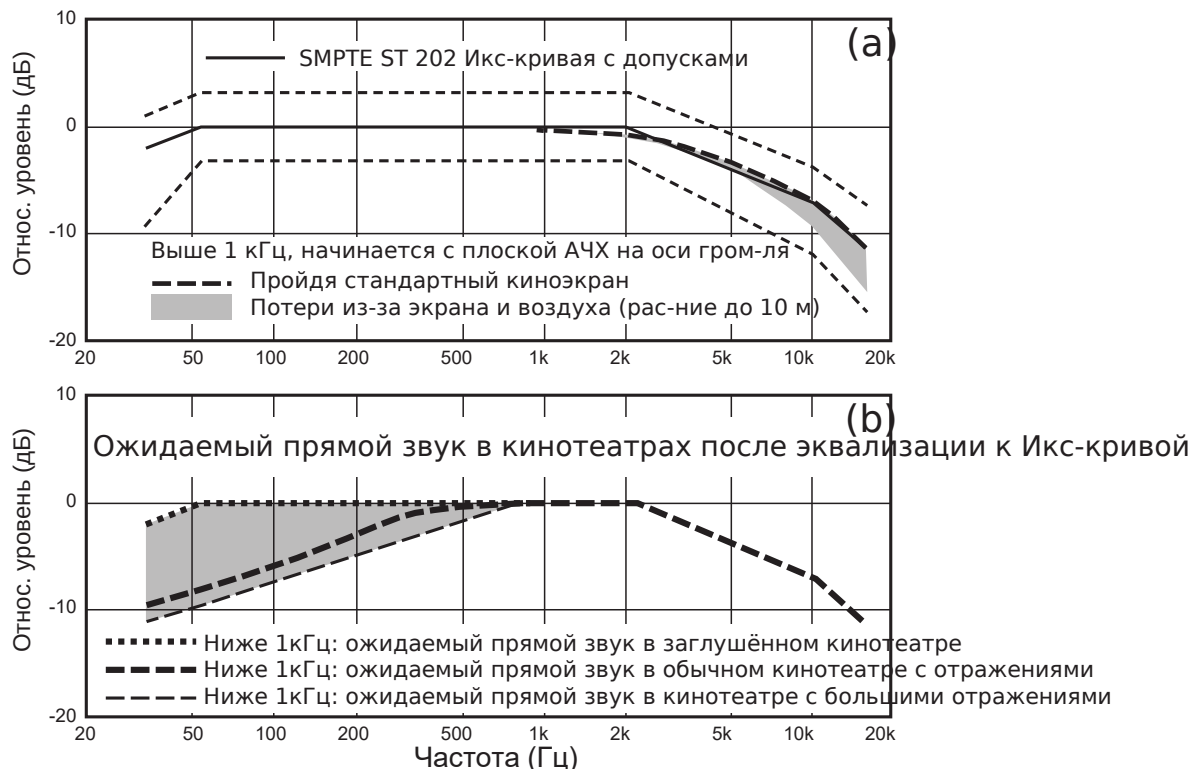


Рис. 7(а) Икс-кривая SMPTE [21] сравнивается на частотах выше 1 кГц с прямым звуком на оси громкоговорителя, излучаемого через стандартный экран кинотеатра. Затенённая область показывает дополнительный спад на ВЧ из-за потерь в воздухе, который увеличивается с расстоянием до слушателей. Рис. 7(б) Статичная Икс-кривая выше 2 кГц означает, что высокочастотный спад также присутствует в прямом звуке. Получение ровной статичной АЧХ ниже примерно 1 кГц означает, что прямой НЧ звук может оказаться заниженным. Здесь показаны прогнозы для прямого звука в кинотеатрах с различными отражающими характеристиками, в которых используется система громкоговорителей с двумя низкочастотными динамиками, адаптированная с рис. 5(с). Кинотеатры с другими отражающими характеристиками будут давать прямые звуковые кривые, попадающие в затенённую область.

а кривая Эргла и др. 1985 года [34] была скорректирована, чтобы компенсировать потери на ВЧ при прохождении звука через экран. Обе сравниваются с кривой “типично отражающей” комнаты на рис. 5(б). Наблюдается ожидаемый наклон от низких до средних частот, а также плоская, кривая с преобладанием прямого звука выше примерно 1 кГц. Также видны возможные проблемы с постоянством мощности звука на средних частотах в системе громкоговорителей старого кинотеатра.

Измерения такого рода встречаются редко в архивной литературе. К сожалению, существует мало общедоступной документации о важных экспериментах в начале 1970-х годов, когда была определена цель Икс-кривой в кинотеатре, рис. 7(а). SMPTE [21] стандарт и ISO [22] версии, был самым последним в серии эволюционных изменений, на которые повлияли многие факторы, как объяснил Аллен [35]. В то время возможности измерений были ограничены, т.к. анализаторы розового шума не могли выявить информацию о работе громкоговорителя во временной области и, скорее всего, она была доступна в неполной по форме. Звуковые дорожки также были значительно скомпрометированы по сравнению с современными цифровыми технологиями. В прошлом тенденция была на получение более широкой полосы пропускания, более плоской АЧХ, но высокочастотный спад остался в последней итерации стандарта.

В то время считалось, что “если комната настроена на розовый шум в качестве тестового сигнала, с наклоном 3 дБ/окт от 2 кГц, то первый прибывающий сигнал будет ближе к плоской АЧХ нежели к 3 дБ/окт спаду, наблюдаемому на анализаторе”. [35]. Это превратилось в распространённое убеждение, что высокочастотный спад у Икс-кривой при статичных измерениях на 2/3 расстояния прослушивания обеспечивает ровный прямой звук. Теперь мы знаем, что это не относится к современным громкоговорителям в современных студиях дубляжа и кинотеатрах — прямые и статичные звуки выше примерно 1 кГц по существу идентичны [4,29–32]. Другими словами, стандартизированный спад приводит к притуплению звука. Дальнейшие размышления привели к расширению понятия, в котором наклон кривой менялся в зависимости от размера помещения. Как будет видно, эта идея тоже нуждается в пересмотре.

Громкоговорители обычно предназначены для излучения плоской АЧХ на оси. Это означает, что для достижения плоской Икс-кривой ниже 2 кГц потребуются уменьшение низких частот, излучаемых громкоговорителями (см. рис. 6). Спад на ВЧ достигается автоматически за счет ослабления выс. частот экраном в кинотеатре. В течении десятилетий, Икс-кривая (рис. 7(а)) считалась международным стандартом для студий озвучивания фильмов и кинотеатров. Она не используется больше нигде.

На рис. 7(b) показан прогноз от низких до средних частот прямого звука на рис. 5(b), добавленный к высокочастотному спаду требуемому Икс-кривой. Прямой звук не только падает на высоких, но и на низких частотах тоже. Величина спада зависит от отражающей способности помещения и направленности низкочастотных динамиков. Если целью калибровки кинотеатров был ровный прямой звук, то попытка провалилась.

### 3.4 Подтверждение измерениями

Отчёт SMPTE 2014 B-chain [4] объединяет данные, анализ и объяснения, которые делают его эталоном в этой области. В дальнейшем, я буду ссылаться на часть этой информации, начиная с двух помещений, которые иллюстрируют существующий диапазон отражений. Как показано на рис. 3(a), кинотеатр А является относительно отражающим, большим кинотеатром, в то время как студия дубляжа F акустически очень хорошо заглушена во всем диапазоне частот.

Рис. 8(a) подтверждает предсказания рис. 7(b) в откалиброванном по Икс-кривой кинотеатре А. Прямой звук оценивается по двум показателям: пространственно усреднённое (по пяти позициям) измерение, на расстоянии 2/3 от экрана в течении 50 мсек; и микрофон ближнего поля примерно в 5 метрах от экрана, расположенный на пути прямого звука от громкоговорителя до того места. Оба они демонстрируют значительное снижение прямого звука на НЧ и близко соответствуют устойчивому падению на ВЧ. Тот факт, что кривая 50 мсек немного выше кривой ближнего поля возможно связан с добавлением некоторой энергии ранних отражений в пределах 50 мсек измерений.

То, что эти измерения прямого звука отклоняются от ожидаемых кривых для системы с двумя низкочастотными динамиками, является подтверждением того, что прогноз основан на реалистичной интерпретации физических событий. Показательно то, что этот кинотеатр находится где-то между “типичным” и “сильно отражающим”, что подтверждают значения ВР и время кумулятивной энергии, показанные на рис. 8(b). На рис. 8(c) показана эквализация, выполненная калибратором. Как обсуждалось ранее и предсказывалось на рис. 5 (b), в отражающем помещении громкоговоритель с плоской АЧХ будет давать восходящую кривую на НЧ. Эта кривая показывает снижение за счёт эквализации, чтобы соответствовать требованиям Икс-кривой (плоская, статичная кривая помещения на НЧ). Широкий горб с центром на частоте 500 Гц вызывает недоумение. Вряд ли это проблема громкоговорителя, но, как будет видно позже, это может быть связано с влиянием сидений. Если это так, то эквализация является спорным действием. Автор присутствовал на этих измерениях, что включало прослушивание саундтреков. В ответ на комментарии о неестественно звучащих, тембрально окрашенных голосах эквализация была отключена, и их качество значительно улучшилось. Это мнение, а не факт, и вероятно здесь нужно исследование. Начиная с 2 кГц эквализация практически не использовалась вплоть до 4 дБ низко добротного подъёма на 10 кГц. Громкоговоритель выглядит довольно плоским на оси, а высокочастотный спад Икс-кривой почти идеально достигается за счёт потерь перфорированного экрана, как показано на рис. 7 (a).

Стадия дубляжа F[4] была спроектирована так, чтобы иметь очень низкое и постоянное ВР на всех частотах, что создаёт совершенно иную ситуацию прослушивания. При значительном ослаблении отражённых звуков на рис. 9(a) показано, что прямой звук доминирует в большей части частотного диапазона, при этом некоторое усиление отражённого звука наблюдается только ниже примерно 50 Гц. Направленность громкоговорителя практически не имеет значения. Калибровщики решили опустить ВЧ ниже требований Икс-кривой.

На рис. 10 показаны измерения, проведённые Холманом [31] в “современном стадионе с сидячими местами”. Большая разница между прямой и стационарной кривыми указывает на относительно отражающее помещение - данных о времени реверберации не было, но автор прокомментировал, что там было “малое поглощение на НЧ.” Измерения прямого звука отклоняются от прогнозов, приведённых на рис. 7(b). Заметный пик и падение между 150 и 300 Гц указывают на проблемы в помещении: акустика или эквализация или и то, и другое? Калибровщики решили установить уровень на ВЧ ниже Икс-кривой, и оставили НЧ поднятыми, создав наклон вниз от низких до средних частот.

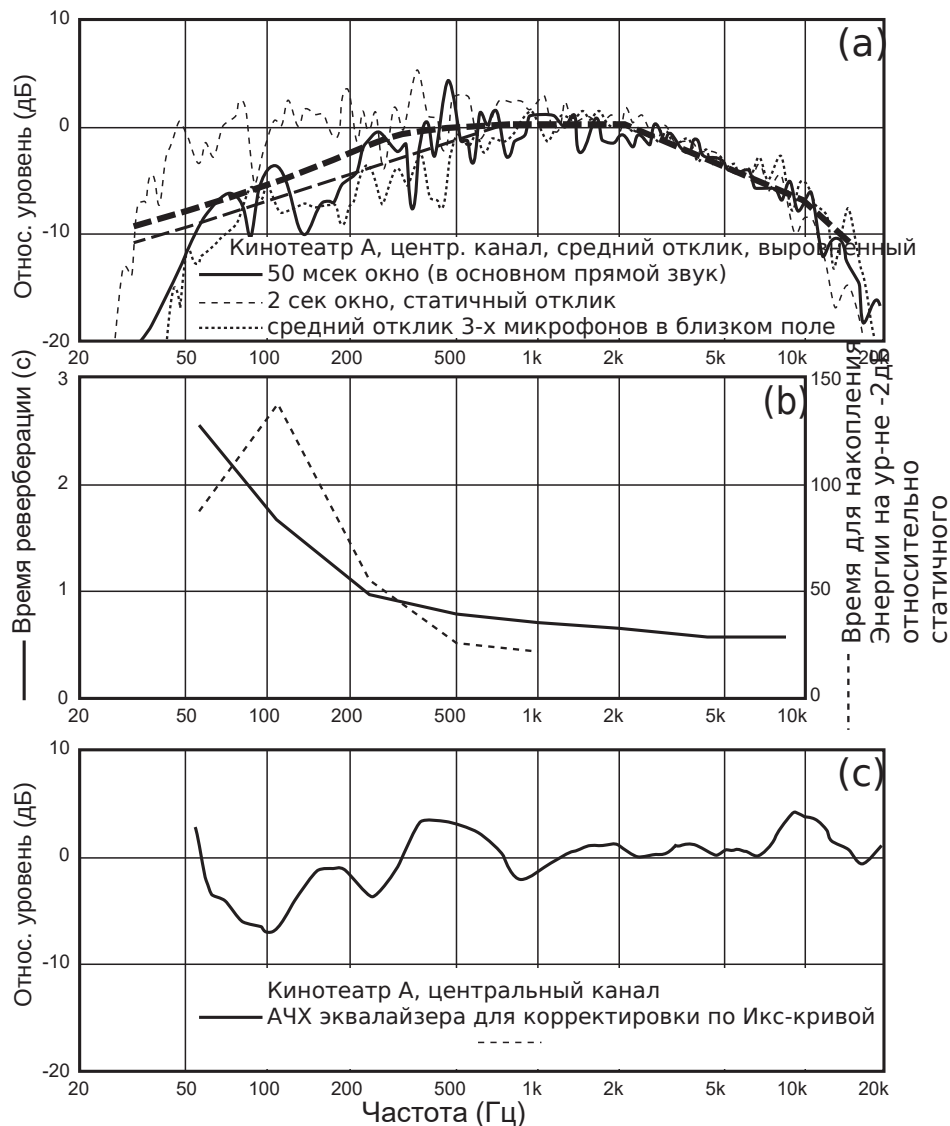
Исследование Филдера [30] объединяет данные 50 фронтальных громкоговорителей в 18 кинотеатрах, рис. 11. Видно что ниже 1 кГц рис. 11 (a) “типичный кинотеатр на 500 мест” демонстрирует АЧХ очень близкую к “типично отражающему” прогнозу на Рис. 7 (b) (жирная пунктирная линия).

На рис. 11(b) показано наложение всех 50 фронтальных громкоговорителей в 18 кинотеатрах. Эти кривые показывают спектры прямого звука в этих местах, показывая, насколько зависит воспроизведение звука от разных громкоговорителей и мест в зале. Они в основном заполняют заштрихованную область возможностей, показанную на рис. 7(b). Никакой информации о громкоговорителях не было. Нижняя граница - это прогноз звуковой мощности с двумя НЧ динамиками на рис. 5 (c), обозначенный как “кинотеатр с большим ур-нем отражений”.

### 3.5 Противоречивая Икс-кривая

С Икс-кривой связаны две основные проблемы:

- Первая - это спад на ВЧ, который был предметом многочисленных споров и непонимания. Благодаря техническому прогрессу во всех аспектах записи и воспроизведения звука обстоятельства его происхождения больше не имеют значения. В настоящее время, похоже, нет никаких оснований для этого спада. Благодаря направленным громкоговорителям и акустике кинотеатров этот спад существует почти одинаково и в прямом звуке, и в статичной АЧХ - это спад в целевой кривой, а не следствие естественной акустики помещения, что было распространённым заблуждением. АЧХ прямого звука, поступающего к зрителям, не является плоской.
- Вторая проблема - плоская статичная АЧХ ниже 2 кГц. На рис. 11(b) показано, что в зависимости от направленности громкоговорителя и поглощения на СЧ и НЧ, прямой звук будет иметь различную степень нехватки низких частот. Интуитивно кажется, что в некоторых ситуациях атакам на низких частотах



На рис. 8(а) Кинотеатр А представляет пример относительно отражающего кинотеатра из отчёта SMPTE [4]. Эти данные показывают, что система, откалиброванная по Икс-кривой ST 202 (тонкая пунктирная кривая), обеспечивает спектр прямого звука, который далёк от плоского (сплошная кривая из данных с временным окном на расстоянии 2/3 от экрана и кривая точками из данных с близким полем). Жирная пунктирная кривая это предсказанный спад басов с рис. 7(б) который здесь хорошо соответствует измеренному. Рис. 8(б) показывает большое Время реверберации (сплошная линия) на низких частотах, что предсказывает значительное увеличение энергии отражённых басов после прибытия прямого звука в места прослушивания. Пунктирная линия - это время, необходимое для накопления энергии до уровня звука на 2 дБ ниже статичного уровня (выбор этого критерия был решением автора). На рис. 8(с) показана АЧХ эквалайзера, использованного для калибровки по Икс-кривой.

может не хватать “мяса” или “пинка”. Опять же, АЧХ прямого звука, поступающего к слушателям, не является плоской.

Эти проблемы возникают *только* в студиях дубляжа настроенных по Икс-кривой, где создаются саундтреки, и в кинотеатрах настроенных по Икс-кривой, где они воспроизводятся — больше нигде в мире аудио это не применяется. Это часть замкнутой системы, и “круг пуганицы” внутри неё (рис. 1) теоретически не должен быть проблемой. Но это происходит потому, что динамики и помещения не идентичны во всей системе. Анекдотичные данные свидетельствуют о том, что некоторые объекты просто игнорируют требование Икс-кривой или изменяют их в соответствии с пожеланиями владельца после калибровки. Другие поддерживают две настройки эквалайзера: одну для калибровки, другую для повседневного использования. Данные Ньюэлла

[32] и отчет SMPTE B-chain [4], а также некоторые данные, приведённые здесь, свидетельствуют о том, что несогласованные калибровки являются дополнительной проблемой.

Если микс-инженеры и зрители кинотеатра хотят услышать нейтрально сбалансированный спектр изначальной записи или микрофона, то запись должна включать значительное повышение высоких частот, зеркально компенсируя спад Икс-кривой. Это дополнительная задача для инженеров — субъективно оценить эквализацию для компенсации технической проблемы. Недавний опрос среди микс-инженеров звука кино показал, что полный спад Икс-кривой используется не на всех этапах дубляжа (что удовлетворительно для инженеров, но не для зрителей), и не все инженеры повышают высокие частоты (тем самым не обеспечивая аудиторию достаточным уровнем ВЧ) [36]. На самом деле, из этого



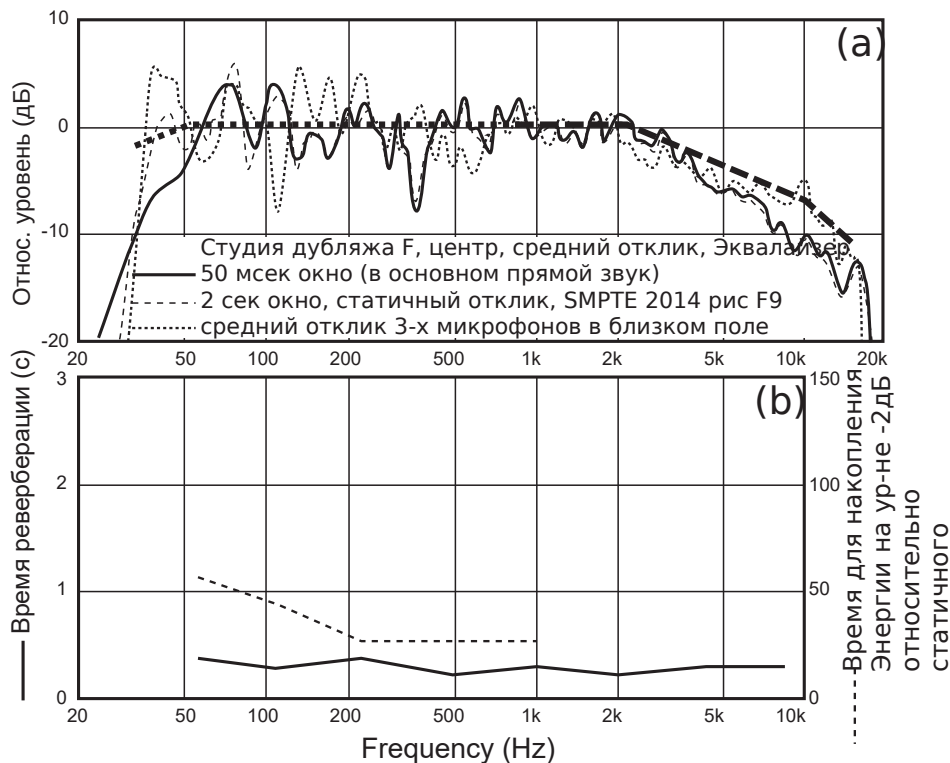


Рис. 9. (а) Используя формат рис. 8, эти данные взяты со студии дубляжа F [4]. Эта комната с низким уровнем ВР, очевидно, поглощает большую часть отражённого звука, поэтому прямые и стационарные звуки имеют сопоставимый уровень на всех частотах выше примерно 50 Гц. Прогноз “заглушённого” кинотеатра на рис. 7(б) показывает хорошее соответствие. На рис. 9(б) видно, что время накопления энергии коррелирует со значениями ВР — оба значения низкие.

отчёта и других различных свидетельств кажется, что некоторые опытные инженеры принимают спад как нормальное явление в звуке кино и практически не компенсируют его. Ничего из вышеперечисленного не включает влияния потери слуха, профессионального риска в аудиоиндустрии, [1] раздел 19.1.2.

Неясно, была ли широко признана проблема изменения прямого звука басов. Тем не менее, данные Филдера [30], рис. 11 и другие доказательства, приведённые в этой статье, указывают на то, что она достаточно велика, чтобы её игнорировать, учитывая мощное влияние

низких частот на общий спектральный баланс. Микс-инженеры, скорее всего, манипулируют программами, чтобы обеспечить приятный баланс басов на этапах дубляжа, которые, скорее всего, будут акустически отличаться друг от друга и отличаться от кинотеатра к кинотеатру. Результат останется навсегда “вписан” в саундтрек как часть творения (рис. 1).

Холман предложил фиксированную эквализацию только на ВЧ для домашнего воспроизведения фильмов, которые были сведены на мониторах, откалиброванных по Икс-кривой [37]. Очевидно, что в нынешней ситуации на

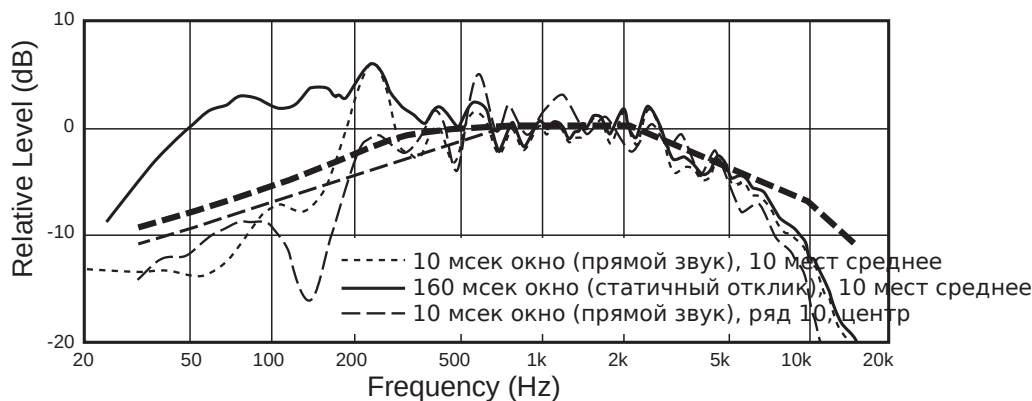


Рис. 10. Данные о статичном отклике и прямом звуке большого кинотеатра, калиброванного по Икс-кривой, от Холмана [31]. Жирные пунктирные линии - это предсказываемые “типичные” и “высоко” отражающие отклики с рис. 7(б).

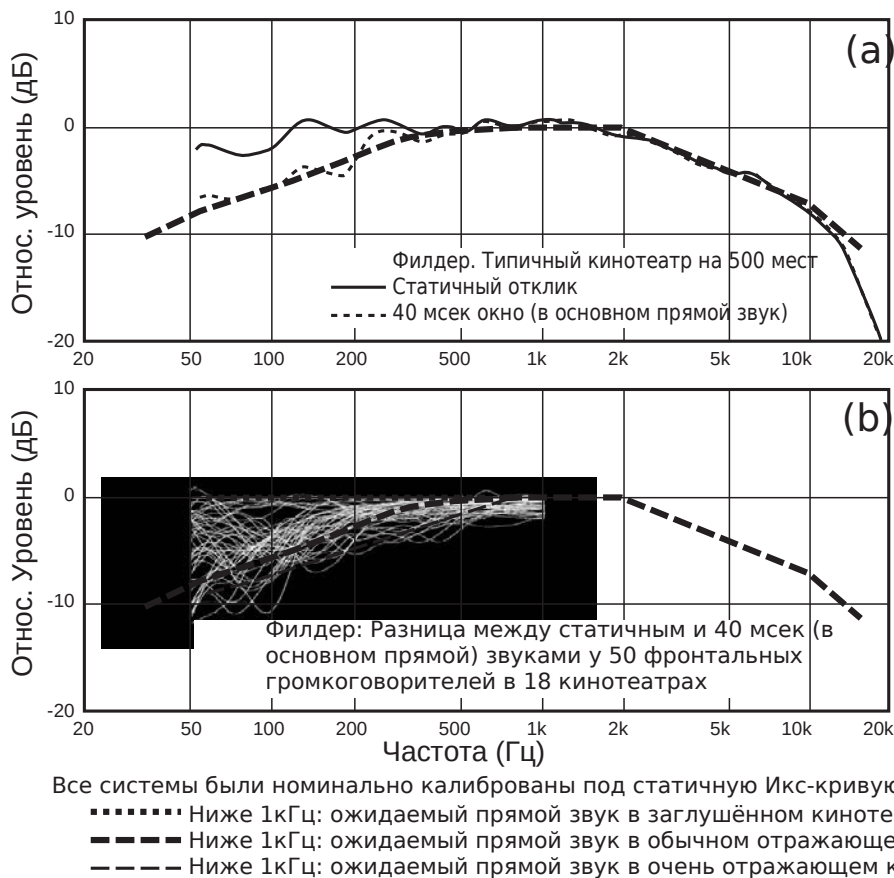


Рис. 11. (а) Филдер [30] показывает устойчивый и прямой звук для “типичного кинотеатра на 500 мест”. Жирная пунктирная линия - это типичный “отражающий” прогноз с рис. 7(б). На рис. 11(б) мы видим все 50 измерений, из которых он был получен (а). Очевидно, что различные громкоговорители в разных помещениях создают множество вариантов соотношения прямого звука к стационарному. Ниже 1 кГц накладываются прогнозируемые кривые с рис. 7(б).

это полагаться не стоит. Напротив, Аллен [35] утверждает что: “перевод саундтрека из театральной версии в потребительский релиз на DVD или ТВ, скорее потребует корректировки (динамика, лимитирование и т. д.), нежели повторной эквализации”. Учитывая предыдущее обсуждение и большую разницу между калиброванным по Икс-кривой кинотеатром и домашним кинотеатром, это кажется крайне маловероятным. Регулятор тембра ВЧ, а с учетом изменений наблюдаемых на уровнях низких частот, также и регулятор НЧ, настраиваемый потребителем, вполне справляются с этим. Автор может засвидетельствовать, что с пользой использовал и то, и другое на протяжении многих лет.

Вне оборудования, калиброванного по Икс-кривой, все системы воспроизведения звука, включая портативные, телевизионные, стереосистемы и аудио системы домашнего кинотеатра, используют громкоговорители с плоской АЧХ прямого звука ([1] Рисунок 2.5 и глава 18) - даже наушники разработаны с расчётом на воспроизведение программ, сведённых на мониторах с ровной АЧХ [38].

Таким образом, комбинация студия дубляжа/кинотеатр/Икс-кривая, в звукоиндустрии, представляет собой изолированную систему.

### 3.6 Альтернативные методы калибровки и целевые показатели.

С самого начала, при проектировании громкоговорителей, основной целью было получение плоской АЧХ на оси, чтобы первый поступающий звук был точным представлением спектра записанного звука. Двойные слепые субъективные оценки громкоговорителей, проводимые автором и его коллегами в течение 35 лет, показали что предпочтение отдаётся тем, которые имеют плоскую и плавную АЧХ, сопровождаемую хорошим откликом вне оси, т.е. плавно меняющимся или с постоянным индексом направленности ([1] глава 18). Смена помещения мало влияет на это наблюдение ([1] раздел 11.3.1).

Исходя из этого, общий стандарт для систем воспроизведения звука требует громкоговоритель, который излучает ровный, плавный, прямой звук и который имеет постепенно меняющуюся или постоянную направленность. В кинотеатрах это требование должно выполняться для мест зрителей.

Логичным действием было бы устранить спад на ВЧ в системах кинозвука, тем самым обеспечив совместимость с остальным миром аудио, и использовать метаданные для использования спада Икс-кривой в кинотеатрах для воспроизведения старых фильмов. Кинотеатры, предоставляющие музыкальные концертные

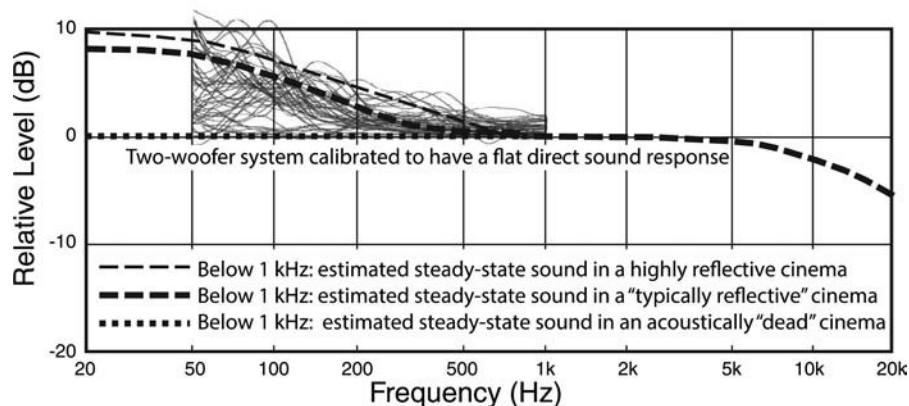


Fig. 12. The prediction of Fig. 5(b) has been augmented by data from Fielder [30] to show examples of how much the steady-state sound levels can vary using loudspeakers that are flat on-axis, but which may differ in the size of bass units, and used in rooms having differing amounts of low-frequency absorption.

программы, выиграют. ВЧ драйверам может понадобиться больше усилий для компенсации потерь экрана, но не больше, чем при воспроизведении звуковых дорожек, в которых инженер полностью компенсировал спад Искривой. На практике это может быть сделано, а может и нет [36]. Существуют также опасения по поводу перегрузки компрессионных драйверов в кинотеатрах с мало-мощными системами громкоговорителей, но и здесь применимо предыдущее утверждение, так что в этом нет ничего нового.

Данные о потерях из-за экрана существовали давно [34] и недавно были пересмотрены [39-42]. Изучение спектрального/временного содержания программы показало, что требования к выходной мощности для компрессионных драйверов будут незначительно изменены в пределах возможностей современных продуктов [43]. Экранные материалы с более высокой акустической прозрачностью продолжают совершенствоваться, а компрессионные драйверы продолжают улучшаться. Существующие звуковые системы с ограниченной выходной мощностью могут быть защищены алгоритмами ограничения на ВЧ, оставляя большую часть звука нетронутой. Если будет поставлена новая задача, то технология будет разработана.

Ситуация на НЧ совсем иная, потому что слушатели находятся в насыщенном отражениями звуковом поле. Если мы возьмём за критерий ровный прямой звук, то что это означает для звуковых полей в помещениях? Данные Филдера о разнице между прямыми и статичными звуковыми полями, создаваемыми 50 громкоговорителями в 18 кинотеатрах, дают такое представление [30]. На рис. 12 показаны данные Филдера, инвертированные и наложенные на рис. 4 (б), чтобы проиллюстрировать, как изменяется статичное звуковое поле, если громкоговорители имеют плоские АЧХ на оси (прямой звук). В большинстве случаев на НЧ будет наблюдаться подъём, и уровень этого подъёма будет разным. Только на открытом воздухе или в очень глухих помещениях разницы не будет. Если в качестве цели должна использоваться статичная кривая помещения, то нужен ли спад ниже примерно 1 кГц? Если да, то какой?

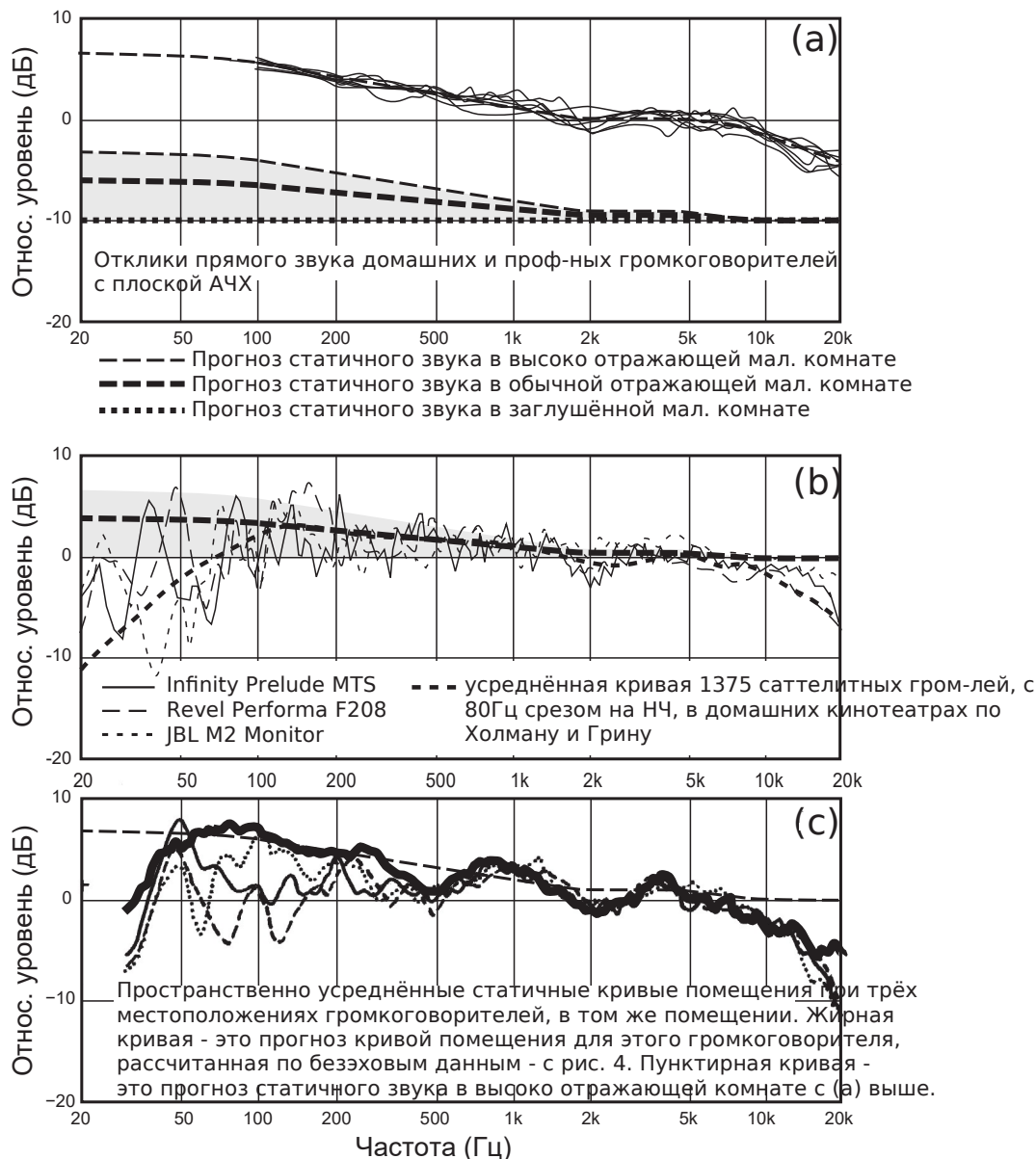
#### 4 ЗВУКОВЫЕ СИСТЕМЫ НЕБОЛЬШИХ ЗАЛОВ

Помещения, которые подходят для стерео- или теле-развлечений, домашних кинотеатров, домашних и

проф-ных студий, не требуют массивных, высоконаправленных громкоговорителей. Источники НЧ имеют меньшие размеры и более низкие показатели направленности, рис. 2(б). Средние и высокие частоты, как правило, излучаются рупорами с более широкой дисперсией или небольшими конусами и куполами. Такие источники генерируют больше отражённых звуков в более широком диапазоне частот нежели в кинотеатрах. Следовательно, как было видно из примера на рис. 4, предсказания акустических событий должны измениться.

Используя логику, применённую на рис. 5(b), для этих небольших громкоговорителей, рис. 13 (а) начинается с семи инвертированных оценок общей мощности излучаемого звука для громкоговорителей, настроенных на плоские АЧХ. Все эти семь громкоговорителей получили очень высокие субъективные оценки в двойных слепых тестах прослушивания в различных местах (см. [44] и [1] раздел 17.7). У всех были необычайно ровные и плавные АЧХ на оси, а также аналогичные плавно меняющиеся ИН, подтверждающие превосходство дизайна и объясняющие высокие субъективные оценки [45, 46]. Автор рассчитал их усреднённую кривую, экстраполированную в нижние частоты, предполагая от 6 до 7 дБ максимальный ИН, как показано на рис. 5(b). На 10 дБ ниже мы видим кривую показывающую верхний предел ожидаемой статичной кривой помещения - при условии, что вся излучаемая энергия поступает в места прослушивания за счёт отражений. Горизонтальная линия - это "идеальный" прямой звук, который является единственным в заглушённых помещениях. В обычных отражающих, небольших помещениях прямой звук оказывает сильное влияние только на самых высоких частотах, рис. 4. Поэтому эта линия настроена так, чтобы соответствовать кривой звуковой мощности на ВЧ конце шкалы, примерно от 8 до 10 кГц. Затенённая область между ними - это то место, где могут находиться кривые статичного состояния в "реальных" комнатах. Автор нарисовал промежуточную жирную пунктирную линию, которая могла бы представлять "типично отражающую" комнату.

На рис. 13(b) показаны пространственно усреднённые статичные кривые помещения на 6 мест для трех высококачественных громкоговорителей и результат большого исследования сателлитных громкоговорителей домашнего кинотеатра (обрезной НЧ фильтр на 80 Гц) [47]. На низких частотах очевидны огромные колебания, вызванные



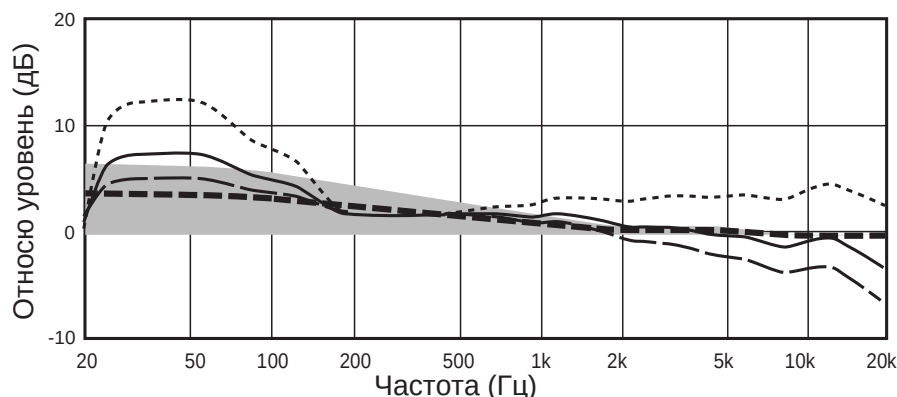
На рис. 13 (а) наложены инвертированные индексы направленности для трёх громкоговорителей из (b) и четырёх других с сопоставимым качеством звука. Показана созданная автором усреднённая кривая (верхняя пунктирная линия). Ниже приведён прогноз диапазона статичных кривых, которые могут возникать в помещениях с различными акустическими свойствами. На рис. 13(b) показаны усреднённые кривые помещения на 6 мест для трёх высококачественных громкоговорителей и средний отклик большого исследования. Наложено предсказание из (а). На рис. 13(c) показано сравнение между рассчитанным прогнозом для конкретного проблемного громкоговорителя и усреднёнными кривыми помещения для этого громкоговорителя в трёх разных местах в одной и той же комнате (из [1] и [9, часть 2]).

стоячими волнами в комнате. Наложение заштрихованной области из (а) вместе с прогнозом “типичной комнаты” показывает хорошее соответствие выше примерно 300 Гц даже без спектрального сглаживания.

Рис. 13(c) взят из ранней работы автора, показанной на рис. 4, где было показано, что рассчитанное предсказание очень хорошо согласуется с измерениями в помещении примерно выше 300 Гц. На НЧ большое влияние оказывают резонансы комнаты. Прогнозируемая кривая из (а) наложена. Большая неровность этого громкоговорителя, от 300 Гц до примерно 5 кГц, вызвана значительной зависимостью ИН от частоты, показанной на рис. 4(а), хотя АЧХ на оси была очень ровной. Так же, субъективные оценки указывали на значительную окраску.

Энергия ранних отражений влияет на статичные характеристики помещения на частотах до 5 кГц или выше, что является существенным изменением по сравнению со звуковым полем в кинотеатрах, которое переходит к доминированию прямого звука выше примерно 600 Гц. Очевидно, что одним из основных факторов является более широкая направленность динамиков домашнего кинотеатра. Постоянная или, по крайней мере, плавно изменяющаяся направленность важна для того, чтобы отражённая энергия не искажала спектр (и качество) прямого звука. На НЧ вычисленное предсказание приближается к верхнему (сильно отражающему) пределу заштрихованной области. Несоответствие на ВЧ, возможно, связано с большим направленным твитером в этом громкоговорителе, который «стрелял» мимо места прослушивания, как показано на рис. 4 (а).





Субъективно предпочтительные статические кривые помещения, Олив и др.:

- Только неподготовленные слушатели (4)
- Все слушатели (11)
- · — · — Только подготовленные слушатели (7)
- · — · — Прогнозируемая статическая кривая помещения с высокочастотными отражениями, заштрихованная область показывает возможные результаты в помещениях с разным уровнем отражений. Ровная АЧХ прямого звука.

Рис. 14. Субъективно предпочтительные статические кривые помещения типичной комнаты для прослушивания [49], от Олив и др. [48]. Так же наложено предсказание, показанное на рис. 13(а).

Как итог, хорошо известно и здесь подтверждается, что главным отличием небольших помещений является доминирование стоячих волн на частотах ниже примерно 200-300 Гц, “частота перехода” (частота Шрёдера в больших отражающих помещениях), см. [2], раздел 7. Выше этой частоты, безэховые данные могут быть использованы для прогнозирования статических АЧХ в помещении с полезной точностью. Ранние отражения, здесь, влияют на гораздо более высокие частоты, чем в кинотеатрах, что делает данные о частотно-зависимой направленности очень важными. В громкоговорителях, скачкообразная частотно-зависимая направленность проявляется в излучаемой мощности звука и статической АЧХ в помещении и слышна двумя ушами и мозгом. Эквализация не может исправить плохую направленность громкоговорителя.

#### 4.1 Некоторые свидетельства предпочтений слушателей в домашних кинотеатрах

На протяжении многих лет несколько исследователей пытались определить приятные формы АЧХ в небольших помещениях. Однако исследования, о которых известно автору, были скомпрометированы отсутствием адекватных измерений громкоговорителей и/или информации об акустике помещения. Похоже, что никаких двойных слепых тестов при прослушивании не проводилось, поэтому достоверных субъективных оценок нет. Следовательно, полученные результаты могут быть оспорены.

Исследование, проведенное Оливом и др. [48], приводит безэховые данные используемого громкоговорителя, описание комнаты [49] и измеренные АЧХ в помещении с высоким разрешением. В ходе двойных слепых тестов слушатели настраивали НЧ и ВЧ баланс для громкоговорителя, который до этого был настроен на плоскую, статическую АЧХ. Громкоговоритель ранее получил высокие оценки в независимых двойных слепых тестах без эквализации. Были проведены три теста, в которых отдельно

регулировались либо НЧ или ВЧ, при этом второй параметр фиксировался случайным образом, и тест, в котором были доступны обе регулировки, начиная со случайных настроек. Это был классический эксперимент по корректировке. Для каждой выбранной программы слушатели вносили коррективы, чтобы получить наиболее предпочтительный результат.

На рис. 14 автор доработал исходные данные, чтобы отдельно показать результат от подготовленных и не очень слушателей. Это сравнивается с прогнозом небольшой комнаты, с рис. 13(а). Кривая “Все слушатели” близка к прогнозируемой, за исключением на НЧ, где очевидно, что сильно выраженные предпочтения неопытных слушателей значительно повысили усредненную кривую. На самом деле, вариации на обоих концах спектра существенны, и неподготовленные слушатели просто выбирают “всё и больше”. Вопрос без ответа остаётся: было ли это связано с общей громкостью, и требует повторного исследования. Тем не менее, большинство из нас видели свидетельства таких предпочтений с обоюдным подъёмом на НЧ и ВЧ в настройках управления тембра оставленных во многих арендованных автомобилях.

Доп. данные были бы кстати, но и этого объёма достаточно, чтобы понять, что одна целевая АЧХ вряд ли удовлетворит всех слушателей. Добавьте к этому вариации в микшировании, созданные “кругом ошибок”, и появится веский аргумент в пользу включения НЧ и ВЧ регуляторов тембра в оборудовании воспроизведения. Первая задача для таких регуляторов состояла бы в том, чтобы позволить пользователям оптимизировать спектральный баланс своих громкоговорителей в своих комнатах и на постоянной основе компенсировать спектральные дисбалансы по мере их появления в фильмах и музыке. Ослабленные ВЧ, предпочитаемые подготовленными слушателями, контрастируют с предпочтениями, продемонстрированными теми же слушателями в многочисленных оценках громкоговорителей в двойных слепых тестах. В них наиболее высокие оценки получили громкоговорители с плоской АЧХ (те, которые

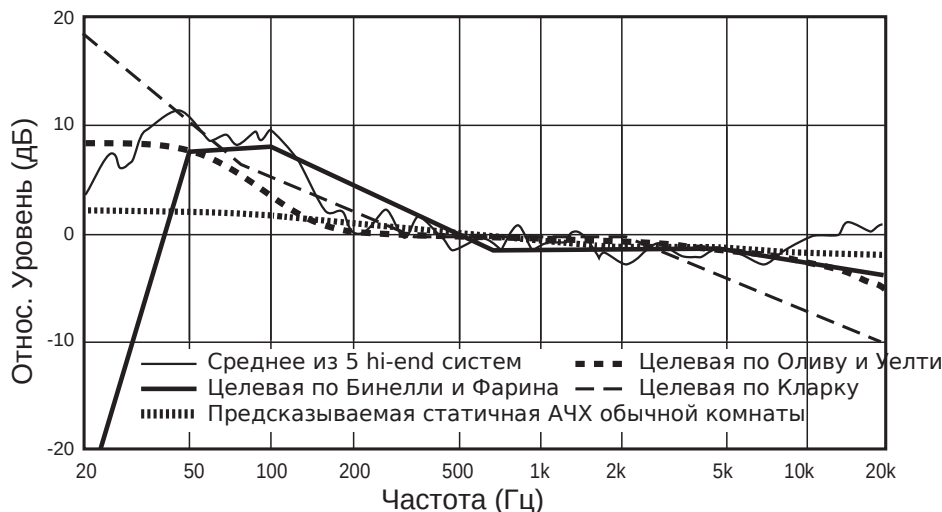


Рис. 15. Три экспериментально определённых целевых АЧХ для автомобильных аудиосистем сравниваются со средними показателями аудиосистем hi-end класса в пяти современных автомобилях класса люкс. И все они сравниваются со средней кривой стационарного помещения в “типично отражающей” небольшой комнате, показанной на рис. 13(а).

работают близко к прогнозируемой кривой на рис. 14). Является ли это следствием разных заданий для слушателя? В одном они настраивали баланс НЧ/ВЧ для одной модели громкоговорителя; в другом оценивали спектральный баланс и другие показатели в случайных сравнениях различных продуктов. Это тонкое, но важное различие, ожидающее объяснения.

Важным наблюдением является то, что результаты указывают на общее предпочтение статичному спектру, который повышается в сторону НЧ. В предыдущих экспериментах Олив и др. [50] сравнили пять различных продуктов коррекции помещения, обнаружив, что наиболее предпочтительный продукт следовал АЧХ, аналогичной кривой “Все слушатели”, показанной здесь. Те, у кого меньше басов, не были оценены так высоко. Автор на протяжении многих лет следил за разработками продуктов “коррекция/эквализация помещения”. На сегодняшний день имеются некоторые свидетельства согласия в том, что целевая АЧХ должна иметь наклон вниз по крайней мере в части частотного диапазона. Большинство из них сочетают плоские, наклонные и изогнутые участки. Ни один из них еще не включал кривую, которая поднимается к высоким частотам. В некоторых моделях потребитель, методом проб и ошибок, может выбрать одну из нескольких АЧХ.

## 4.2 Звук в машине

Потребители проводят значительное время слушая музыку в автомобилях с помощью аудио систем, которые в настоящее время довольно таки хороши. Эти системы могут быть измерены только после установки в акустически сложном салоне автомобиля. На рис. 15 показаны результаты субъективных оценок в США Олив и Велти [51] и Кларка [52], итальянского исследования Бинелли и Фарина [53] и измерений в пяти автомобилях класса люкс. Все усиливают басы, чтобы конкурировать с существенным шумом дороги, аэродинамическим и механическим шумами на НЧ (в некоторых транспортных средствах это может варьироваться в зависимости от скорости и/или фонового шума). Наблюдается существенное совпадение по средним частотам, включая прогнозируемую кривую малого помещения на рис. 13(а).

Очевидно, дизайнеры хотели, чтобы звук в авто походил на звук хороших домашних систем. Различия в способах сбора автомобильных данных в салоне приводят к некоторым различиям в форме кривой на очень высоких частотах. Воспринимаемые звуки, скорее всего, будут более похожими, чем показывают эти измерения.

## 5 НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ЗВУК В КИНО

Отчёт SMPTE [4] документирует работу некоторых важных кинотеатров западного побережья США и студий дубляжа, все из которых были калиброваны по Икс-кривой. На рис. 16 показаны статичные АЧХ этих объектов в контрольных точках (а) и усреднённые по всем точкам измерения (б). Оба сравниваются с целевыми из SMPTE ST 202 [21]. Автор нормализовал их относительно средних частот.

Результаты показывают значительные различия на всех частотах, особенно на кривых в одной точке (а). Они содержат колебания, указывающие на эффекты акустических помех, вероятно, включая взаимодействие с сидениями на средних частотах. Последнее, вероятно, является следствием размещения микрофонов на высоте ушей, которая во многих кинотеатрах находится близко к высоким спинкам сидений.

Существует тенденция к усилению НЧ — кривые смещаются вверх примерно 200 Гц — и тенденция к ослаблению ВЧ, при которых кривые смещаются к нижнему пределу допуска. Оба эти отклонения превышают слышимые пороговые значения для широкополосных спектральных отклонений [25]. Эти же виды отклонений от Икс-кривой можно увидеть на рис. 17 от Ньюэлла и др. [32], которые обследовали девять кинотеатров в Европе, и в статичных данных Холмана на рис. 10. Возникает вопрос, привела ли к ним субъективная настройка - они просто звучали лучше? Каковы бы ни были причины, результаты представляют собой спектральные характеристики, которые заметно отклоняются от того, что было предусмотрено в стандарте.

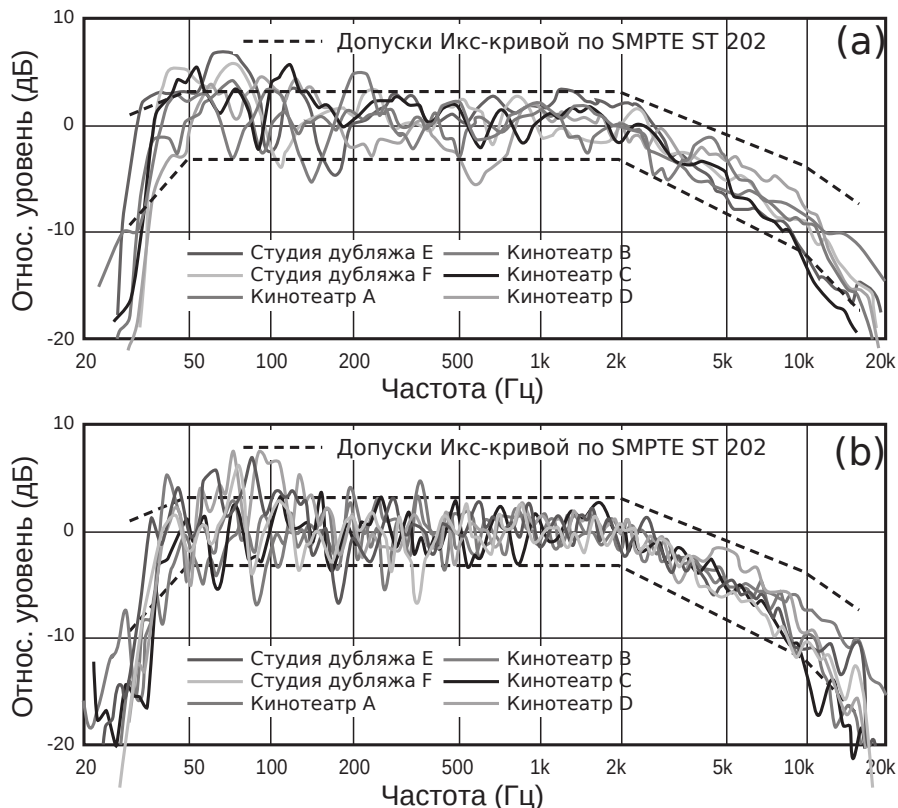


Рис. 16. Статичные АЧХ помещения четырёх кинотеатров и двух студий дубляжа из отчёта SMPTE за 2014 год [4], показывающие измерения в контрольных точках (а) и усреднённые по всем точкам измерения (б), в сравнении с допусками SMPTE ST 202.

### 5.1 Тест теста

Исследование, проведённое Гедмером [54], предоставляет данные, которые отличаются от других измерений в кинотеатрах, показанных здесь, тем, что во всех них использовался один и тот же громкоговоритель, беззвучные характеристики которого были известны заранее, и эквалаизация помещения не использовалась. Цель состояла в том, чтобы сравнить статичные АЧХ кинотеатра с

с беззвучными данными громкоговорителя в поисках полезных взаимосвязей. Источником звука был студийный монитор JBL Professional M2 с полной беззвучной документация, подобной описанной в [1] на рис. 18.6 и [55] (см рис. 20). Он был установлен в нескольких кинотеатрах, перед экраном, в центре. Измерения проводились во многих местах как на высоте ушей, так и на других высотах.

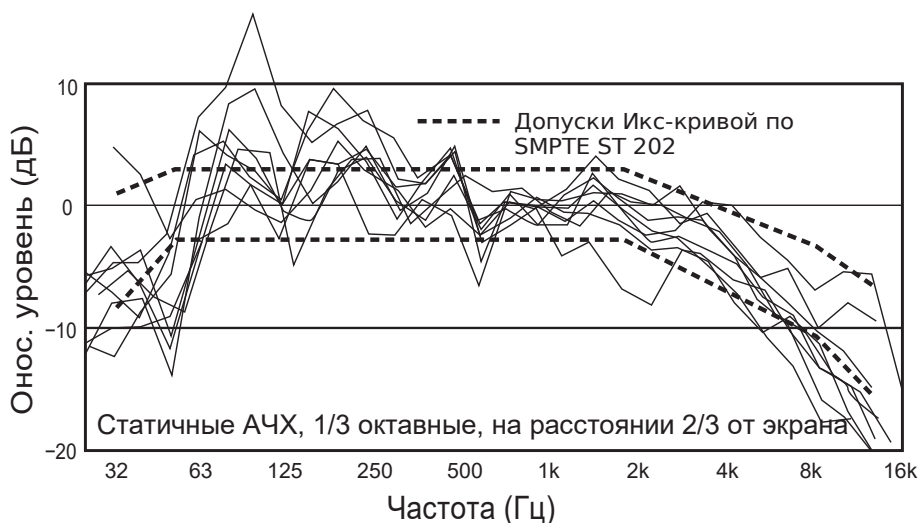


Рис. 17. Статичные АЧХ помещений, 1/3 октавное усреднение, измеренные в контрольных местах в девяти европейских кинотеатрах, калиброванных по Икс-кривой. От Ньюэлла и др. [32]. Автор создал эти нормализованные кривые "точ-в-точ" на основе исходных данных гистограмм.

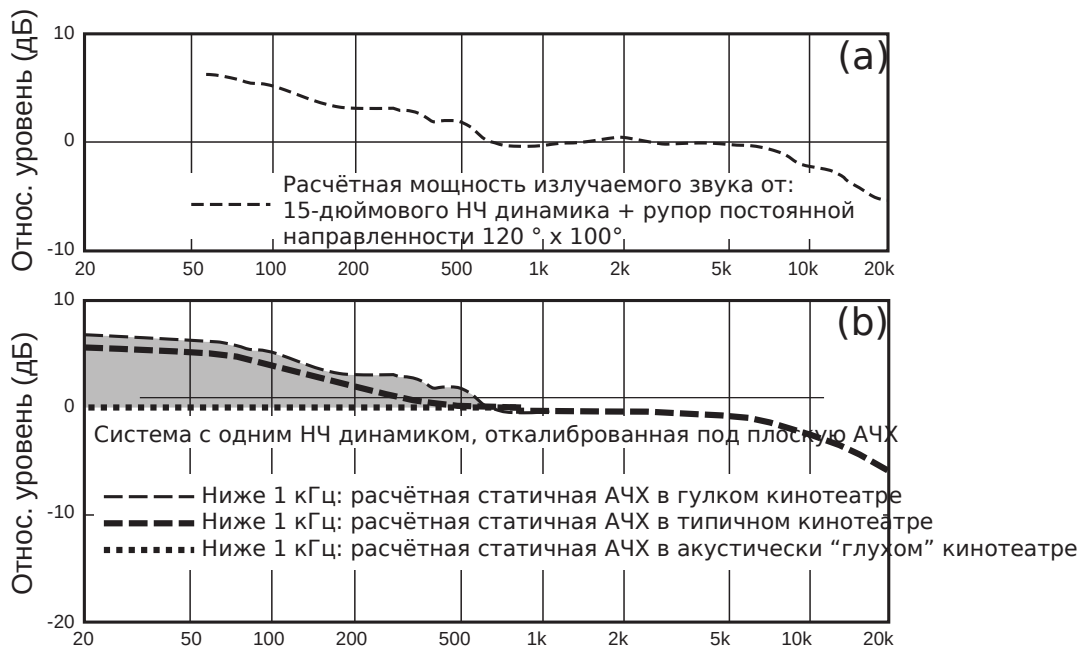


Рис. 18 (а) Инвертированный индекс направленности для JBL M2, который представляет собой расчётный спектр выходной мощности звука, когда он излучает ровный прямой звук (для чего он и был разработан). На рис. 18(б) показано, как эта излучаемая энергия может меняться в “гулком” кинотеатре (объяснено в тексте, связанном с рис. 5(б)). Также показан прогноз для акустически “глухого” помещения. Остальные места будут находиться в пределах затенённой области. Высокочастотный спад - это затухание воздуха, как показано на рис. 5(б).

Используя тот же процесс, показанный на рис. 5(б) для кинотеатрального громкоговорителя с двумя НЧ динамиками, на рис. 18 показан прогноз статичного звука, который может быть измерен с помощью громкоговорителя с одним НЧ динамиком в местах с разной акустикой. В реальности, статичные АЧХ могут находиться в любом месте затенённой области, в зависимости от уровня отражений помещения.

Кривые, показанные на рис. 19(а), представляют собой усреднённые статичные АЧХ полученные на каждом втором кресле в каждом из мест, за исключением кинотеатра G, где было использовано 109 мест. Выше примерно 1 кГц кривые очень хорошо согласуются, указывая на минимальное воздействие помещений — слушатели находятся в прямом звуковом поле. Небольшие различия на самых высоких частотах обусловлены разницей в расстоянии распространения из-за разных размеров помещений. Кривые были нормализованы к этому частотному диапазону. Ниже примерно 150 Гц, вариации из-за разного уровня отражённой энергии, от стен, толка, перегородок и, резонансов помещения были ожидаемыми. Вызывало беспокойство неравномерность в диапазоне от 150 до 800 Гц. Видимо себя проявил известный эффект “провала” из-за кресел, но вариации более сложны, чем те, которые наблюдаются в концертных залах. Дополнительные эффекты взаимодействия сидений (микрофоны находились на высоте 1,0-1,2 м над полом) предполагались в некоторых местах с сиденьями с высокой спинкой.

На рис. 19(б) показано, что, когда микрофоны были подняты на высоту, в диапазоне от 1,3 до 2 м в трёх местах, кривые сходятся более близко друг к другу и к прогнозу на рис. 18(б). Очевидные отклонения выше 300-400 Гц обусловлены измерениями, выполненными на высоте уха.

Кинотеатры демонстрируют усиленный эффект кресел в концертном зале, возможно, потому, уровень отраже-

ний в кинотеатрах гораздо ниже, чем в концертных залах. Есть основания сомневаться в том, что эти эффекты акустических помех с не минимальной фазой могут быть устранены эквалайзером. Возникает вопрос, насколько они важны для слуха — подумайте о времени, проведённом в креслах с высокими спинками и глубокими креслами, с большим акустическим препятствием за головой. Будучи неподвижными в кресле, слушатели обычно не знают или приписывают пространственные ощущения возникающим при этом гребенчатым фильтрам. Таким образом, темой для психоакустического исследования может быть определение того, передают ли измерения на уровне уха информацию уникальной ценности — сравнив прослушивание “стоя/сидя”. Если результат заключается в том, что этого достаточно для обеспечения целостности прямого звука, это может быть подтверждено с помощью микрофонов на пути распространения, расположенных вдали от сидений, или непосредственно с помощью данных громкоговорителя и экрана.

## 5.2 Влияние размеров помещения

Громкоговоритель, используемый в экспериментах Гедемера, также был измерен в типичной домашней комнате для прослушивания/домашнем кинотеатре [49]. Там он показал статичную АЧХ помещения, очень похожую АЧХ двух hi-end домашних громкоговорителей, рис. 13 (б). Кривая помещения домашнего кинотеатра для этого громкоговорителя показана наложенной на данные кинотеатра на рис. 19(с). Выше примерно 2 кГц кривые отличаются главным образом меньшим спадом из-за воздуха на коротких расстояниях прослушивания в домашнем кинотеатре. На НЧ всё так же преобладает влияние стоячих волн в небольших помещениях.

Выше примерно 150 Гц АЧХ кинотеатра и домашнего кинотеатра сходятся вокруг аналогичного “центра”. Даже при количестве мест, которое колеблется от 6, 24, 60, 114, 161, 211, и 516 нет никакой очевидной закономер-



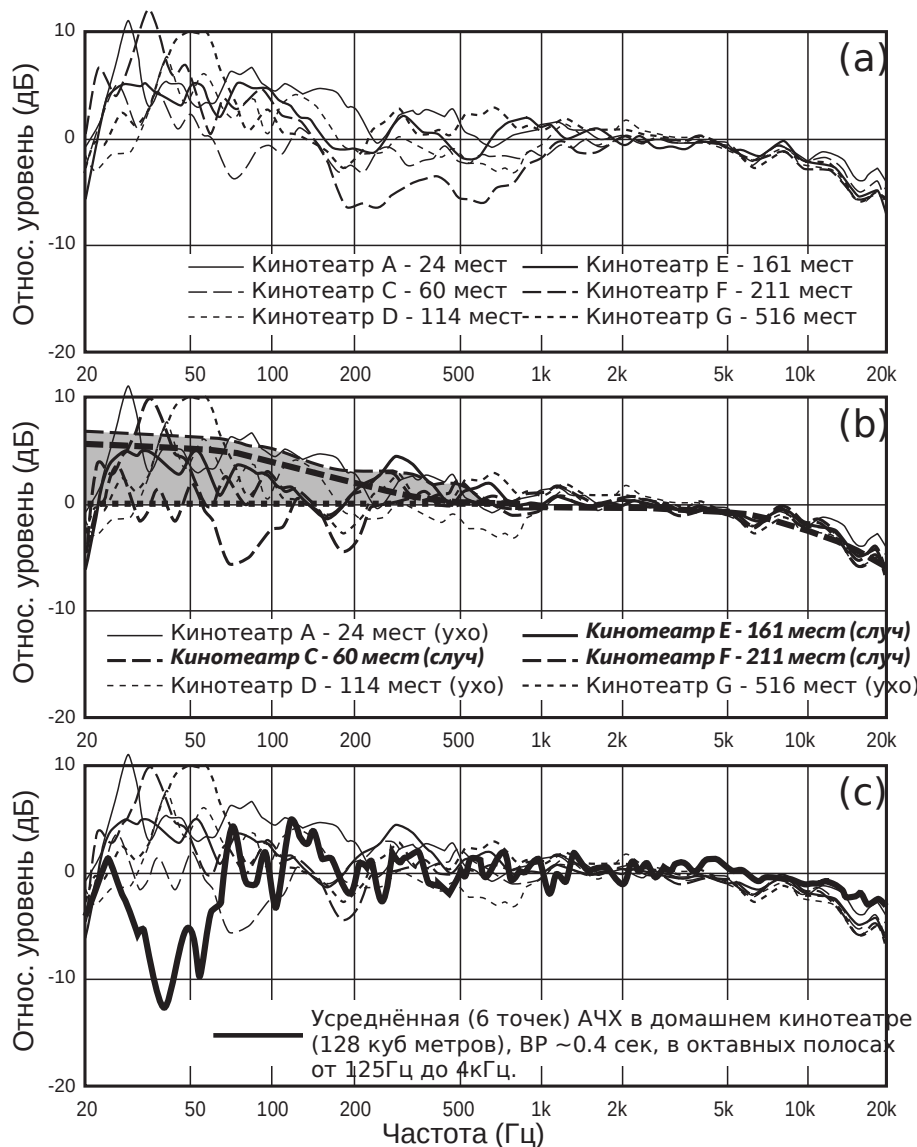


Рис. 19 Статические отклики громкоговорителя, с очень плоской АЧХ прямого звука, в шести различных кинотеатрах. (а) — расположение микрофона на уровне ушей. (б) результаты замеров в трёх кинотеатрах при расположении микрофона на случайных высотах. Наложен прогноз, приведённый на рис. 18(б). (с) сравнение этих статических откликов с усреднённой (6 точек) АЧХ того же громкоговорителя в типичной домашней комнате/ кинотеатре.

ности изменений, кроме небольшой разницы в спаде прямого звука из-за воздуха, зависящее от расстояния до зрителя. Это противоречит рекомендациям SMPTE и ISO [21, 22], в которых для помещений с разной вместимостью указаны различные спады после 2 кГц. Большие различия наблюдаются на НЧ, обусловленные отражательной способностью помещения в кинотеатрах, и стоячими волнами в домашнем кинотеатре. Неизбежные эффекты стоячих волн в небольших комнатах зависят от них самих, расположения громкоговорителей и слушателей, и поэтому не поддаются простой стандартизации, хотя, как упоминалось ранее в разделе 2.4, существуют эффективные методы ослабления их влияния.

Таким образом, в этих измеренных данных нет никаких доказательств необходимости особой корректировки под размер аудитории. Основное предположение заключается в том, что этот громкоговоритель, который был субъективно оценён при оценке небольших помещений, будет аналогичным образом оценён при сопос-

тавимых двойных слепых субъективных оценках в кинотеатрах. Нет никаких оснований полагать, что это было бы не так, тем не менее проверку этого предположения ещё предстоит провести.

## 6 ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯ

Очевидно, что для качественного воспроизведения звука требуются хорошие громкоговорители. Но что, с технической точки зрения, есть хороший громкоговоритель? Субъективные оценки, проведённые в небольших помещениях, показывают, что громкоговорители с высоким рейтингом демонстрируют хорошие характеристики при беззвоных измерениях и наоборот [1, 2, 9, 45, 46]. Да, нам не хватает соответствующих тщательных оценок на крупных площадках, но нет никаких оснований ожидать другого результата.

До сих пор мы рассматривали характеристики громкоговорителя с упрощённой точки зрения: АЧХ на оси, выход-

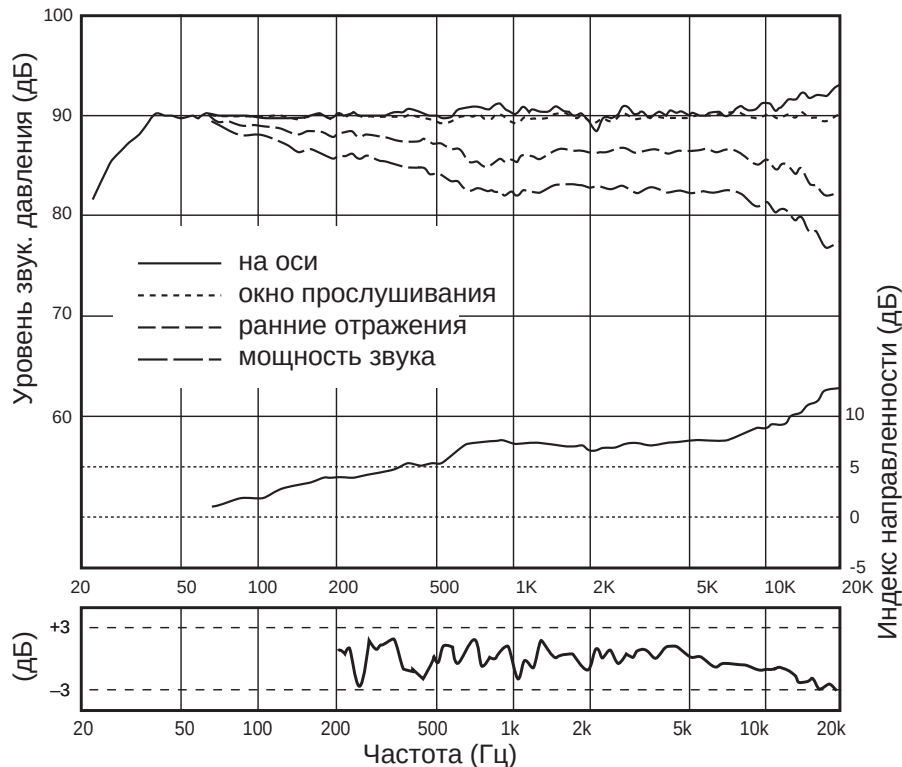


Рис. 20. Примеры АЧХ, полученных на основе данных 70 безэховых измерений с 1/20 окт усреднением. Неофициально называемые “спинорамой”, они содержат достаточную информацию, чтобы предвидеть основную форму АЧХ комнаты и оценить субъективные оценки в тестах двойного слепого прослушивания [45, 46]. Плавность и однородность изгибов являются ключом к совершенству. Это пример очень хорошего напольного громкоговорителя со специальной цифровой электроникой, настроенный для максимальной производительности прямого звука в “окне прослушивания”.

ная мощность звука и индекс направленности (разница между ними двумя). Качество звука громкоговорителя, безусловно, связано с этими данными, но также и с наличием резонансов, изменяющих тембр. Фактически, устранение резонансов у громкоговорителей необходимо для того, чтобы избежать тембральных оттенков, которые монотонно добавляются ко всем воспроизводимым звукам. Поэтому важно уметь определять и оценивать слышимость резонансов. Для этого необходима дополнительная информация [25].

### 6.1 Субъективные и объективные измерения громкоговорителей

Для количественной оценки характеристик громкоговорителя требуется безэховое пространство, достаточно большое, чтобы проводить измерения в дальнем акустическом поле — не менее 2 м для бытовых громкоговорителей/мониторов и многое другое для больших кинотеатров и систем звукоусиления. Измерения с временным окном позволяют это делать и в отражающих пространствах исключая влияние отражений, но с компромиссами в частотном разрешении на НЧ. Сканирование ближнего поля может собрать достаточное количество данных о работе в пространстве, чтобы обеспечить прогнозирование 3D-производительности в дальнем поле обеспечивая еще одну альтернативу [56, 57]. Цель состоит в том, чтобы собрать достаточно данных о звуке, излучаемом громкоговорителем, чтобы предсказать, что может дойти до ушей слушателя в

комнате.

На рис. 20 показано семейство АЧХ, полученных на основе 70 измерений с разрешением 1/20 октавы, с шагом 10° по горизонтальной и вертикальной осям, неофициально называемое “спинорама” ([1] раздел 18.2.2, ANSI/CEA 2034 [55] и [58]). Кривая отсчета, представляет собой АЧХ на оси. Кривая “окна прослушивания” представляет собой усредненную АЧХ измерений сделанных в пределах  $\pm 30^\circ$  по горизонтали на  $\pm 10^\circ$  по вертикали, предназначенную для описания прямого звука для аудитории. Кривая “ранних отражений” представляет собой усредненную АЧХ вне осевых звуков, которые будут способствовать ранним отражениям в типичных домашних кинотеатрах (она будет сильно зависеть от конкретного пространства). Кривая “звуковой мощности” была нормализована. Показанный здесь индекс направленности представляет собой разницу между кривой “звуковой мощности” и кривой “окна прослушивания”, причём последняя предпочтительнее традиционной кривой на оси, поскольку она менее восприимчива к небольшим акустическим помехам, которые часто появляются при измерениях последней.

Ниже показана усредненная статичная АЧХ помещения на шесть мест, измеренная в хорошем, типичном домашнем кинотеатре [49], с рис. 19 (с). Она показана с разрешением 1/12 октавы, чтобы выявить детальные неровности. Как уже обсуждалось, в характеристиках на НЧ преобладают стоячие волны - фактор, зависящий от помещения, — поэтому кривая рассматривается

до 200 Гц. Колебания спокойно умецаются в пределах допуска  $\pm 3$  дБ; традиционное 1/3 октавное сглаживание ещё больше уменьшило бы колебания.

При двойных слепых субъективных оценках в типичном помещении громкоговорителям, с такими данными, обычно присваиваются оценки 7 и выше по 10-балльной шкале (например, см. [1] рис. 18.14) - опытные слушатели неохотно присуждают более высокие оценки, возможно потому что оценка также включает записи с их особенностями (рис. 1). Автор замечал это в своих ранних экспериментах [8, 9], в других [1] гл. 17, 18 и 20, и сильно подкреплённых субъективными/объективными корреляциями Олива [45, 46]. Никакой "эквализации помещения" не требуется, за исключением подавления эффекта отражений от поверхностей и стоячих волн (см. раздел 2.4).

Важность отдачи громкоговорителей была убедительно продемонстрирована в ходе тщательно разработанного теста, в котором три громкоговорителя с близким рейтингом оценивались в четырёх совершенно разных помещениях. Двойные, слепые субъективные оценки практически не менялись по мере того, как тест перемещался из комнаты в комнату [59]. (описано в 6 [2]). Слушатели смогли отделить тембральную окраску громкоговорителей от окраски добавляемой комнатами. Даже больше, при оценке громкоговорителей в разных комнатах слушатели должны были изолировать и разместить в определённый контекст, тембральные признаки записей. Это можно интерпретировать как случай потоковой передачи восприятия, результат анализа слуховой сцены, как описывает это Брегман [60]. Очевидно, что происходит значительный анализ восприятия, дедукция и адаптация. Эта когнитивная активность, по-видимому, происходит подсознательно при повседневном прослушивании; мы слышим и распознаём тембральные особенности и тонкости одних и тех же источников звука, но в разных комнатах. Два уха и мозг значительно более аналитичны и адаптируемы, чем омни микрофон и анализатор.

Для сравнения, на рис. 21 показаны аналогичные данные громкоговорителя с серьёзными проблемами [61]. АЧХ с 1/20 октавным сглаживанием показывает резонансы средней добротности на 600 Гц, 1200 Гц и 16 кГц и значительный, широкий подъём около 3,5 кГц. Поскольку динамики громкоговорителей являются устройствами с минимальной фазой, мы знаем, что на этих частотах они будут "звенеть", но, как было обнаружено в [25], наиболее слышимым является спектральный подъём. Резонанс с низкой добротностью будет доминирующей проблемой звучания, потому что его амплитуда во много раз превышает порог обнаружения [25]. Однако другие резонансы, скорее всего, тоже превысят порог обнаружения при сложной музыке. Провал кроссовера около 1,5 кГц, хотя и значительно ослаблен на кривой звуковой мощности, хорошо виден при измерении АЧХ на оси и измерениях передней полусферы. Поэтому он отображается на АЧХ индекса направленности.

Поскольку резонансы есть явления минимальной фазы у динамиков, они могут быть ослаблены с помощью настроенных парам-ких фильтров, тем самым исправляя проблемы как с амплитудой, так и во временной области. Эквалаизация с использованием DSP это мощное средство, но она может быть выполнена только на основе беззеховых данных высокого разрешения, позволяющих идентифицировать центральную частоту и добротность. Провал

из-за помех, не связанных с минимальной фазой, не может быть исправлен эквалайзером. От НЧ до СЧ на статичную АЧХ помещения явно влияет излучаемая мощность звука, как это было видно в предыдущих примерах. Кстати, в двойных слепых тестах этот громкоговоритель, дополненный отличным сабвуфером, набрал всего 3,9 из 10.

В этих беззеховых данных видны слышимые резонансы, которые не видны на кривой статичного помещения. Доминирующий низко добротный подъём замечен, потому что он вносит существенный вклад в форму АЧХ звуковой мощности. Таким образом, эквалаизация помещения может ослабить его эффект, но присутствие и значимость других замаскированы. Смысл этого в том, чтобы показать, что вся информация содержится в беззеховых данных, и только часть ее видна на статичной АЧХ помещения. Вывод состоит в том, что начинать нужно с всеобъемлющих беззеховых данных, на основе которых можно предвидеть проблемы в помещении, по крайней мере, те что выше частоты Шрёдера.

В целом хорошая направленность наводит на мысль о том, что звук такого громкоговорителя может быть улучшен эквалайзером. Однако улучшение ограничено резонансами средней добротности, которые явно не видны на АЧХ помещения и, следовательно, не будут устранены. Если громкоговоритель демонстрирует подобную волнистость на АЧХ помещения из-за частотно-зависимой направленности, как показано на рис. 4, даже такое ограниченное "лечение" не поможет. Решением может быть замена на громкоговоритель получше, что можно было бы предвидеть, если обладать исчерпывающими беззеховыми данными. Но общие технические характеристики громкоговорителей в значительной степени неинформативны. Та же дилемма возникает, когда частотно-зависимое поглощение в помещении влияет на его статичную АЧХ - эффект виден, но причина неизвестна и "лекарство" неочевидно.

И последнее: эти данные показывают, что допуск  $\pm 3$  дБ на статичной АЧХ помещения - это всего лишь лицензия на создание звука. Определение того, хороший это звук или нет, требует дополнительных данных. Необходимы дополнительные исследования такого рода.

## 7 «ЕДИНЫЙ» ПОДХОД К СОЗДАНИЮ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЮ ЗВУКА

Ничто в акустике помещений, в которых мы живём и слушаем, не является постоянным, однако люди замечательно справляются с этим, приспосабливаясь к различным звуковым полям, сохраняя при этом стабильное восприятие источников звука. Смена помещения принципиально не меняет тембральный характер голосов и музыкальных инструментов. Это те же голоса и инструменты, которые звучат в разных местах. Создание и воспроизведение звука не рассматриваются по-разному. Это нормально — естественная акустика в действии. Похоже, мы принимаем различные усиления басов, возникающие в результате кумулятивного отражённого звука, как характеристика помещений, а не описание источника. Если симфонический оркестр звучит "слабо", в том вина зала, а не инструментов или музыкантов. Если знакомый мужской голос звучит необычно "богато", это объясняется характером пространства, в пределах которого передаётся звук.

На протяжении всей истории воспроизведения звука целью разработчиков громкоговорителей была ровная и плавная АЧХ на оси. Логика заключалась в том, что каким

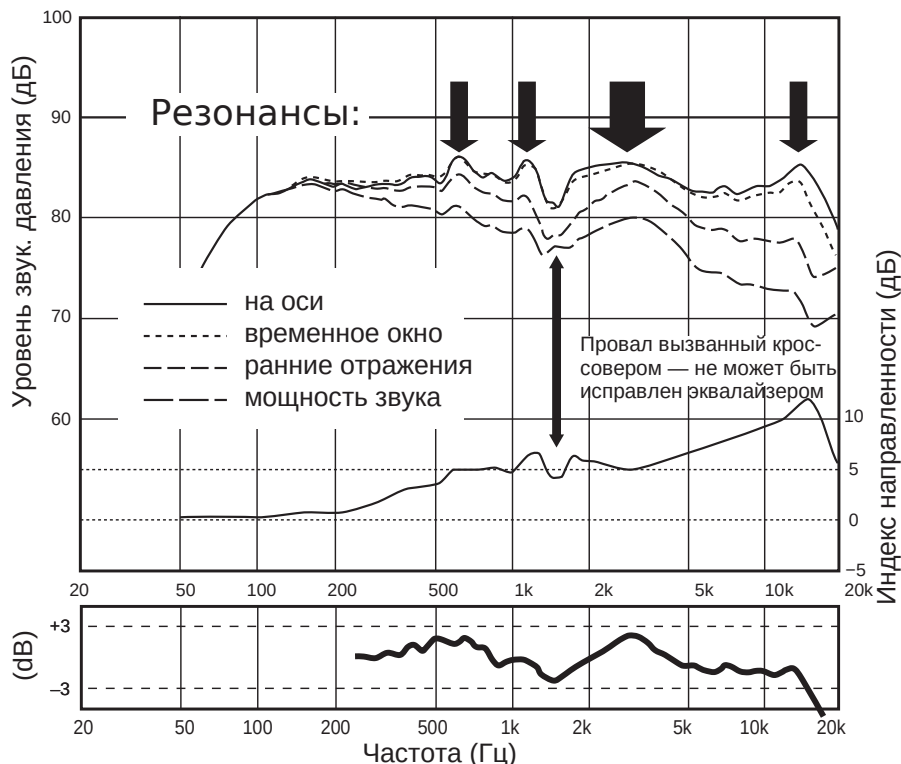


Рис. 21. В верхней части показаны данные “спинорамы” плохого громкоговорителя, показывающие резонансные пики и провал. В нижней части показана усреднённая (6 точек в пространстве) АЧХ статичного помещения. Данные из [61].

бы ни был спектр исходного записанного звука, громкоговоритель должен воспроизводить его как можно точнее. Позже было обнаружено, что поддержание такой же плавной АЧХ вне оси приводит к ещё более высоким субъективным оценкам [1, 9, 45, 46]. Рис. 13(с) дает убедительное доказательство того, что может пойти не так, когда разработчики пренебрегают этим фактором.

### 7.1 Существует ли единый стандарт для всех задач воспроизведения звука?

До этого момента указывалось, что измерения в помещении сами по себе являются недостаточными данными, по которым можно предсказывать качество звука. Однако они не лишены ценности, особенно если имеется определённая информация о громкоговорителе. Обычная практика интерпретации таких измерений заключается в сравнении их с целевой кривой, описывающей желаемый результат. Мы знаем, что таких кривых может быть множество, в зависимости от временного окна. Очень короткие и очень длительные временные интервалы дают нам представление, соответственно, о прямом звуке и о статичном звуковом поле после того, как отражённые звуки внесли свой вклад.

На рис. 22 приведены прогнозируемые АЧХ из этой статьи. Измерения в реальных местах показали похожую тенденцию. На рис. 22(а), (b) и (с) заштрихованные области показывают диапазон, в пределах которого могут находиться статичные АЧХ помещения, в зависимости от их уровня отражений - высокая отражательная способность вверху, низкая отражательная способность внизу. Во всех трех случаях громкоговорители имели плоские АЧХ прямого звука. Жирные пунктирные кривые - это оценки автора для “типично отражающих” ком-

нат в каждой из категорий. Кривая (d) является результатом эксперимента, в ходе которого слушатели настраивали НЧ и ВЧ регуляторы для достижения удовлетворительного спектрального баланса для разного материала. Кривая (e) - текущая Икс-кривая согласно SMPTE ST 202 для статичных звуков на расстоянии 2/3 в кинотеатрах и на студиях дубляжа [21]. Она устанавливает фиксированный предел для уровня НЧ в статичном состоянии. Следовательно, в этом случае серая область показывает диапазон в котором может находиться прямой звук, как показано на рис.12(b).

К этому необходимо добавить канал LFE, отдельный канал НЧ, для специальных эффектов на частотах, которые перекрывают НЧ область фронтальных каналов. Стандартных методов решения акустических взаимодействий, создаваемых этим перекрытием не существует [4]. Не имеет значения, отличаются ли звуки LFE от звуков в фронтальных каналах или совпадают с ними; простое излучение звука из обоих типов громкоговорителей уже приводит к акустическим помехам, слышимый эффект которых зависит от их физического расположения и расположения слушателей в помещении.

В этом отношении домашние кинотеатры, управляющие басами с помощью обрезающих фильтров низких и высоких частот, гораздо лучше контролируют низкочастотные акустические события. Такой подход пригласил бы и в кинотеатре, разве что в более проработанной форме, как решение для особых проблем многоканального звука в больших залах.



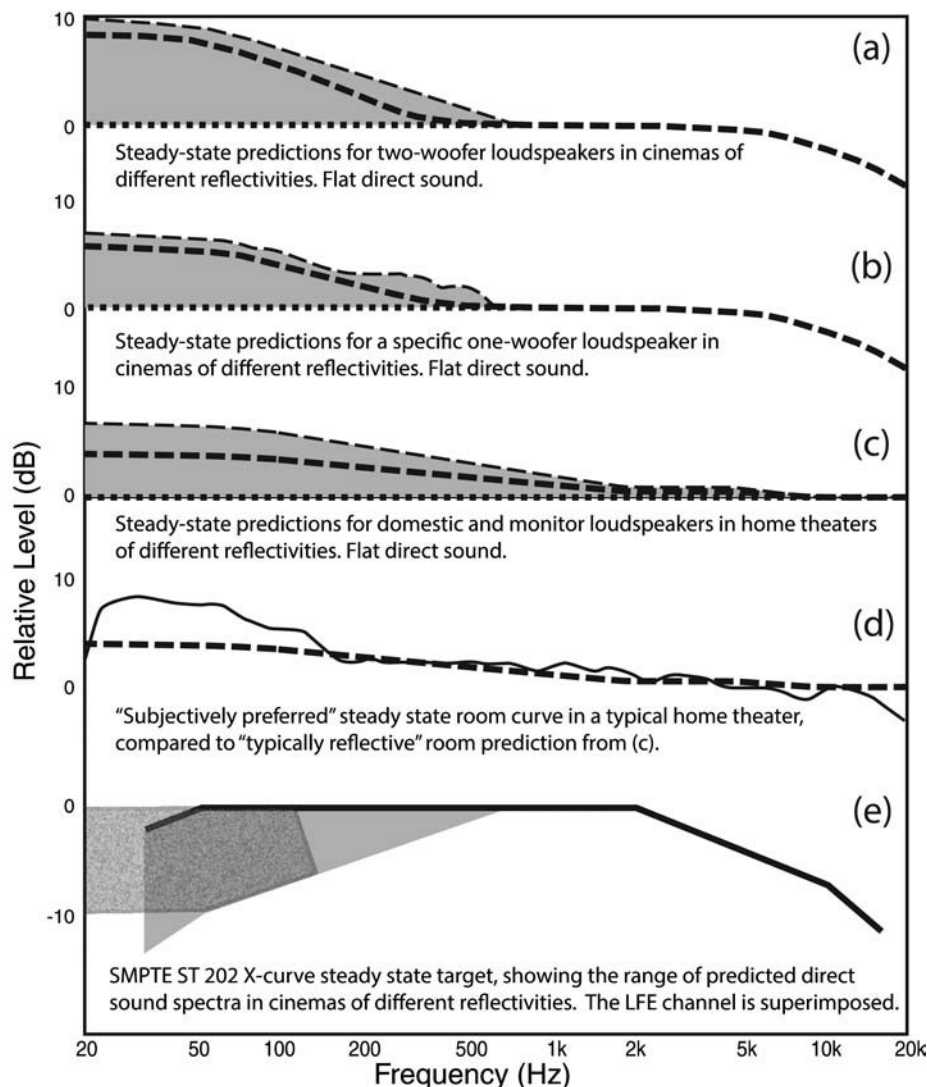


Рис. 22. (a) Предсказания статичного звука в кинотеатре, от громкоговорителя с двумя НЧ динамиками и ровной АЧХ прямого звука; с рис.5(б). (b) Прогнозы статичного звука в кинотеатре, от конкретного монитора с одним НЧ динамиком и ровной АЧХ прямого звука; из рис. 18(б). (c) Прогнозы статичного звука от монитора с одним НЧ динамиком и различных потребительских громкоговорителей излучающих плоский прямой звук в бытовых помещениях малого и среднего размера; с рис. 13(а). (d) Кривая предпочтений “все слушатели” на рис. 14. (e) Целевая АЧХ SMPTE ST 202 для студий дубляжа и кинотеатров на рис. 7(а). Заштрихованная область показывает диапазон кривых прямого звука для объектов с различной отражательной способностью, как показано на рис. 11(б). Канал LFE накладывается, показывая большое спектральное перекрытие с фронтальными каналами.

Метод калибровки SMPTE/ISO не может обеспечить ровный прямой звук. Спад на ВЧ одинаков как в прямом, так и в статичном звуковом поле. Низкочастотный прямой звук будет иметь различную степень ослабления в зависимости от направленности НЧ динамиков и отражательной способности помещений — затенённая область. Только в глухих помещениях прямой звук на НЧ будет приблизительно ровным. Нигде басу не разрешается подниматься над уровнем прямой, что вызывает вопрос, были ли усиления басов, обнаруженные в нескольких показанных ранее кинотеатрах, добавлены намеренно, потому что они звучали лучше?

Миксы, сведённые в помещении, откалиброванном, как показано на рис. 22 (e), будут включать настройки спектрального баланса НЧ и ВЧ, которые станут частью звукового “творения”. Часто упускаемый из виду аспект спектрального баланса заключается в том, что дефицит басов часто интерпретируется как избыток верхов и наоборот. При воспроизведении в акустически аналогичных

кинотеатрах, откалиброванных по Икс-кривой, спектральный баланс “творения” должен передаваться правильно. Однако при воспроизведении в других помещениях, как представлено на (a), (b) и (c) - т.е. на качественных системах усиления звука, в комнатах для сведения, на домашних и автомобильных аудиосистемах (включая наушники) - спектральные/тембральные характеристики не будут одинаковыми. “Творение” будет звучать не так как оно было задумано (рис. 1). Без сомнения, способные к адаптации люди все равно извлекут нужную информацию и найдут это развлекательным, но что не говори, качество звука не сохранится. Саундтреки к фильмам должны быть совместимы с миром за пределами кинотеатров, и в кинотеатрах может понадобится воспроизвести музыкальные программы, созданные вне контекста фильма. С этим проблема. Когда звуковые дорожки, созданные для кинотеатров, переводятся на другие носители, то это происходит без каких либо требований к спектральным коррекциям. Потребители, чувствительные к дисбалансу тембров, могут счесть

полезными старомодные НЧ и ВЧ регуляторы.

Некоторые проф. студии звукозаписи, студии дубляжа и несколько кинотеатров гораздо лучше заглушены акустически, чем это принято в остальном мире аудио. Микширование, выполненное в студии дубляжа F (рис. 9), вероятно, будет звучать аналогично при прослушивании в “эталонном” кинотеатре В, который имеет похожую отражательную способность (рис. 3), но, скорее всего, будет отличаться в типичных кинотеатрах А, С и D представленных на рис. 3 и рис. 8. Проблема ли это? Влияет ли поглощение большей части энергии на НЧ и СЧ на воспринимаемый между ними баланс? Это возможная переменная в “круге ошибок”, когда фильмы или муз. записи, сделанные в таких помещениях, воспроизводятся в комнатах с обычными отражениями.

Заманчиво просто “убрать комнату” при микшировании. Некоторые утверждают, что это упрощает работу. В недавней статье были представлены доказательства того, что при микшировании, акустически глухая среда может быть предпочтительнее, но для мастеринга желательнее более отражающее пространство [12]. Это согласуется с другими выводами, указывающими на то, что для развлекательного прослушивания (которому мастеринг должен пытаться подражать) желательны некоторые отражения в помещении, например, [1, 2, 13, 14]. При создании звуковых дорожек фильма микширование и мастеринг осуществляются одновременно. Это, по-видимому, ещё одна достойная тема для психоакустического исследования.

## 7.2 Вопросы для исследования

В этой статье было рассмотрено несколько факторов, влияющих на воспроизведение звука. Некоторые, по-видимому, имеют приемлемые решения, другие все ещё являются предметом мнений и суждений, в том числе автора. В конце концов, в результате исследований должны быть получены дополнительные рекомендации. Ниже приведены некоторые темы, которые заслуживают внимания:

1. В обычных помещениях спектры прямого звука и статичного звука различны. Как воспринимается увеличение НЧ(переменными являются время, амплитуда и частота) из-за отражений в помещении? Каков порог обнаружения и, при необходимости, можно ли его компенсировать электронными средствами?
2. Для оценки отражательной способности помещения лучше использовать часть ранних отражений обычных данных о времени реверберации или использовать время накопления энергии ранних отражений? Последнее, по-видимому, имеет более прямое отношение к восприятию. Темы 1 и 2, очевидно, связаны между собой. В любом случае измерения следует проводить с использованием потребительских громкоговорителей, а не всенаправленного источника, такого как додекаэдрический громкоговоритель. Они предназначены для выступлений, но даже там они являются грубой заменой музыкальных инструментов и голосов.
3. Ровный, тембрально нейтральный, прямой звук, по-видимому, является логической целью. Как лучше всего этого можно достичь на практике? Возможны беззховые данные громкоговорителя (при необходимости корректируемые из-за поте-

ри экрана) и измерения с временным окном на месте.

4. Каково оптимальное частотное разрешение при акустических измерениях Для беззховых данных громкоговорителей и для измерений НЧ в помещениях необходимо высокое разрешение (например, 1/20 окт), чтобы выявить и охарактеризовать проблемы со звуком, особенно резонансы, и для обеспечения коррекции эквалайзером. Если будет решено, что измерения в статичном режиме полезны в стандартизированных комбинациях громкоговоритель-помещение, уменьшение разрешения на СЧ и ВЧ может иметь преимущества за счёт выявления широких спектральных тенденций без отвлечения на неминимальные фазовые колебания, которые невозможно выровнять. Допуски на эти измерения - это ещё одна тема, и кажется, что  $\pm 3$  дБ это слишком щедро, включая АЧХ помещения с громкоговорителями, охватывающими широкий диапазон воспринимаемого качества звука. Здесь нужно серьёзное обсуждение.
5. На НЧ, поверхности (перегородка, пол, стены и т.д.) влияют на то, что можно измерить и услышать. Эти эффекты могут быть количественно оценены с помощью измерений в помещении и компенсированы эквалайзером. Необходима методология для устранения этих явлений, которые, вероятно, существуют ниже примерно 300 Гц.
6. Необходимо ли компенсировать затухание воздуха из-за расстояния до громко-лей в кинотеатрах или это ожидаемо зрителями? Существующие мнения касаются в первую очередь отражающих рабочих пространств. Имеют ли значение низкое ВР кинотеатра и ожидания, связанные с изображением на большом экране?
7. Микрофоны, расположенные на уровне ушей, регистрируют провал из-за сидений и эффекты акустических помех. Маловероятно, что они могут быть устранены эквалайзером. Нужно ли пытаться, или люди приспосабливаются к местным акустическим условиям? Есть ли лучшие способы охарактеризовать прямой звук?
8. Если в качестве альтернативы существующей LFE конфигурации, выбрать управляемый бас, сколько сабов экранных, боковых, задних, на потолке, необходимо, чтобы избежать отвлекающих локализаций? Каковы оптимальные частоты и порядки фильтров кроссовера?

## 8 ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Статичные АЧХ помещения являются важными но не полноценными данными. Было показано, что при наличии исчерпывающих беззховых данных о громкоговорителях и при наличии базовых знаний об акустике места воспроизведения фундаментальные аспекты кривых помещения могут быть предсказаны во многих обычных местах. Обратное неверно. Как только звук из громкоговорителя попадает в отражающее пространство, мы теряем способность тщательно его исследовать. Помимо прочего, информация о звуковых резонансах в громкоговорителях может быть скрыта в кривых помещения, что означает, что они не могут быть оценены или исправлены.

Бинауральный человеческий слух значительно сложнее и способнее, чем омни микрофон+анализатор, и его компьютерный эквивалент всё ещё далёк от совершенства. В то же время было обнаружено, что опираясь на полный набор беззвучных данных громкоговорителя можно прогнозировать субъективные оценки качества звука в двойных слепых тестах, проводимых в обычной комнате среднего размера [45, 46]. Корреляцию между субъективными оценками и объективными прогнозами невозможно игнорировать: от 0,86 (для громкоговорителей с различным срезом на НЧ) до 0,995 (для громкоговорителей с сопоставимым частотным диапазоном),  $p = < 0,0001$  в обоих случаях. Только на басовые характеристики приходилось около 30% общих субъективных оценок — спектральный баланс имеет значение.

Тут можно провести параллель с живыми концертами без усиления, когда люди способны существенно отделять звуки инструментов и голосов от звуков, добавляемых помещением, в котором те выступают, даже если место проведения является частью представления. Если целью является хороший звук, то трудно отказаться от идеи, что отправной точкой для калибровки являются беззвучные данные громкоговорителя. Минимальный набор данных будет состоять из описаний прямого звука (по оси и/или в окне прослушивания) и общей мощности излучаемого звука и/или индекса направленности. АЧХ прямого звука, скорее всего, должна быть плоской: нейтральной. Как показано на рис. 19(с), в “типичных” кинотеатрах и домашних аудиториях такие громкоговорители должны обеспечивать предсказуемо хороший звук в диапазоне от СЧ до ВЧ без какого-либо вмешательства. Наверное не нужно накакой “калибровки” в кинотеатрах, кроме компенсации потери из-за экрана.

Существует разница между уровнем прямого и статичного звуков, которая увеличивается на более низких частотах на величину, определяемую направленностью громкоговорителя и отражательной способностью помещения. Как прямые, так и статичные звуки важны для тембрального восприятия, но реальность такова, что в обычных помещениях они не одинаковы. Следовательно, ни статичная АЧХ помещения, ни АЧХ прямого звука не могут быть окончательным описанием тембра для всех программ, на всех площадках, на всех частотах. Киноиндустрия решила, что статичный звук должно быть ровным ниже 2 кГц, большая часть музыки/аудио индустрии решила, что ровный прямой звук является нормой. Последнее имеет то преимущество, что согласуется с естественным восприятием живых (неусиленных) акустических событий.

В небольших помещениях, измерения на НЧ необходимы из-за стоячих волн, и почти наверняка потребуются корректирующие меры. Применение несколько сабвуферов способно уменьшить различия между местами, что делает эквализацию эффективной для нескольких мест. Проблемы с отражениями от поверхностей существуют во всех комнатах. Они выявляются с помощью пространственно-усредненных измерений, и они подаются эквализации. В конечном счёте, простого измерения, которое раскрывало бы всё, не существует, а это означает, что правильная калибровка системы воспроизведения в большом помещении, неизвестно как построенном, может потребовать некоторого времени и квалифицированной технической команды. Однако это не-

обходимо сделать лишь один раз, после чего периодические регулярные проверки с использованием простых измерений могут обеспечить непрерывное функционирование всех элементов. Стандартизация набора беззвучных данных громкоговорителей значительно упростила бы этот процесс.

У нас остаётся комбинация вопросов и ответов, но на данный момент информации достаточно, чтобы подумать о некоторых универсальных рекомендациях. Отправной точкой будет передача точного, нейтрального, прямого звука. Тот факт, что наблюдается повышение уровня басов в течение короткого ( $< 150$  мс) интервала после прямого звука, является переменной, для которой нет практического контроля — она зависит от помещения и направленности источника. Люди вполне могут рассматривать это явление как нормальный компонент звука в помещении, и в этом случае это не “ошибка”, нуждающаяся в исправлении, а просто информация о среде прослушивания. Это означает, что статичная АЧХ помещения должна увеличиваться на некоторую величину на НЧ. Это достойная тема для исследования.

Нет необходимости в принципиально разных подходах к аудиториям, кинотеатрам, стереосистемам, домашним кинотеатрам или автомобилям — у каждого из них есть понятные различия, но все они демонстрируют в основном схожие характеристики с удивительно небольшими вариациями. У нас ещё нет всех частей головоломки, но у нас есть достаточно, чтобы представить, что некоторые тщательно продуманные исследования могут обеспечить недостающие связи и подтверждения. Но что мы знаем, так это то, что некоторые из существующих рекомендаций и отраслевых практик не являются оптимальными, а другие просто неверны.

## 9 REFERENCES

- [1] F. E. Toole, *Sound Reproduction: The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms* (Focal Press, 2008).
- [2] F. E. Toole, “Loudspeakers and Rooms for Sound Reproduction—A Scientific Review,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 54, pp. 451–476 (2006 Jun.).
- [3] J. Meyer, *Acoustics and the Performance of Music*, Fifth Edition (Springer, New York, 2009).
- [4] SMPTE TC-25CSS, “B-Chain Frequency and Temporal Response Analysis of Theaters and Dubbing Stages,” *Soc. Motion Picture and Television Eng.* (2014).
- [5] Y.-J. Choi, J. S. Bradley, and D.-U. Jeong, “Experimental Investigation of Chair Type, Row Spacing, Occupants, and Carpet on Theater Chair Absorption,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 137, pp. 105–116 (2015). <http://dx.doi.org/10.1121/1.4904532>
- [6] J. S. Bradley, “Sound Absorption of Gypsum Board Cavity Walls,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 45, pp. 253–259 (1997 Apr.).
- [7] IEC-268-13, “Listening Tests on Loudspeakers,” 11985).
- [8] F. E. Toole, “Listening Tests—Turning Opinion into Fact,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 30, pp. 431–445 (1982 Jun.).
- [9] F. E. Toole, “Loudspeaker Measurements and Their Relationship to Listener Preferences,” *J. Audio Eng. Soc.*, 34, pt. 1, pp. 227–235, pt. 2, pp. 323–348 (1986 Apr., May).



- [10] R. Genereux, "Signal Processing Considerations for Acoustical Environment Correction," *Audio Eng. Soc. UK 7th Conference: Digital Signal Processing, Paper DSP-14* (1992 Sep.).
- [11] L. D. Fielder, "Analysis of Traditional and Reverberation-Reducing Methods of Room Equalization," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 51, pp. 3–26 (2003 Jan./Feb.).
- [12] S. Tervo, P. Laukkanen, J. Pätynen, and T. Lokki, "Preferences of Critical Listening Environments Among Sound Engineers," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 62, pp. 300–314 (2014 May).
- [13] Y. Ando, "Subjective Preference in Relation to Objective Parameters of Music Sound Fields with a Single Echo," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 62, pp. 1436–1441 (1997). <http://dx.doi.org/10.1121/1.381661>
- [14] S. Kishinaga, Y. Shimizu, S. Ando, and K. Yamaguchi, "On the Room Acoustic Design of Listening Rooms," presented at the 64th Convention of the Audio Engineering Society (1979 Nov.), convention paper 1524.
- [15] R. F. Allison, "The Influence of Room Boundaries on Loudspeaker Power Output," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 22, pp. 314–320 (1974 Jun.).
- [16] R. F. Allison, "The Sound Field in Home Listening Rooms, II," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 24, pp. 14–19 (1975 Feb.).
- [17] T. Welti, "How Many Subwoofers Are Enough," presented at the 112th Convention of the Audio Engineering Society (2002 Apr.), convention paper 5602.
- [18] T. Welti and A. Devantier, "Low-Frequency Optimization Using Multiple Subwoofers," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 54, pp. 347–365 (2006 May).
- [19] A. Celestinos and S. B. Nielsen, "Optimizing Placement and Equalization of Multiple Low Frequency Loudspeakers in Rooms," presented at the 119th Convention of the Audio Engineering Society (2005 Oct.), convention paper 6545.
- [20] A. Celestinos and S. B. Nielsen, "Low Frequency Sound Enhancement System for Rectangular Rooms Using Multiple Low Frequency Loudspeakers," presented at the 120th Convention of the Audio Engineering Society (2006 May), convention paper 6688.
- [21] SMPTE ST 202:2010, "For Motion Pictures—Dubbing Stages (Mixing Rooms), Screening Rooms and Indoor Theaters—B-Chain Electroacoustic Response" (2010).
- [22] ISO 2969, "International Standard. Cinematography—B-Chain Electroacoustic Response of Motion-Picture Control Rooms and Indoor Theaters—Specifications and Measurements" (1987).
- [23] J. S. Bradley, H. Sato, and M. Picard, "On the Importance of Early Reflections for Speech in Rooms," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113, pp. 3233–3244 (2003). <http://dx.doi.org/10.1121/1.1570439>
- [24] C. S. Watson and R. W. Gengel, "Signal Duration and Signal Frequency in Relation to Auditory Sensitivity," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 46, pp. 989–997 (1969). <http://dx.doi.org/10.1121/1.1911819>
- [25] F. E. Toole and S. E. Olive, "The Modification of Timbre by Resonances: Perception and Measurement," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 36, pp. 122–142 (1988 Mar.).
- [26] B. G. Shirley, P. Kendrick, and C. Churchill, "The Effect of Stereo Crosstalk on Intelligibility: Comparison of a Phantom Stereo Image and a Central Loudspeaker Source," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 55, pp. 852–863 (2007 Oct.).
- [27] G. Leembruggen, "Low Frequency Issues: Cinema/Home/Internet," presented at the AES 57th International Conference: The Future of Audio Entertainment Technology: Cinema, Television and the Internet (2015 Mar.), conference paper 1-4.
- [28] J. S. Bradley, G. A. Soulodre, and S. Norcross, "Factors Influencing the Perception of Bass," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 101, p. 3135 (1997). <http://dx.doi.org/10.1121/1.419017>
- [29] F. E. Toole, "Home Theaters to Cinemas: Sound Reproduction in Small and Large Rooms," presented as part of Sound for Pictures workshop at the 133rd Convention of the Audio Engineering Society (2012 Oct.).
- [30] L. D. Fielder, "Frequency Response versus Time-of-Arrival for Typical Cinemas," presented at the 2012 SMPTE Annual Technical Conference.
- [31] T. Holman, "Cinema Electro-Acoustic Quality Redux," *SMPTE Mot. Imag. J.*, vol. 116, no. 5–6, pp. 220–233 (May/June 2007).
- [32] P. Newell, K. Holland, S. Torres-Guijarro, S. Castro, and E. Valdigem, "Cinema Sound: A New Look at Old Concepts," *Proc. Inst. of Acoust.*, vol. 32, pt. 5 (2010).
- [33] W. B. Snow, "Loudspeaker Testing in Rooms," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 9, pp. 54–60 (1961 Jan.).
- [34] J. Eargle, J. Bonner, and D. Ross, "The Academy's New State-of-the-Art Loudspeaker System," *SMPTE Mot. Imag. J.*, vol. 94, no. 6, pp. 667–675 (June 1985).
- [35] I. Allen, "The X-Curve: Its Origins and History," *SMPTE Mot. Imag. J.*, vol. 115, no. 7–8, pp. 264–273 (July/Aug. 2006).
- [36] L. A. Gedemer, "Evaluation of the SMPTE X-Curve Based on a Survey of Re-recording Mixers," presented at the 135th Convention of the Audio Engineering Society (2013 Oct.), convention paper 8996.
- [37] T. Holman, "A History of the X-Curve," *Surround Professional*, vol. 3 (Jan. 2000).
- [38] S. E. Olive, T. Welti, and E. McMullin, "Listener Preference for Different Headphone Target Response Curves," presented at the 134th Convention of the Audio Engineering Society (2013 May), convention paper 8867.
- [39] P. Newell, "Cinema Calibration and the X-Curve," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 62, pp. 808–809 (2014 Nov.).
- [40] B. Long, R. Schwenke, P. Soper, and G. Leembruggen, "Further Investigations into the Interactions Between Cinema Loudspeakers and Screens," *SMPTE Mot. Imag. J.*, pp. 46–62 (Nov./Dec. 2012).
- [41] P. Newell, J. G. Garcia, and K. Holland, "An Investigation into the Acoustical Effects of Cinema Screens on Loudspeaker Performance," *Proc. Inst. of Acoustics*, vol. 35, Pt. 2 (2013).



- [42] D. Elliott, K. Holland, and P. Newell, "The Audibility of Comb-Filtering Due to Perforated Cinema Screens," *Proc. Inst. of Acoustics*, vol. 36, Pt. 3 (2014).
- [43] G. Leembruggen and P. Newell, "Equalisation of High Frequency Cinema Screen Losses" presented at the *AES 57th International Conference: The Future of Audio Entertainment Technology: Cinema, Television and the Internet* (2015), conference paper 1-4.
- [44] S. E. Olive, B. Castro, and F. E. Toole "A New Laboratory for Evaluating Multichannel Audio Components and Systems," presented at the *105th Convention of the Audio Engineering Society* (1998 Sep.), convention paper 4842.
- [45] S. E. Olive, "A Multiple Regression Model for Predicting Loudspeaker Preference Using Objective Measurements: Part 1 – Listening Test Results," presented at the *116th Convention of the Audio Engineering Society* (2004 May), convention paper 6113.
- [46] S. E. Olive, "A Multiple Regression Model for Predicting Loudspeaker Preference Using Objective Measurements: Part 2 – Development of the Model," presented at the *117th Convention of the Audio Engineering Society* (2004 Oct.), convention paper 6190.
- [47] R. Green and T. Holman, "First Results from a Large-Scale Measurement Program for Home Theaters," presented at the *129th Convention of the Audio Engineering Society* (2010 Nov.), convention paper 8310.
- [48] S. E. Olive, T. Welti, and E. McMullin, "Listener Preferences for In-Room Loudspeaker and Headphone Target Responses," presented at the *135th Convention of the Audio Engineering Society* (2013 Oct.), convention paper 8994.
- [49] S. E. Olive, "A New Reference Listening Room for Consumer, Professional and Automotive Audio Research," presented at the *126th Convention of the Audio Engineering Society* (2009 May), convention paper 7677.
- [50] S. E. Olive, J. Jackson, A. Devantier, D. Hunt, and S. Hess, "The Subjective and Objective Evaluation of Room Correction Products," presented at the *127th Convention of the Audio Engineering Society* (2009 Oct.), convention paper 7960.
- [51] S. E. Olive and T. Welti, "Validation of a Binaural Car Scanning System for Subjective Evaluation of Automotive Audio Systems," presented at the *AES 36th International Conference: Automotive Audio* (2009 Jun.), conference paper 7.
- [52] D. Clark, "Progress in Perceptual Transfer Function Measurement—Tonal Balance," presented at the *110th Convention of the Audio Engineering Society* (2001 May), convention paper 5407.
- [53] M. Binelli and A. Farina, "Digital Equalization of Automotive Sound Systems Employing Spectral Smoothed FIR Filters," presented at the *125th Convention of the Audio Engineering Society* (2008 Oct.), convention paper 7575.
- [54] L. A. Gedemer, "Predicting the In-Room Response of Cinemas from Anechoic Loudspeaker Data," presented at the *AES 57th International Conference: The Future of Audio Entertainment Technology* (2015 Mar.), conference paper 1-1.
- [55] ANSI/CEA-2034, "Standard Method of Measurement for In-Home Loudspeakers," Consumer Electronics Association, Technology & Standards Department, [www.CE.org](http://www.CE.org) (2013).
- [56] <https://www.klippel.de/our-products/rd-system/modules/nfs-near-field-scanner.html>
- [57] D. Logan, "A New Approach to Loudspeaker Measurements," *Voice Coil*, vol. 28, no. 7, pp. 8–12 (2015).
- [58] A. Devantier, "Characterizing the Amplitude Response of Loudspeaker Systems," presented at the *113th Convention of the Audio Engineering Society* (2002 Oct.), convention paper 5638.
- [59] S. E. Olive, P. L. Schuck, S. Sally, and M. Bonneville, "The Variability of Loudspeaker Sound Quality among Four Domestic Sized Rooms," presented at the *99th Convention of the Audio Engineering Society* (1995 Oct.), convention paper 4092.
- [60] A. S. Bregman, *Auditory Scene Analysis, the Perceptual Organization of Sound* (MIT Press, 1990).
- [61] S. E. Olive, S. M. Hess, and A. Devantier, "Comparison of Loudspeaker-Room Equalization Preference for Multichannel, Stereo and Mono Reproductions: Are Listeners More Discriminating in Mono?" presented at the *124th Convention of the Audio Engineering Society* (2008 May), convention paper 7492.

## THE AUTHOR



Floyd E. Toole

Floyd E. Toole studied electrical engineering at the University of New Brunswick and at the Imperial College of Science and Technology, University of London where he received a Ph.D. In 1965 he joined the National Research Council of Canada where he reached the position of Senior Research Officer in the Acoustics and Signal Processing Group. In 1991 he joined Harman International Industries Inc. as Corporate Vice President – Acoustical Engineering. In this position he worked with all Harman International companies and directed the Harman Research and Development Group, a central resource for technology development and subjective measurements, retiring in 2007. He is currently a consultant to Harman.

Dr. Toole's research has focused on the acoustics and psychoacoustics of sound reproduction, directed to improving engineering measurements, objectives for loud-

speaker design and evaluation, and techniques for reducing variability at the loudspeaker/room/listener interface. For papers on these subjects he has received two AES Publications Awards and, for service to the society, the Board of Governors Award. For his achievements he has been recognized with both the AES Silver Medal (1996) and Gold Medal (2013) Awards. He is a Fellow and Past President of the AES, a Fellow of the Acoustical Society of America, and a Fellow of CEDIA (Custom Electronic Design and Installation Association). He has been awarded Lifetime Achievement awards by CEDIA and ALMA (Association of Loudspeaker Manufacturing & Acoustics International). In 2015 he was inducted into the CE Hall of Fame. He has authored the book, *Sound Reproduction: The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms* (Focal Press, 2008).