

# Методы румкоррекции Lyngdorf

RoomPerfect™: принцип действия, математика фильтра, режимы, ограничения,  
сопоставление с «обычной» FIR-коррекцией; приложение — разбор доклада AES 2007  
Инженерный обзор · V6 · 4 августа 2026

Кратко. RoomPerfect — система адаптации «громкоговоритель-помещение», разработанная Яном Абильтгором Педерсеном (Jan Abildgaard Pedersen) и Каспером Томсеном в Lyngdorf Audio и представленная на 32-й Международной конференции AES «DSP for Loudspeakers» (Хиллерёд, 2007). Ключевое отличие от одноточечных систем: коррекция строится по измерению в точке прослушивания, но ограничивается сверху и снизу частотно-зависимыми пределами усиления, вычисленными из энергетического (power-average) отклика 3D-звукового поля. Целевая кривая не задаётся пользователем, а рассчитывается автоматически из оценённых параметров самой АС — нижней частоты среза и её наклона, чувствительности, индекса направленности и верхнего среза ВЧ-звена. Итоговый фильтр — FIR с минимально-фазовой реализацией (гомоморфная фильтрация в кепстральной области).

## 1. Что именно Lyngdorf называет «румкоррекцией»

В экосистеме Lyngdorf / Steinway Lyngdorf под коррекцией помещения понимается не один инструмент, а четыре уровня, работающих последовательно:

| Уровень                                       | Что делает                                                                                                                                                                                                     | Где применяется                                                                           |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| RoomPerfect™                                  | Основной адаптивный фильтр: разделяет собственный отклик АС и влияние комнаты, корректирует только второе. Режимы Focus / Global / Bypass.                                                                     | TDAL-1120/2170/3400, MP-40/50/60, RP-1 (внешний процессор), все системы Steinway Lyngdorf |
| Voicings                                      | Второй, независимый и вручную редактируемый слой EQ — вкусовая/жанровая коррекция поверх RoomPerfect (кино, ночной режим, компенсация ярких записей).                                                          | Все актуальные устройства, редактируется из приложения / веб-интерфейса                   |
| Бас-менеджмент и интеграция сабвуферов        | Кроссовер, уровни, задержки задаются в меню; RoomPerfect затем сшивает АС и вуферы по амплитуде и фазе как единый источник.                                                                                    | Устройства с сабвуферными выходами, системы с boundary woofers                            |
| Акустическая (не DSP) часть: boundary woofers | Граничное размещение НЧ-секций у пола/углов: прямой звук и первые отражения приходят в точку прослушивания синфазно, полоса до 500–800 Гц. Снижает саму проблему, которую иначе пришлось бы «лечить» фильтром. | Steinway Lyngdorf LS/LSR-серии, Model S/B/D, BW-серии Lyngdorf                            |

Важно для инженерной оценки: RoomPerfect в стерео-тракте работает до бас-менеджмента — отдельного независимого фильтра сабвуфер не получает, он обрабатывается пропорционально, в составе общего стереосигнала.

## 2. Постановка задачи: почему одна точка измерения недостаточна

Педерсен формулирует проблему как проекцию трёхмерного объекта на одномерную шкалу. Звуковое поле в помещении трёхмерно, а измерение SPL в одной точке — это функция одной переменной. На части частот такая проекция осмысленна, на части — нет.

- Провалы в АЧХ, вызванные интерференцией отражений и модами, порождают неконтролируемо высокое усиление в обратном фильтре. Классический ответ — грубое сглаживание перед инверсией, что размывает и то, что корректировать было нужно.
- Смещение микрофона или слушателя на 10 см меняет уровень на отдельных частотах до 20 дБ — по измерениям авторов, даже ниже 100 Гц.
- Наихудший случай: сильно возбуждённая мода, а точка прослушивания попала в её узел. Одноточечная система видит провал и добавляет усиление — то есть ещё сильнее раскачивает моду, которую следовало погасить.
- Минимально-фазовая часть отклика в принципе не инвертируется корректно более чем в одной точке.
- Целевая кривая. Часть влияния комнаты (плавный подъём к НЧ, room gain) естественна для слуха и удалению не подлежит; равномерная АЧХ субъективно звучит обеднённой по низу. Готовый набор пресетных таргетов не решает проблему, так как оптимальный таргет зависит от конкретной АС.

## 3. Алгоритм RoomPerfect

### 3.1. Сбор данных

Измеряется передаточная функция от электрического входа АС до давления на всенаправленном микрофоне. Первое измерение — Focus, в точке прослушивания, микрофон направлен на фронтальные АС (диаграмма капсюля и специальный тестовый сигнал минимизируют вклад комнаты — это и есть способ «увидеть» саму АС). Далее — не менее трёх, на практике 5–9 случайных позиций по всему объёму комнаты: по высоте, ширине и длине, а не вокруг дивана.

### 3.2. Глобальная кривая

Глобальный отклик — энергетическое среднее комплексных давлений по N позициям:

$$p_{\text{global}}(f) = \sqrt{\sum |p_i(f)|^2 / N}$$

Физический смысл:  $p_{\text{global}}$  приближённо равен отклику по мощности (power response) АС в данной комнате, тогда как измерение в точке прослушивания ближе к осевому давлению плюс доля мощностного отклика. Разница между ними и есть индекс направленности АС.

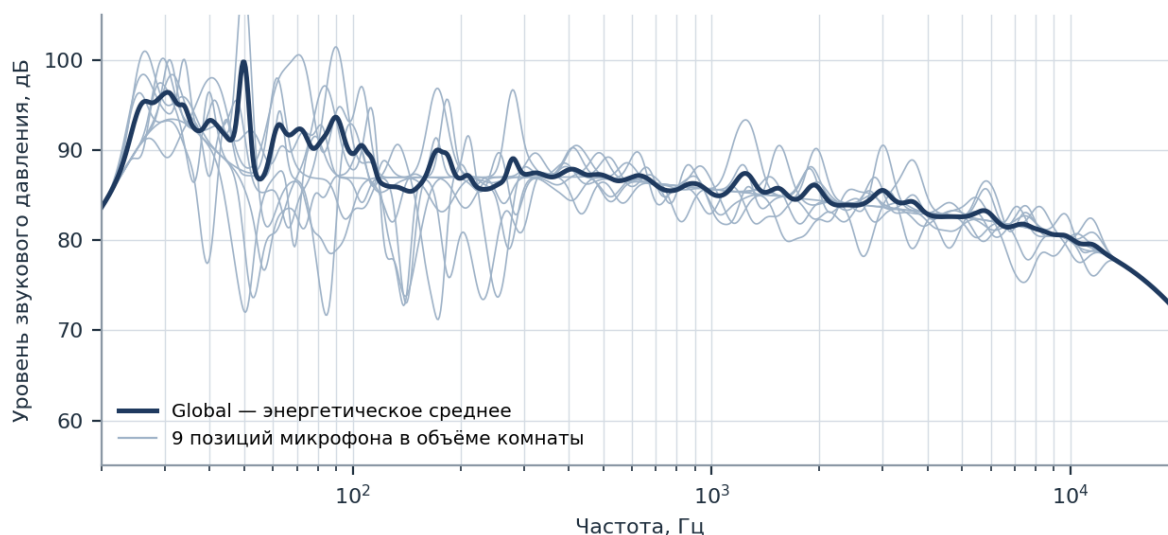


Рис. 1. Модельная иллюстрация: измерения в девяти случайных позициях объёма (серые) и их энергетическое среднее  $p_{global}$  (синяя). Именно среднее, а не отдельная кривая, приближает отклик АС по мощности в данной комнате.

### 3.3. Автоматический расчёт таргета

Из измерений оцениваются четыре параметра самой АС: нижняя частота среза и её наклон, чувствительность, индекс направленности, верхний срез твитера. По ним строятся две целевые кривые —  $T_{global}(f)$  и  $T_{focus}(f)$ . В примере из статьи: нижний срез 27,6 Гц, чувствительность 87,9 дБ (global) и 86,0 дБ (focus), наклон выше 467 Гц равен  $-4,1$  дБ/декаду; во второй комнате с другой АС — 36,4 Гц, 86,4 дБ,  $-18,4$  дБ/декаду выше 4195 Гц. То есть спад таргета в верхней части полосы — не константа, а прямое отражение направленности конкретной системы. Плавный подъём таргета к НЧ (room gain) сохраняется намеренно.

Промежуточные корректирующие фильтры:

$$H_{focus}(f) = T_{focus}(f) / p_{focus}(f)$$

$$H_{global}(f) = T_{global}(f) / p_{global}(f)$$

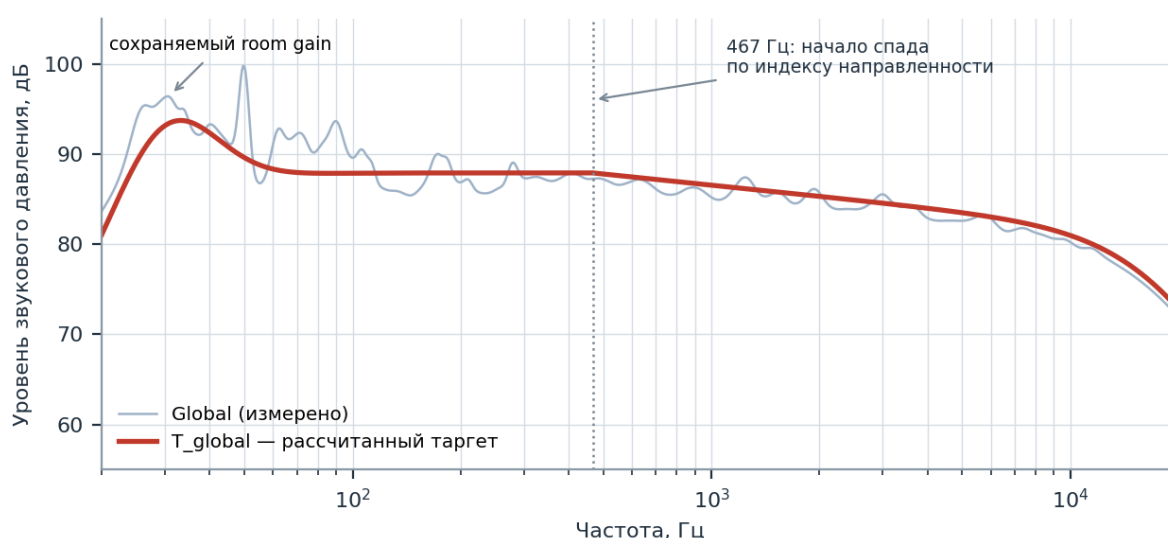


Рис. 2. Глобальная кривая и автоматически рассчитанный таргет  $T_{global}$ . Подъём к НЧ (room gain) сохраняется намеренно, спад в верхней части полосы задан оценённым индексом направленности АС.

### 3.4. Пределы усиления — ядро метода

Из  $H_{\text{global}}$  формируются частотно-зависимые границы. В приведённом в статье варианте:

```
gain_lower(f) =  $H_{\text{global}}(f) / 2$  (то есть  $H_{\text{global}}$  минус 6 дБ по амплитуде)  
gain_upper(f) = 1, если  $H_{\text{global}}(f) < 1$   
gain_upper(f) =  $H_{\text{global}}(f)$ , если  $H_{\text{global}}(f) \geq 1$ 
```

Логика: если энергии в 3D-поле на данной частоте избыток ( $H_{\text{global}}$  ниже 0 дБ), положительное усиление запрещено вовсе. Если в поле есть общий дефицит, скажем, 2 дБ — разрешается добавить не более 2 дБ. Итоговая характеристика  $G(f)$  — это  $H_{\text{focus}}$ , «зажатый» между границами: там, где  $H_{\text{focus}}$  укладывается в коридор, он проходит без изменений и без сглаживания, с полной детальностью. В примере авторов одноточечный фильтр требовал +19 дБ на 38 Гц; ограничитель срезает это требование, не прибегая к тотальному сглаживанию всей кривой.

Отсюда важное следствие: система не является взвешенным средним измерений. Фильтр всегда строится на измерении в точке прослушивания, а данные по комнате лишь направляют его. Поэтому добавление новых точек не ухудшает результат в кресле — в отличие от систем с пространственным усреднением.

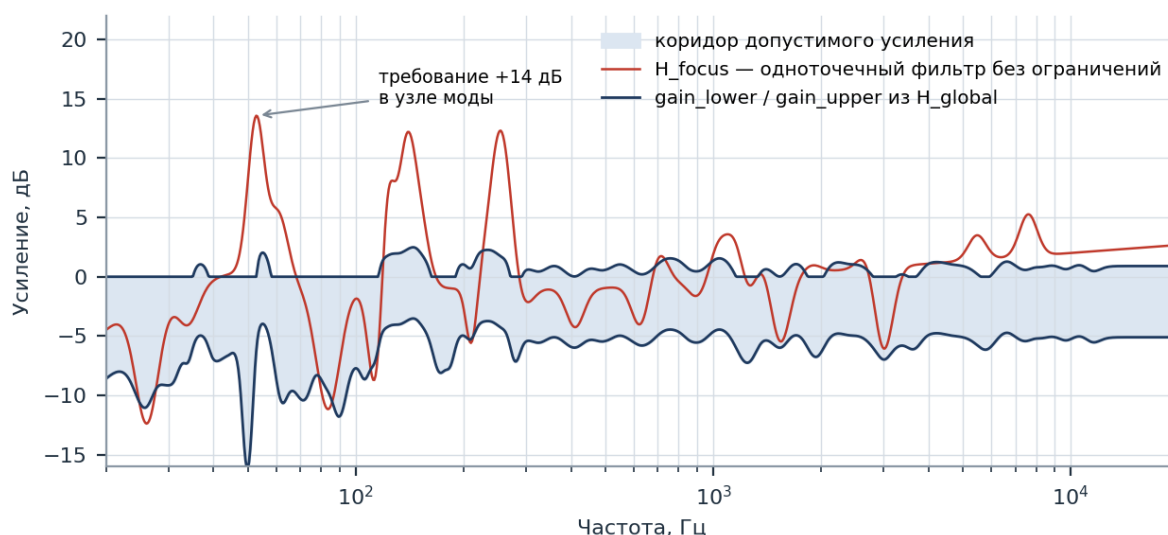


Рис. 3. Ключевой механизм: неограниченный одноточечный фильтр  $H_{\text{focus}}$  (красный) против коридора  $\text{gain\_lower} \dots \text{gain\_upper}$ , построенного из  $H_{\text{global}}$ . Требования большого подъёма в узлах мод отсекаются без сглаживания всей кривой.



Рис. 4. Итоговая характеристика  $G(f)$ : там, где  $H_{\text{focus}}$  укладывается в коридор, он проходит без изменений; за пределами коридора — усечение по границе.

### 3.5. Синтез фильтра

- $G(f)$  свёртывается со сглаживающей функцией — но здесь сглаживание управляет лишь детальностью и, соответственно, требуемой длиной FIR, а не борется с выбросами усиления.
- Сглаженный таргет  $G_{\text{smooth}}(f)$  — вещественная функция, то есть нулевая фаза на всех частотах.
- Реализация — минимально-фазовая, через гомоморфную фильтрацию в кепстральной области. Обоснование авторов: АС в значительной мере минимально-фазовая, и для минимально-фазовой части инверсия амплитуды даёт корректную фазу автоматически; корректировать полную фазу осмысленно лишь в одной точке пространства, поскольку фаза меняется по-разному в разных направлениях от кресла.
- Результат загружается в FIR-фильтр в сигнальном тракте перед усилителем мощности.

Практический вывод для практики: RoomPerfect принципиально не строит фильтр линейной фазы, а значит не порождает pre-ringing/преэхо — тот класс артефактов, который сопровождает линейно-фазовые и смешанно-фазовые схемы коррекции. Платой является отказ от коррекции избыточной фазы и групповой задержки помещения.

### 3.6. Кепстральный синтез простыми словами

Термин звучит устрашающе, но за ним стоит простая инженерная задача. Мы знаем, какую АЧХ должен иметь фильтр — это  $G_{\text{smooth}}(f)$ . Но АЧХ фильтр не определяет: одной и той же амплитудной характеристике соответствует бесконечно много вариантов фазы, и звучат они по-разному. Нужно выбрать один — тот, у которого нет отклика раньше основного импульса и минимальная групповая задержка. Это и есть минимально-фазовый вариант, а кепстральный синтез — способ его получить, ничего не подбирая вручную.

### Одна и та же АЧХ — три допустимые фазовые реализации

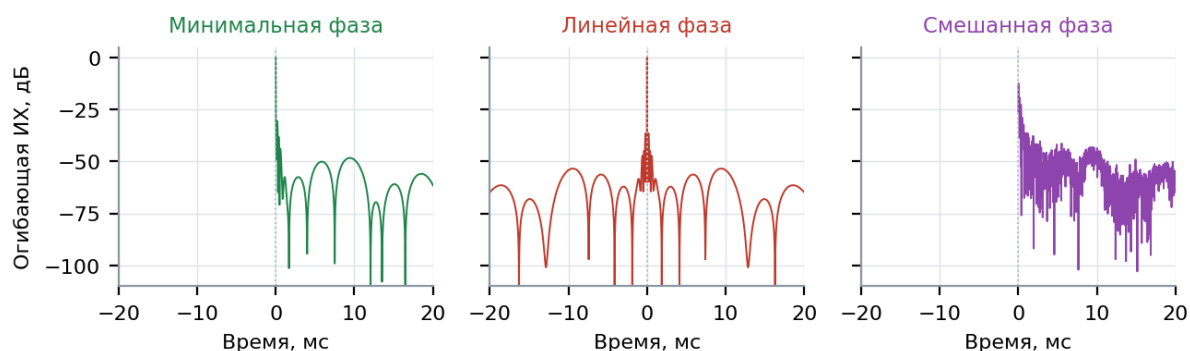


Рис. 5. Одна и та же АЧХ, три допустимые фазовые реализации. Различаются они только распределением энергии во времени: у минимально-фазовой энергия максимально сдвинута к началу и отсутствует при  $t < 0$ ; у линейно-фазовой отклик симметричен, то есть половина энергии приходит ДО импульса; смешанная — промежуточный случай.

Аналогия. Обычный эквалайзер типа bell — минимально-фазовый: подняли полосу и получили вместе с ней ровно ту фазовую «раскачку», которую даёт физический резонанс. Режим linear phase того же эквалайзера — принудительно другая фаза при той же АЧХ, и именно у него появляется преехо. Кепстральный синтез — математический способ сказать «дай мне фазу как у обычного bell», имея на руках произвольную кривую АЧХ, а не набор фильтров.

Почему через логарифм. Свёртка сигналов — это умножение спектров. Логарифм превращает умножение в сложение, и то, что в спектре перемножалось, в логарифме складывается — а значит может быть разделено обычным окном. Отсюда название группы методов: гомоморфная обработка, то есть обработка, приводящая умножение к сложению.

Что такое кепстр. Логарифм амплитудного спектра плюс обратное преобразование Фурье дают функцию снова «во времени» — её называют кепстром (перестановка букв в слове «спектр»), а ось — кефренцией. Это не время сигнала, а квазивремя: мера того, насколько быстро что-то меняется вдоль оси частот. Плавные изменения АЧХ живут вблизи нуля кефренции, узкие пики и провалы — дальше от нуля.

Ключевое свойство. У характеристики с нулевой фазой кепстр симметричен относительно нуля: одна и та же информация лежит и слева, и справа. Если левую половину «сложить» вправо — обнулить отрицательную часть, а положительную удвоить, — то после обратного пути (прямое преобразование и экспонента) получится та же самая АЧХ, но с фазой, однозначно ею определённой. Это и есть минимальная фаза, а операция складывания — та самая гомоморфная фильтрация.

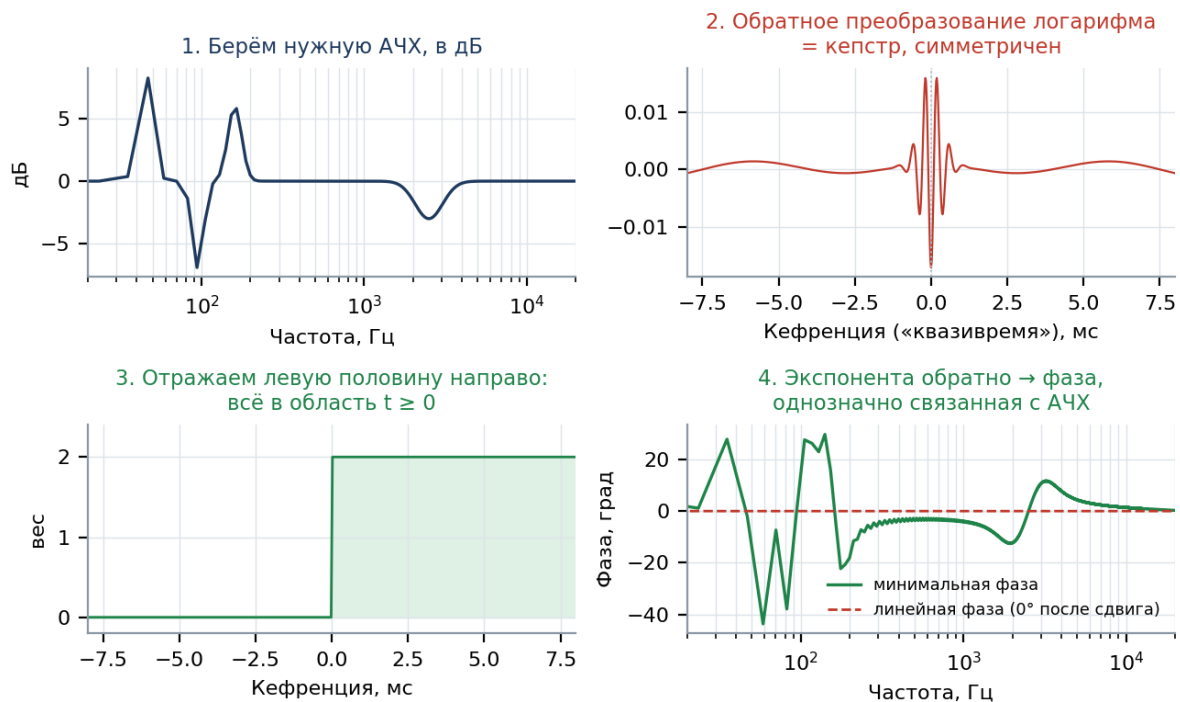


Рис. 6. Четыре шага кепстрального синтеза для реального корректирующего фильтра. Слева сверху — заданная АЧХ; справа сверху — её кепстр, симметричный относительно нуля; слева внизу — окно свёртывания (ноль слева, удвоение справа); справа внизу — полученная фазовая характеристика, которая теперь однозначно следует из АЧХ.

Вся процедура — четыре операции: логарифм модуля спектра, обратное БПФ, умножение на окно из нулей и двоек, прямое БПФ и экспонента. Никакой итеративной оптимизации и подбора «на слух». Практический смысл для звукоинженера: синтезированный так фильтр ведёт себя как физически реализуемое звено — не звенит до сигнала, не добавляет постоянной задержки в тракт и, поскольку АС и сама в основном минимально-фазовая, попутно исправляет её фазу в той мере, в какой та следует из амплитудной характеристики.

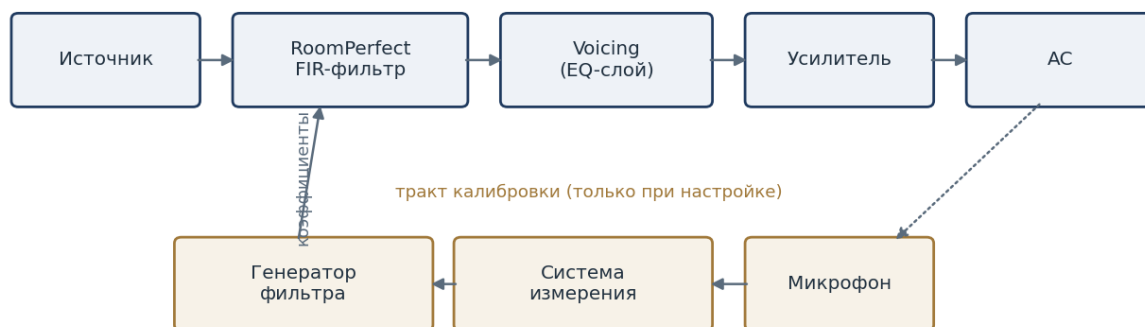


Рис. 7. Структура тракта: FIR-фильтр RoomPerfect и независимый слой Voicing в сигнальном пути; тракт измерения и генератор коэффициентов работают только во время калибровки.

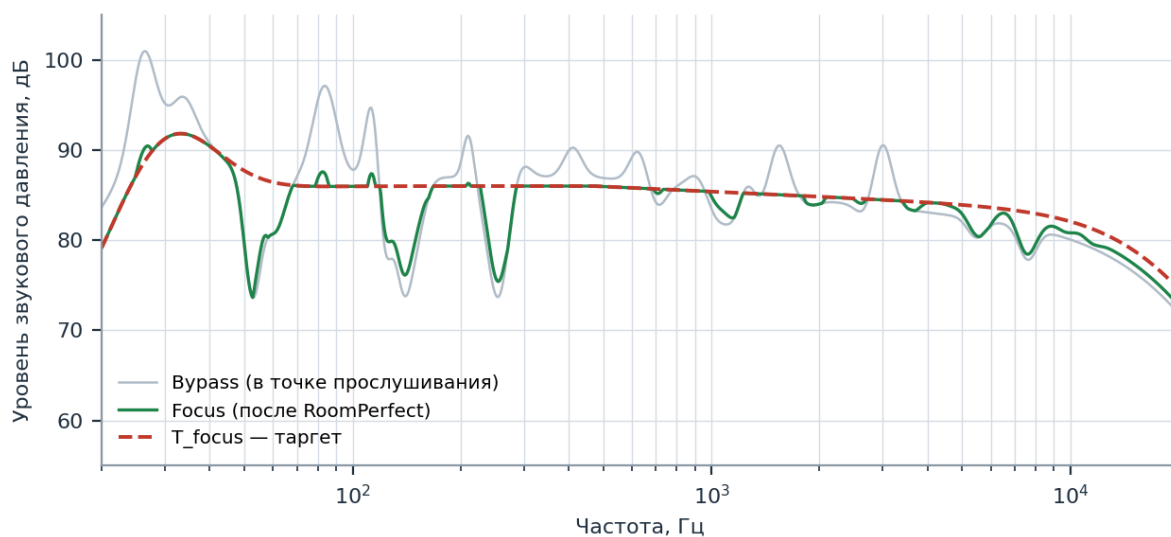


Рис. 8. Модельный результат в точке прослушивания: до коррекции, после включения Focus и целевая кривая T\_focus. Наибольшие изменения — в модальной области, выше области Шрёдера коррекция намеренно сдержанна.

## 4. Процедура калибровки и режимы

| Понятие            | Смысл                                                                                                                    | Практика                                                                                                              |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Focus-измерение    | Первое измерение в основном кресле, микрофон направлен на фронт. Даёт «портрет» самих АС при минимальном вкладе комнаты. | Позиция и высота должны точно соответствовать реальному положению головы                                              |
| Room-измерения     | Случайные точки по всему объёму. Дают энергию 3D-поля и, следовательно, границы усиления.                                | Минимум 3 по статье; на практике 5–9 до достижения нужного показателя                                                 |
| Room Knowledge, %  | Не «процент изученности комнаты», а мера прироста новой информации от последнего измерения.                              | Завершать можно от ~90 %; типовая рекомендация — 95 %, финальные измерения у границ доводят до 98–100 %               |
| Focus              | Фильтр, оптимизированный под основное кресло.                                                                            | Основной режим для критического прослушивания                                                                         |
| Global             | Компромисс по всей комнате; в кресле работает слабее, вне его — лучше.                                                   | Фон, вечеринка, несколько слушателей                                                                                  |
| Bypass             | Отключение коррекции для А/В-сравнения.                                                                                  | Сравнивать только при выравненной громкости                                                                           |
| Room Correction, % | Служебный показатель объёма внесённой коррекции в расширенном меню.                                                      | Крупные АС, диполи, линейные массивы и рупоры возбуждают комнату сильнее и получают заметно больший процент коррекции |

Смена дистанций, положения АС или сабвуфера меняет фазовые соотношения — калибровку требуется выполнять заново. Микрофон RoomPerfect некалибруемый пользователем и незаменяемый: его собственная АЧХ и питание учтены в алгоритме.



Рис. 9. Схема калибровки: одно Focus-измерение в кресле с микрофоном, направленным на фронт, и случайные room-позиции, распределённые по всей длине, ширине и высоте помещения.

## 5. Оценка результата: что реально меняется в отклике

- Наибольшие изменения — в модальной области. В независимом измерении LowBeats (TDAI-3400) разница между Bypass и Focus в диапазоне ~30–60 Гц характеризуется как очень большая; там же отмечено, что текущая версия RoomPerfect заметно

превосходит ранние.

- Выше области Шрёдера коррекция намеренно сдержанна: таргет там задан оценённым индексом направленности, и система не пытается «выпрямить» АЧХ в точке, поскольку это правило противоречило бы мощностному отклику.
- В слуховых оценках авторов и в независимых обзорах повторяется один и тот же тезис: узнаваемый характер конкретной АС сохраняется — снимается влияние комнаты, а не «почерк» колонки. Это прямое следствие таргета, построенного от параметров самой АС, а не от универсальной кривой.
- Отсутствие типовых артефактов одноточечной коррекции (неконтролируемые подъёмы, окрашивание вне кресла) авторы называют одним из главных практических результатов.

## 6. Ограничения и обоснованная критика

| Ограничение                           | Инженерное содержание                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Только минимальная фаза               | Избыточная фаза, групповая задержка помещения и раннее отражённое поле во временной области не корректируются. Системы со смешанно-фазовым синтезом (напр. Dirac) целенаправленно работают именно с этим и показывают более быстрый фронт энергетической переходной характеристики — ценой риска прееха. |
| Один слой на канал в стерео           | RoomPerfect применяется до бас-менеджмента; сабвуфер не получает индивидуального фильтра. Для сложных многосабовых схем это ограничение по сравнению с системами, корректирующими каждый низкочастотный источник отдельно.                                                                               |
| Чувствительность к качеству измерений | Ошибки в позиционировании микрофона, посторонние шумы и нетипичные точки прямо портят и границы усиления, и оценку параметров АС. Проверить сырые данные пользователь не может — графиков система не показывает.                                                                                         |
| «Чёрный ящик»                         | Отсутствуют экспорт измерений, редактирование таргета и просмотр результирующего фильтра. Для инженера это главное неудобство: верификация возможна только внешним измерением (REW и т. п.).                                                                                                             |
| Возможен избыток баса                 | Типовая жалоба пользователей — после калибровки бас субъективно избыточен. Причина обычно в недостаточном покрытии пристеночных/угловых зон: без этих точек энергия 3D-поля на НЧ недооценена, верхняя граница усиления оказывается слишком мягкой. Лечится добавлением измерений у границ по одному.    |
| Не заменяет акустическую обработку    | DSP одномерен и не меняет трёхмерные явления — направленность АС и время реверберации. Собственно поэтому в топовых системах Lyngdorf проблему решают конструктивно: граничным размещением НЧ-секций (полоса до 500–800 Гц), линейными источниками и бескорпусными дипольными излучателями.              |

## 7. Сопоставление с «обычной» FIR-коррекцией

Терминологическая оговорка: RoomPerfect сам реализован как FIR-фильтр. Сравнение идёт не с FIR как формой реализации, а с типовым подходом «обычной» FIR-коррекции — прямой инверсией измеренного импульсного отклика с линейной или смешанной фазой, длинным ядром и заданной пользователем целевой кривой. Ниже — по каким конкретно параметрам различаются подходы.

| Параметр                           | «Обычный» FIR (инверсия ИХ, линейная/смешанная фаза)                                                                                                                         | RoomPerfect (FIR, нулевая избыточная фаза)                                                                                                |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Устойчивость к положению слушателя | Фильтр действителен строго в точке измерения; смещение на 10 см меняет отклик на отдельных частотах до 20 дБ даже ниже 100 Гц, и скорректированная фаза становится неверной. | Коррекция ограничена коридором из энергии 3D-поля, поэтому вне кресла окрашивание не возникает; режим Global даёт управляемый компромисс. |
| Поведение в узлах мод              | Глубокий провал инвертируется в большой подъём; либо приходится вводить общую регуляризацию/сглаживание, теряя точность везде.                                               | gain_upper = 0 дБ там, где энергия поля избыточна: подъём просто запрещён, остальная часть кривой остаётся несглаженной.                  |
| Презхо (pre-ringing)               | Присуще линейно-фазовой реализации: энергия появляется до основного импульса — артефакт, не встречающийся в природе и наиболее заметный на НЧ и на транзиентах.              | Отсутствует по построению: минимальная фаза не имеет отклика при $t < 0$ .                                                                |
| Латентность                        | Пропорциональна половине длины ядра: при 65 536 отсчётах на 48 кГц — около 680 мс; критично для видео и живого мониторинга.                                                  | Минимально-фазовая реализация задержки как таковой не вносит (кроме вычислительной).                                                      |
| Целевая кривая                     | Задаётся человеком; все АС приводятся к общему виду, направленность колонки игнорируется.                                                                                    | Рассчитывается из четырёх оценённых параметров самой АС; «почерк» колонки сохраняется.                                                    |
| Чувствительность к шуму измерения  | Шум и артефакты окна попадают в инверсию и превращаются в узкополосные подъёмы и «звон» ядра.                                                                                | Коридор усиления физически ограничивает, насколько ошибка одного измерения может отклонить фильтр.                                        |
| Число измерений                    | Пространственное усреднение по кластеру точек: чем больше точек, тем хуже результат именно в кресле.                                                                         | Фильтр всегда строится на Focus-измерении; room-точки лишь задают границы, поэтому их добавление не ухудшает результат в кресле.          |
| Требования к вычислителю и данным  | Длинное ядро нужно для разрешения по частоте на НЧ; ресурсы и память растут линейно с длиной.                                                                                | Сглаживание $G(f)$ осознанно ограничивает детальность и, соответственно, необходимую длину FIR.                                           |

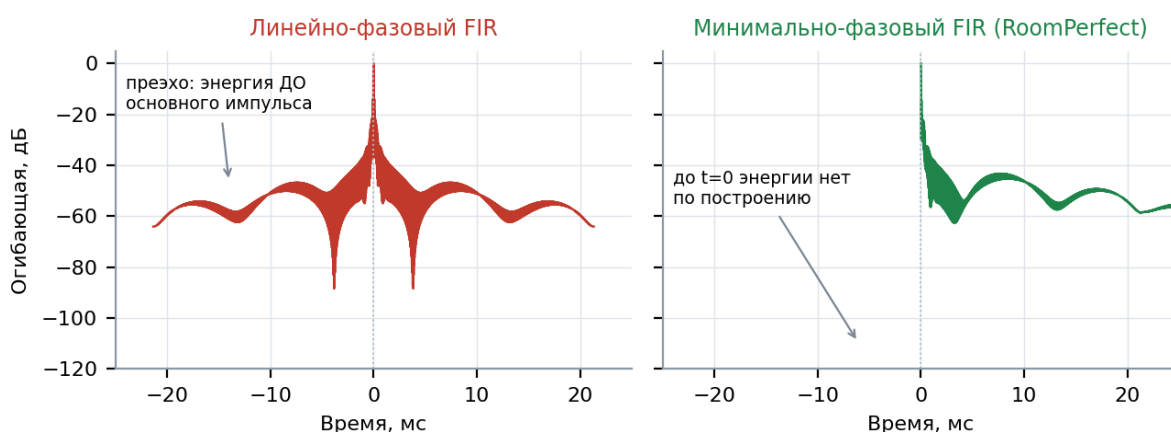


Рис. 10. Огибающая импульсного отклика одного и того же корректирующего тракта в линейно-фазовой и минимально-фазовой реализации. Слева энергия присутствует за десятки миллисекунд до основного импульса — это и есть презхо; справа отклика при  $t < 0$  нет.

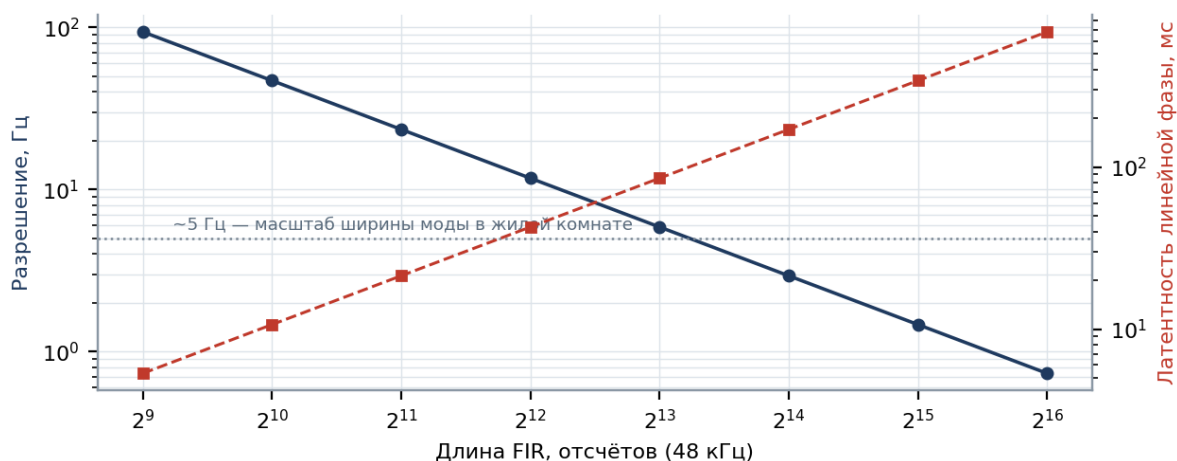


Рис. 11. Цена длинного ядра в «обычной» FIR-коррекции: разрешение по частоте обратно пропорционально длине фильтра, а латентность линейно-фазовой реализации растёт пропорционально ей. Чтобы разрешить моду шириной единицы герц, нужны десятки тысяч отсчётов и сотни миллисекунд задержки.

Чего «обычный» FIR даёт больше. Объективно — коррекцию во временной области: избыточную фазу, групповую задержку помещения и раннее отражённое поле. Аккуратный смешанно-фазовый синтез укорачивает фронт энергетической переходной характеристики сильнее, чем минимально-фазовый; это подтверждается и в материалах Dirac. Плата — риск прееха, латентность и жёсткая привязка к одной точке. RoomPerfect осознанно меняет этот выигрыш на устойчивость.

## 8. Где FIR-коррекция здесь не применяется

Существенная часть инженерной логики Lyngdorf состоит в том, чтобы не решать фильтром то, что фильтром решаться не должно. Ниже — области, в которых FIR-коррекция намеренно не работает.

- Избыточная фаза и временная структура. Корректируется только та часть фазы, которая соответствует амплитудному отклику. Обоснование: поле трёхмерно, фаза меняется по-разному в разных направлениях от кресла, поэтому полная фазовая коррекция осмысленна ровно в одной точке.
- Направленность АС и время реверберации. DSP одномерен и не может менять трёхмерные явления. Индекс направленности не выравнивается, а, наоборот, вносится в таргет как данность.
- Зоны, где энергия 3D-поля избыточна. Там верхний предел усиления равен 0 дБ, и фильтр не поднимает уровень вообще — даже если измерение в кресле формально этого требует.
- Выше области Шрёдера. Формально фильтр работает по всей полосе, но содержательно там остаётся лишь следование мощностному таргету: попытки «выпрямить» АЧХ в точке на ВЧ система не предпринимает, поскольку это противоречило бы отклику по мощности.
- Отдельный тракт сабвуфера в стерео. RoomPerfect применяется до бас-менеджмента; индивидуального FIR-фильтра сабвуфер не получает и обрабатывается пропорционально в составе общего сигнала. Кроссовер, уровни и задержки задаются вручную в меню, а не рассчитываются фильтром.
- Вкусовая коррекция. Она вынесена в отдельный слой Voicings и намеренно не смешивается с автоматически рассчитанным таргетом.

- Модальная проблема на уровне акустики. В топовых системах её решают не фильтром, а размещением: граничные вуферы у пола и в углах с полосой до 500 Гц (интеграция до 800 Гц) обеспечивают синфазный приход прямого звука и первых отражений — то есть устраняют причину, а не следствие. Линейные источники и бескорпусные диполи работают в той же логике.
- Вурасс. Штатный режим полного отключения коррекции для A/B-сравнения при выравненной громкости.

Практический итог: если в задаче критична именно временная область — компенсация группового запаздывания многополосной АС, выравнивание фронтов, коррекция раннего отражённого поля — RoomPerfect этого не делает и не заявляет. Для таких задач нужен отдельный смешанно-фазовый FIR-тракт со всеми его издержками, либо решение на уровне конструкции и размещения.

## 9. Позиционирование относительно альтернатив

|                           | RoomPerfect                                                                    | Типовая одноточечная /<br>многоточечная EQ        | Смешанно-фазовые<br>системы                                        |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Источник данных           | 1 точка прослушивания + случайные точки объёма (энергия 3D-поля)               | 1 точка либо кластер точек вокруг кресла          | Кластер точек, полный импульсный отклик                            |
| Таргет                    | Рассчитывается автоматически из параметров АС; пользователь не выбирает        | Пресетная кривая; все АС приводятся к общему виду | Настраиваемая кривая                                               |
| Контроль выбросов         | Частотно-зависимые пределы усиления по $H_{global}$ ; сглаживание не требуется | Грубое сглаживание перед инверсией                | Регуляризация, ограничение по полосе                               |
| Фаза                      | Только минимальная (кепстральный синтез)                                       | Обычно минимальная                                | Смешанная / линейная — коррекция во временной области, риск прееха |
| Прозрачность для инженера | Низкая (нет графиков и экспорта)                                               | Средняя                                           | Высокая                                                            |

## 10. Практические рекомендации

- Focus-измерение делать предельно точно. Оно задаёт оценку параметров АС и, следовательно, весь таргет. Ошибка здесь искажает всё остальное.
- Room-точки — действительно по объёму. Разные высоты, включая близкие к потолку и полу; расстояние между точками от 1 м. Точки только вокруг дивана обесценивают весь метод.
- Пристеночные измерения — в конце и по одному. Они наиболее сильно влияют на оценку НЧ-энергии; добавлять по одному и слушать, иначе легко «перелететь» в противоположную сторону.
- Не гнаться за 100 %. Показатель отражает прирост новизны; выше ~95 % возврат мал, а риск внести нетипичную точку растёт.

- А/В только при выравненной громкости. Коррекция меняет интегральный уровень, и без выравнивания сравнение недостоверно.
- Верифицировать внешне. Прогон REW в кресле в режимах Bypass / Focus / Global — единственный способ увидеть, что именно сделала система, включая её поведение выше области Шрёдера.
- Разделять слои. Всё «вкусное» держать в Voicings, не пытаясь получить это перекалибровкой RoomPerfect: иначе теряется смысл автоматического таргета.

## Приложение А. Разбор доклада AES 2007 по разделам

Ниже — структурированный разбор оригинальной работы: J. Abildgaard Pedersen, K. Thomsen, «Fully Automatic Loudspeaker-Room Adaptation — the RoomPerfect system», AES 32nd International Conference «DSP for Loudspeakers», Хиллерёд, 21-23 сентября 2007. Изложение авторской аргументации дано своими словами; формулы и числовые примеры приведены как есть, поскольку они и есть содержательная часть метода. Дословный перевод не приводится: доклад защищён авторским правом, полный текст доступен в AES E-Library. Иллюстрации — оригинальные, расчётные, часть из них поясняет то, что в самом докладе показано только текстом.

### А.1. Аннотация и постановка (Abstract, Introduction)

Авторы начинают с практической проблемы: большинство систем адаптации требуют от пользователя содержательных решений — выбрать целевую функцию, отредактировать сырые измерения до расчёта фильтра. По их мысли, это не свойство интерфейса, а следствие нехватки данных: система, знающая лишь давление в одной точке, объективно не может принять эти решения сама. Отсюда цель работы — собрать информацию двух разных типов: о локальных свойствах в точке прослушивания и об энергии в трёхмерном звуковом поле, — и на этой основе рассчитывать таргет автоматически.

Во введении перечислены известные слабости одноточечного подхода: чувствительность к смещению источника и слушателя (изменение уровня до 20 дБ на отдельных частотах при переносе точки на 10 см, по их же более ранней работе 1994 года), неконтролируемые подъёмы при инверсии провалов, немодально-фазовые составляющие отклика и, отдельно, проблема выбора осмысленной целевой функции. Здесь же формулируется тезис, на который опирается вся конструкция: часть влияния комнаты естественна для слуха и удалению не подлежит, а равномерная АЧХ субъективно даёт неестественный тембр с нехваткой низа.

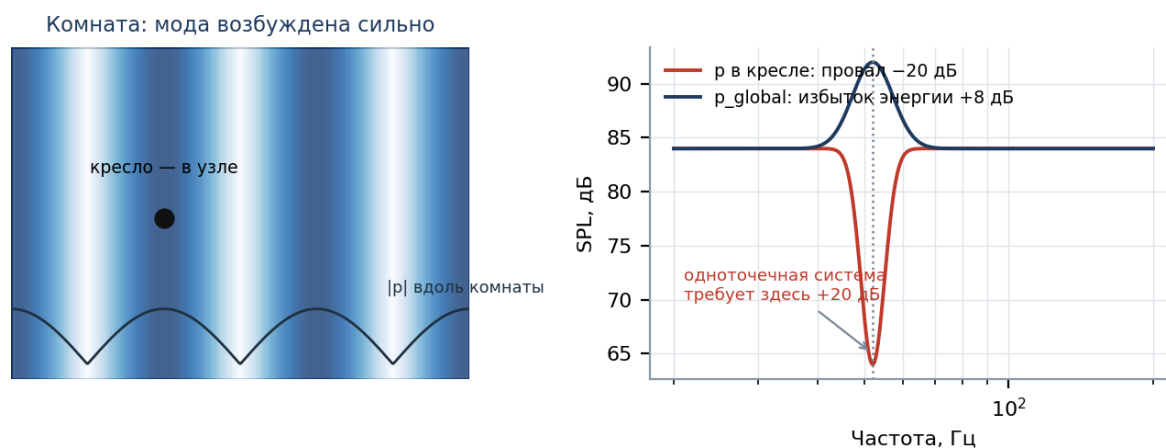


Рис. 12. Иллюстрация к центральному аргументу авторов о проекции 3D-поля на одномерную шкалу: кресло попало в узел сильно возбуждённой моды. Измерение в точке видит глубокий провал и требует большого подъёма, тогда как энергия поля на этой частоте, наоборот, избыточна. В докладе этот пример разобран текстом, без графика.

### А.2. Принцип системы (раздел 1)

Измеряется давление в точке прослушивания и минимум в трёх случайных позициях по всему объёму комнаты. Первое измерение описывает доступ слушателя к звуковому

полю, остальные — энергию 3D-поля. Коррекция для точки прослушивания ограничивается верхним и нижним пределами усиления, рассчитанными из данных о поле. Таргеты вычисляются автоматически, причём так, чтобы сохранить базовые характеристики применённой АС: система не приводит все колонки к общему звучанию, а снимает влияние комнаты. Для этого оцениваются четыре параметра АС: нижняя частота среза и её наклон, чувствительность, индекс направленности, верхний срез ВЧ-звена.

Структура DSP (раздел 1.1): сигнал линейного входа проходит через FIR-фильтр RoomPerfect, далее — усилитель и АС. Во время настройки сигнал берётся от генератора, «система измерения» сопоставляет сигнал микрофона с генерируемым и строит передаточную функцию, «генератор фильтра» рассчитывает коэффициенты FIR по измерениям в фокусной и не менее чем трёх случайных позициях и передаёт их в фильтр.

### А.3. Метод измерения и глобальная кривая (раздел 1.2)

Глобальный отклик определён как энергетическое (мощностное) среднее комплексных давлений по N позициям:  $p_{\text{global}}(f) = \sqrt{\sum |p_i(f)|^2 / N}$ . В докладе показан пример с  $N = 9$ . Ключевое наблюдение: эта усреднённая кривая приблизительно равна отклику по мощности АС, установленной в данной комнате, тогда как единичное измерение в кресле ближе к осевому давлению с примесью мощностного отклика.



Рис. 13. Дополнительная иллюстрация, которой в докладе нет: как энергетическая оценка стабилизируется с ростом числа позиций. При  $N = 1$  кривая ещё несёт частные особенности конкретной точки; к  $N \approx 6 \dots 12$  остаётся общая энергетическая картина комнаты — именно она и годится для построения границ усиления.

### А.4. Автоматический расчёт таргета (раздел 1.3)

Отправная мысль: целью не является безэховая камера, то есть дельта-импульс в переходной характеристике. Часть влияния комнаты полезна, часть подлежит компенсации. Единая стандартная кривая для всех типов АС неоптимальна, поскольку DSP одномерен и не должен вмешиваться в трёхмерные явления вроде направленности, которая целиком определяется геометрией излучателей.

Поэтому рассчитываются две разные целевые кривые. Поскольку индекс направленности есть отношение давления к отклику по мощности, его необходимо исключить из глобальной кривой прежде, чем она сможет направлять коррекцию для фокусной. Числовые примеры доклада: в первой комнате нижний срез 27,6 Гц, чувствительность 87,9 дБ (global) и 86,0 дБ (focus), наклон выше 467 Гц  $-4,1$  дБ/декаду;

во второй — 36,4 Гц, 86,4 дБ (global) и 87,1 дБ (focus), наклон выше 4195 Гц —18,4 дБ/декаду. Подъём уровня к низким частотам (room gain), обусловленный в том числе меньшим поглощением комнат на НЧ, сохраняется в таргете намеренно.

Промежуточные корректирующие фильтры определены как отношения таргетов к измеренным давлениям:  $H\_focus(f) = T\_focus(f)/p\_focus(f)$  и  $H\_global(f) = T\_global(f)/p\_global(f)$ . Тем самым из данных убираются характеристики самой АС и остаётся влияние комнаты.

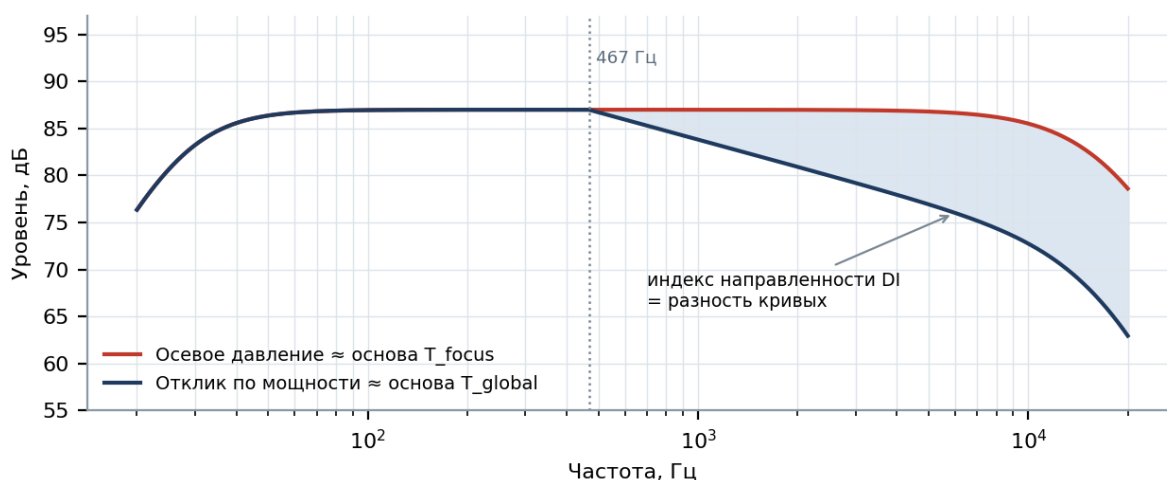


Рис. 14. Пояснение к ключевому месту раздела 1.3, показанное в докладе только сравнением двух рисунков: разность между осевым давлением и откликом по мощности и есть индекс направленности. Именно его нужно исключить из глобальной кривой, прежде чем она сможет направлять коррекцию для точки прослушивания.

## А.5. Пределы усиления (раздел 1.4)

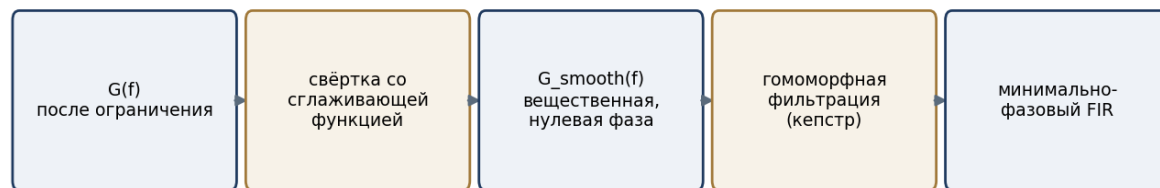
Границы вычисляются из  $H\_global$ . В приведённом авторами примере нижний предел — это  $H\_global$ , опущенный вдвое по амплитуде ( $gain\_lower = H\_global/2$ ), а верхний равен единице, если  $H\_global$  ниже единицы, и самому  $H\_global$  в противном случае. Смысл: избыток энергии в поле запрещает положительное усиление вовсе; общий дефицит, скажем, в 2 дБ разрешает добавить не более 2 дБ (в докладе такой случай отмечен на 126 Гц). Итог  $G(f)$  — это  $H\_focus$ , усечённый границами.

Здесь же авторы подчёркивают принципиальный момент: промежуточный фильтр для фокуса соответствует классической одноточечной адаптации вообще без сглаживания, и система не полагается на сглаживание для борьбы с неконтролируемыми подъёмами — в их примере требование +19 дБ на 38 Гц отсекается границей, а не размывается. Там, где  $H\_focus$  укладывается в коридор, он проходит точно, без потери детальности.

## А.6. Генератор фильтра (раздел 1.5)

$G(f)$  свёртывается со сглаживающей функцией, но эта операция управляет лишь степенью детальности и, соответственно, требуемой длиной FIR — авторы специально оговаривают, что её роль отличается от роли сглаживания в других системах. Сглаженный таргет — вещественная функция, то есть нулевая фаза на всех частотах. Реализация выбрана минимально-фазовой: это минимальный естественный фазовый сдвиг для данного изменения амплитуды, и поскольку АС в значительной мере минимально-фазова, такая реализация даёт корректную фазу автоматически. Дополнительный аргумент: фаза в трёхмерном поле меняется по-разному в разных направлениях от кресла, поэтому полная фазовая коррекция осмысленна ровно в одной точке — корректировать следует лишь ту часть фазы, которая соответствует

амплитудному отклику. Технически это делается гомоморфной фильтрацией в кепстральной области.



длина ядра определяется выбранной детальностью, а не борьбой с выбросами усиления

Рис. 15. Цепочка синтеза фильтра по разделу 1.5 — в докладе описана текстом.

## А.7. Результаты (раздел 2)

Первый объект — трёхполосная напольная AC Dali Helicon 400 в комнате 4,90 × 3,33 м при высоте потолка 2,60 м; кресло в центре дивана, девять измерений: одно фокусное и восемь случайных. Второй объект — комната 7,60 × 4,40 × 2,70 м с системой 2+2: два угловых вуфера Lyngdorf W210 до 400 Гц и более свободно расположенные основные AC Lyngdorf MH-1 на расстоянии 1,10 м от боковой и торцевой стен; разница расстояний до слушателя компенсирована задержкой 5,2 мс на основные AC. Приведены измеренные фокусная и глобальная кривые, характеристики двух синтезированных фильтров и отклик в кресле до и после включения коррекции с наложенным таргетом.

Выводы из неформальных прослушиваний, которые авторы формулируют прямо: улучшение заметно не только в измеренном кресле, но и по всей комнате; увеличение числа случайных позиций улучшало оценку и в кресле, и вне его; отсутствовали артефакты, характерные для одноточечных систем; и, наконец, узнаваемый характер применённой AC сохранялся — слушатели отмечали, что снято именно влияние комнаты. Последнее авторы противопоставляют подходу, при котором DSP применяют и к трёхмерным явлениям вроде индекса направленности.

## А.8. Обсуждение и выводы (разделы 3-4)

Основная линия обсуждения — уже упомянутая проекция трёхмерного объекта на одномерную шкалу. На части частот такая проекция осмысленна, на части — нет; разобранный пример с сильно возбуждённой модой и креслом в её узле показывает, как одноточечная система в этом случае действует прямо противоположно нужному. Данные о случайных позициях позволяют ввести верхний предел 0 дБ на центральной частоте моды и тем самым исключить подкачку энергии.

Отдельно авторы отмежевываются от многоточечных систем с пространственным усреднением: их система — не линейное взвешенное среднее измерений. Фильтр всегда строится на единственном измерении в точке прослушивания, а данные о поле лишь направляют его; иначе добавление позиций ухудшало бы результат в кресле. В заключении подчёркнуто, что автоматический расчёт таргета по характеристикам фактически применённой AC и делает возможной полностью автоматическую работу без участия пользователя.

Библиография доклада содержит 34 позиции и сама по себе полезна как срез области: работы Бека по тембру в малых помещениях, Эллисона и Уотерхауса по влиянию границ, Тула по обзору «громкоговорители и помещения», Уэлти и Девантье по многосабовой оптимизации, Мурьюполоса по комплексному сглаживанию, а также более ранние

собственные работы Педерсена по системе ABC и по выборке энергии в 3D-поле.

Оригинал: AES 32nd International Conference, 2007, Hillerød. Для цитирования и работы с первоисточником следует обращаться к AES E-Library.

## Источники

- J. Abildgaard Pedersen, K. Thomsen. «Fully Automatic Loudspeaker-Room Adaptation — the RoomPerfect system». AES 32nd Int. Conf. «DSP for Loudspeakers», Хиллерёд, 21–23 сентября 2007 (основной технический источник: уравнения, таргеты, пределы усиления, кепстральный синтез).
- J. Abildgaard Pedersen. «Loudspeaker-Room Adaptation for a Specific Listening Position using Information about the Complete Sound Field». AES 121st Convention, 2006, paper 6908.
- J. Abildgaard Pedersen. «Natural Timbre in Room Correction Systems». AES 122nd Convention, 2007; F. El-Azm, J. Abildgaard Pedersen, часть II, AES 32nd Int. Conf., 2007.
- J. Abildgaard Pedersen. «Adaptive Bass Control — the ABC Room adaptation system». AES 23rd Int. Conf., 2003 — предшественник RoomPerfect.
- Lyngdorf Audio / Steinway Lyngdorf: разделы RoomPerfect и Support RoomPerfect (процедура, Room Knowledge, микрофон, интеграция сабвуферов).
- Steinway Lyngdorf: Boundary Woofers Technology, LS/LSR-212 (полоса 20–500 Гц, интеграция до 800 Гц).
- LowBeats: повторный тест Lyngdorf TDAI-3400 и текущей версии RoomPerfect (измерения Bypass / Focus / Global, слой Voicing).
- AVForums: «What is RoomPerfect Room Correction?» (процедура, Room Knowledge 95–98 %, Focus/Global/Bypass); тред о избыточном басы после калибровки.
- Dagogo: обзор Lyngdorf RP-1 (практика калибровки, режимы, Voicing).
- The Absolute Sound: обзор TDAI 2200 RoomPerfect; The Ear: материал о RoomPerfect (субъективные оценки).
- Dirac Research. «On Room Correction and Equalization of Sound Systems» — для сопоставления минимально-фазового и смешанно-фазового подходов.
- Все графики в отчёте — оригинальные, построены по модели алгоритма (синтетические данные), а не воспроизведение измерений из источников; они иллюстрируют механику метода, а не характеристики конкретного изделия.

Отчёт подготовлен по открытым техническим публикациям, документации производителя и независимым обзорам. Числовые примеры (частоты среза, чувствительности, наклоны таргета) приведены из статьи AES 2007 как иллюстрация работы алгоритма и не являются паспортными данными конкретных изделий.