

### Акустический центр

До сих пор мы предполагали, что акустический центр - это простой драйвер, установленный на перегородке. К сожалению, реальность немного сложнее, чем это.

После возбуждения сигналом конус динамика, приводимый в движение звуковой катушкой, издает звук. Однако это отклонение мембраны не соответствует чисто поршневому излучению, поскольку в мембране присутствуют искажения и резонансы. Процессы, которые происходят между звуковой катушкой и отдельными участками мембраны и которые приводят к распространению звука, протекают в течение определенного периода времени; продолжительность этого интервала между возбуждением и воспроизведением звука зависит от размеров мембраны и свойств мембранных материалов. Нетрудно заметить, что этот процесс будет зависеть от частоты и местоположения. Кроме того, также очевидно, что, в отличие от модели с точечным источником, диафрагма динамика в реальном мире состоит из секций, которые не все находятся на одинаковом расстоянии от микрофона.

Одно из наиболее распространенных предложений для решения этой проблемы - рассматривать звуковую катушку как акустический центр, но это неточно. Вопрос о том, как рассматривать динамик как акустический центр, чрезвычайно сложен и неоднократно исследовался в многочисленных публикациях, начиная от руководств пользователя программного обеспечения и заканчивая научными диссертациями.

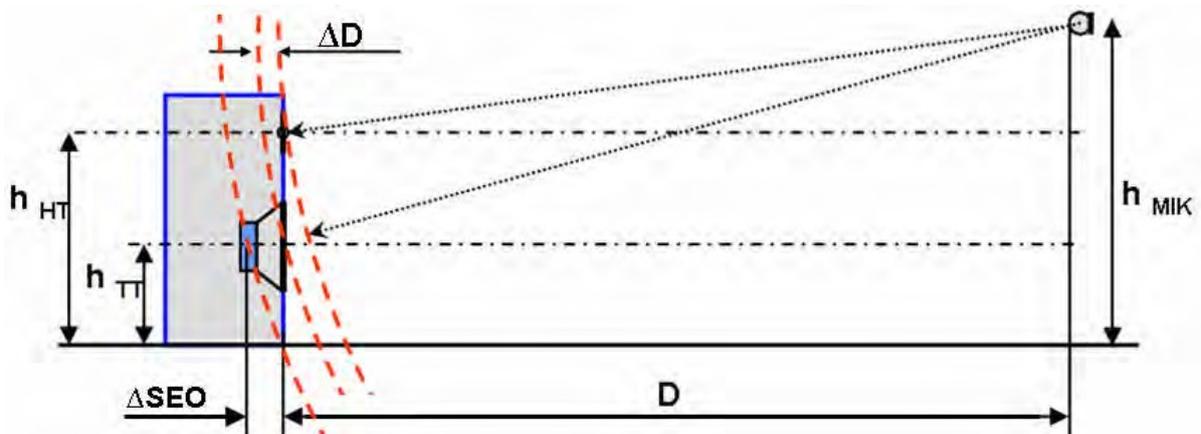


Figure 6.6.7 Фазовый сдвиг из-за различной длины акустического пути ( $\Delta SEO$ ).

Хотя этот вопрос подробно рассматривается в другом месте (14)(15)(16)(17)(18), мы должны помнить, что:

1. Акустический центр является лишь одним из многих факторов, влияющих на результаты моделирования;
2. Моделирование зависит не от абсолютных значений, а от относительных различий между драйверами;
3. Пересечение оказывает значительное влияние на поведение во времени.

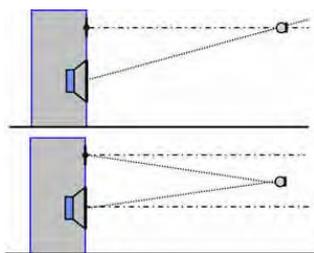
### 6.6.1. Measuring and simulating

Чтобы убедиться, что наши смоделированные данные имеют достаточно близкое сходство с результатами реального мира, нам необходимо убедиться, что моделирование учитывает условия измерений и артефакты. С этим можно справиться двумя способами:

- В дополнение к информации о фазе и частоте в измеренные данные включаются другие факторы, такие как расположение драйвера на перегородке и акустические центры относительно друг друга.
- Измеренные данные включают только информацию о фазе и частоте от каждого отдельного драйвера. Другие факторы, такие как положение водителя, добавляются или учитываются отдельно.

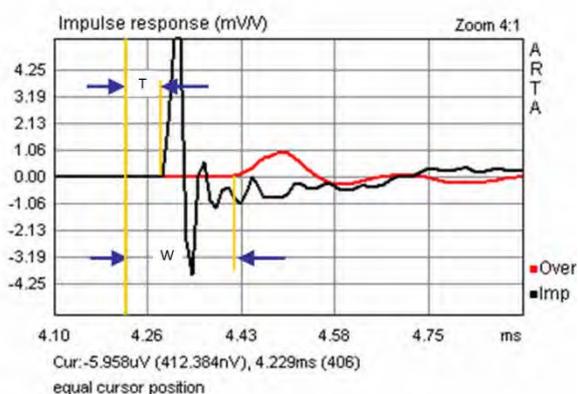
В этом разделе кратко рассматриваются эти два варианта, используя широкий подход "поваренной книги". примечание. Все моделирование должно основываться на двухканальных измерениях.

#### Option A



Условия для варианта А выполняются, когда все драйверы измеряются с одного и того же положения микрофона. Это означает, что учитывается вся информация, относящаяся ко времени распространения звука, фазе и акустическому центру. Два положения микрофона, показанные здесь, являются предпочтительными, и следует использовать методы измерения дальнего поля. Проблемы, вызванные размером помещения, следует устранять путем манипулирования окном измерения и увеличения сглаживания данных.

При экспорте данных для моделирования положение курсора, принятое для измерения фазовой и частотной характеристики, должно оставаться одинаковым для всех драйверов.



Курсор следует расположить за несколько отсчетов до нарастающего импульса драйвера с наименьшим временем распространения (обычно твитер, Т). Точное положение курсора не имеет решающего значения, хотя предпочтительна точка вблизи начала импульса, чтобы минимизировать перенос фазы. Наиболее важным соображением является то, что положение должно быть одинаковым для обоих водителей.

**Figure 6.6.8** Импульсные характеристики: твитер (черный); НЧ-динамик (красный).

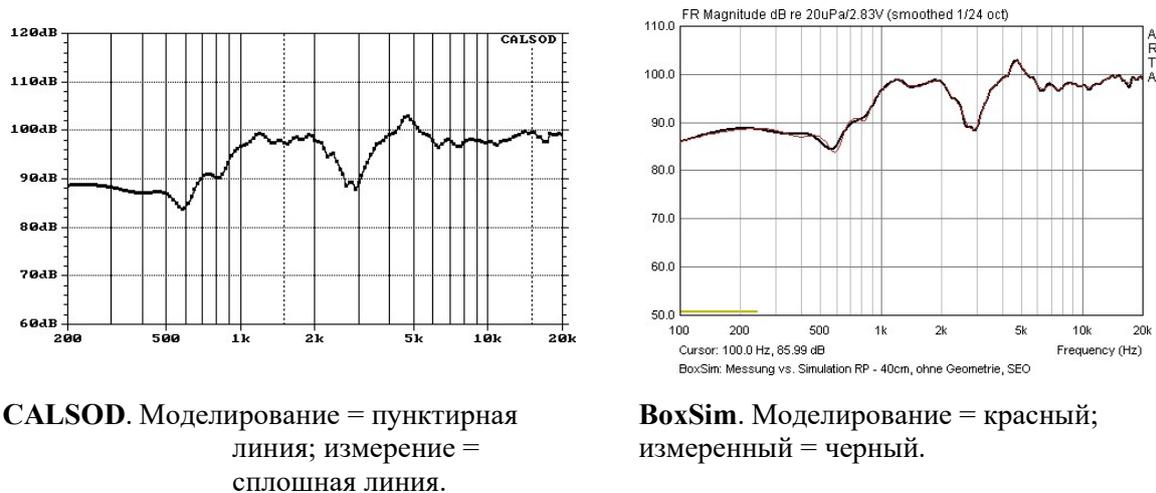
Данные для низкочастотного динамика (W) и твитера экспортируются в виде файлов FRD. Дополнительная информация не требуется, поскольку мы работаем с фактической измеренной фазой, когда оба динамика находятся в одинаковом исходном положении относительно микрофона. Поэтому дополнительные данные, касающиеся относительного расположения драйверов, не требуются.

Исключения из этого правила включают программы моделирования, имитирующие бесконечное расстояние измерения (например, VoxSim). В таких случаях данные о местоположении водителя могут вводиться необязательно, что никак не повлияет на моделирование. Однако обратите внимание, что информация о акустическом центре/длине пути вводиться не должна, так как это повлияет на результаты моделирования.

#### Утверждение

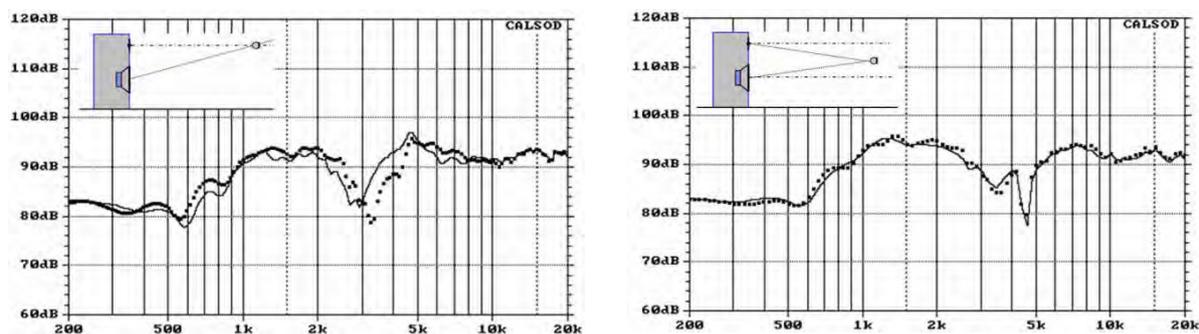
Хотя этот метод должен работать с любой программой моделирования, измерительное оборудование и данные в идеале должны быть проверены перед фактическим моделированием. Например, данные измерений для твитера и НЧ-динамика следует суммировать без кроссовера с помощью программы моделирования, а результаты сравнить с данными измерений с использованием обоих драйверов параллельно.

Figure 6.6.9 показан пример с использованием двух программ (BoxSim и CALSOD). Измеренные данные полностью согласуются с результатами моделирования.



**Figure 6.6.9** Проверка достоверности смоделированных данных.

Чтобы продемонстрировать, что происходит, когда условия измерения и моделирования не совпадают, на рисунке 6.6.10 показаны результаты измерения, выполненного на расстоянии 40 см, по сравнению с моделируемым расстоянием 80 см в CALSOD. Изменение моделируемого расстояния повлияло на относительные фазовые соотношения нч-динамика и твитера.



**Figure 6.6.10** Моделирование на расстоянии 80 см по сравнению с измерением на расстоянии 40 см.

Разница между моделируемыми и измеренными данными более очевидна, когда микрофон расположен на оси твитера (левая панель), а не посередине между двумя динамиками (справа).

Если координаты измерения и симуляции идентичны, вариант А идеально подходит для разработки кроссовера. Однако следует использовать достаточно большое расстояние измерения; если используемое помещение создает проблемы с отражением, тем не менее, лучше использовать как можно более широкое окно, пытаясь сгладить неровности дополнительным сглаживанием.

Однако обратите внимание, что применимость любых результатов, полученных таким образом, к другим измерениям расстояний или уровней микрофона/прослушивания очень ограничена, поскольку даже небольшие изменения в координатах моделирования могут привести к значительным отклонениям от реальности.

### Option B

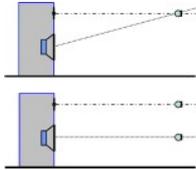
Это предполагает использование "чистых" фазовых данных для каждого драйвера, без информации, относящейся ко времени распространения от каждого источника. Поэтому информация об акустическом центре должна вводиться отдельно.

### Определение акустического центра с помощью ARTA

Самые основные подходы к проектированию динамиков предполагают, что каждый акустический

центр находится в одной плоскости. К сожалению, это редко бывает. В настоящее время не существует общепринятого метода решения этой проблемы поэтому мы ищем работоспособное решение, позволяющее нам моделировать динамики с разумной точностью.

Как правило, акустический центр определяется прямо или косвенно по измеренной импульсной характеристике. Однако существуют также некоторые особые процедуры, которые основаны на сочетании измерений и моделирования.



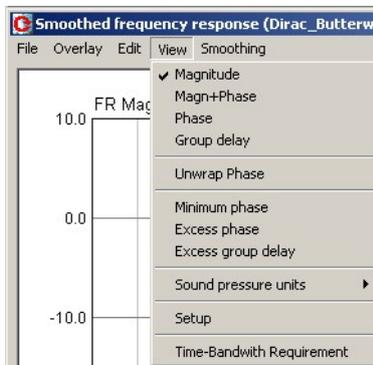
Можно использовать как одноточечные, так и параллельные измерения (слева). Оба метода в принципе эквивалентны, но преимущество одноточечного измерения заключается в уменьшении влияния расположения микрофона. Разница во времени задержки между драйверами учитывается путем определения относительной пифагорейской геометрии драйверов.

Параллельное измерение позволяет напрямую измерять акустические центры и должно обеспечить улучшенную масштабируемость измерений с точки зрения изменения расстояния во время моделирования, поскольку оба драйвера измеряются по оси. Рекомендуется параллельный метод, поскольку в целом он менее подвержен ошибкам, чем одноточечный метод.

Обратите внимание, что описанный здесь метод использует процесс "усреднения" для определения акустического центра, поскольку он усредняет неопределенности, вносимые процедурой измерения и разрешающей способностью системы. Обратите также внимание, что мы не рассматриваем каждый драйвер как "абсолютный" акустический центр, а используем один драйвер (обычно твитер) в качестве эталона.

### Групповая задержка

Этот метод применяет функцию "Избыточная групповая задержка" к запланированной области пересечения. Размер окна измерения должен быть таким, чтобы оно было максимально свободным от отражений. Первым шагом является определение избыточной групповой задержки как для твитера, так и для низкочастотного динамика. Первая сгенерированная трассировка должна быть сохранена с помощью функции наложения (рис. 6.6.11, слева).



Обратите внимание, что кривая групповой задержки показывает значительные отклонения, когда ось времени установлена с желаемым разрешением. Это можно скорректировать, определив разницу между акустическими центрами в более широком диапазоне, чем просто частота перехода.

Для параллельного измерения это можно сделать напрямую. "Задержка для оценки фазы" настраивается до тех пор, пока кривые не совпадут в желаемом диапазоне (рис. 6.6.11, справа). Разница в примере составляет 0,064мс или 2,20 см. Частотные и фазовые характеристики для экспорта в симуляцию должны охватывать задержку каждого отдельного драйвера в области вокруг частоты пересечения

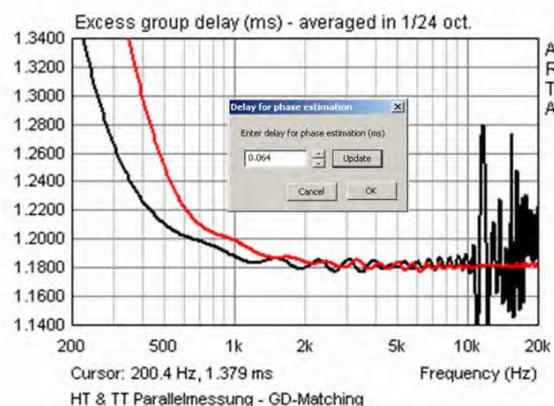
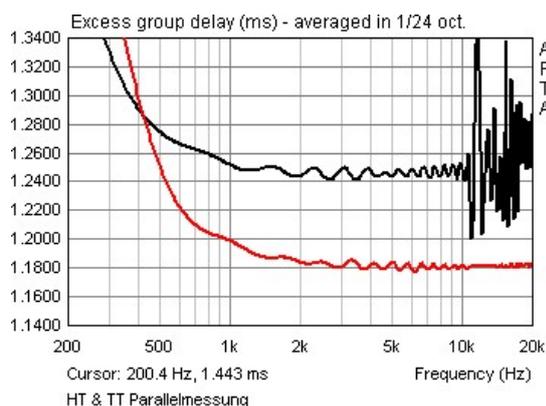
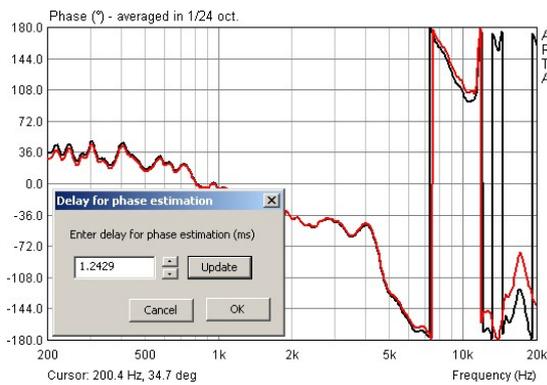


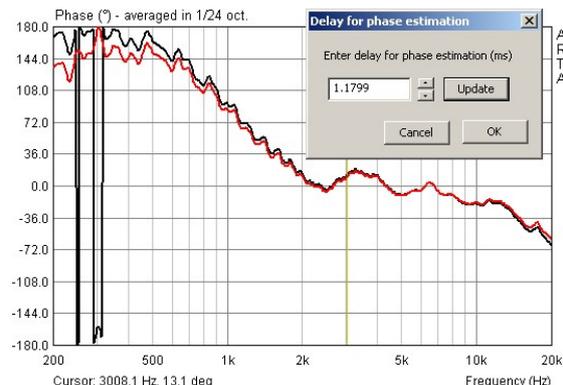
Figure 6.6.11 Избыточная групповая задержка: согласование: параллельные измерения.

**Phase**

Фаза и групповая задержка представляют собой две стороны одной медали, и фаза также может использоваться для определения акустического центра. Один метод основан на приближении измеренной фазы к минимальной фазе. В меню "Просмотр" устанавливается флажок "Минимальная фаза", и затем минимальная фаза сохраняется в виде наложения. Затем флажок "Минимальная фаза" снимается, что показывает нормальную фазовую характеристику. Теперь, выбрав "Задержка для оценки фазы", фазу можно приблизить к минимальной фазе с помощью дополнительной задержки. Этот метод всегда должен давать хорошие результаты при применении на частоте пересечения.



Woofer delay = 1.2429msec



Tweeter delay = 1.1799msec

**Figure 6.6.12** Определение акустического центра по минимальному выравниванию фаз.

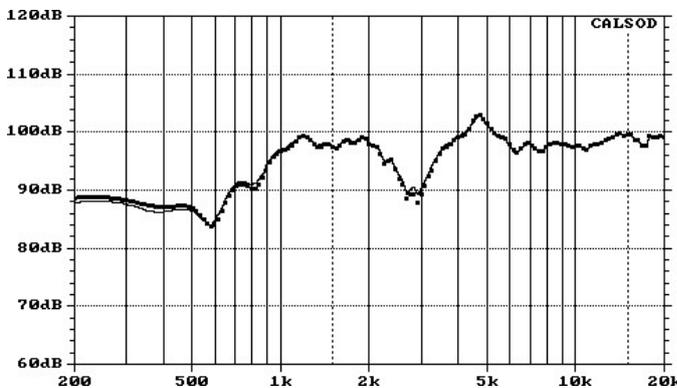
Чтобы ускорить процесс, начальное контрольное значение задержки может быть получено путем установки интервала от 300-й выборки до пика импульсной характеристики. Затем это значение можно отрегулировать путем точной настройки. Частотные и фазовые характеристики для моделирования затем экспортируются с задержкой, определенной для каждого драйвера.

Разницу между двумя акустическими центрами можно определить по разнице между двумя значениями задержки. В примере, показанном выше, разница составляет от 1,2429 до 1,1799 = 0,063мс или 2,17 см.

Мы видим, что два описанных метода дают немного разные результаты, но это не должно оказать существенного влияния на моделирование.

**Проверка моделирования акустического центра**

Смоделированные и измеренные данные также должны быть проверены при использовании варианта В перед моделированием переходов. Что касается варианта А, то следует сравнить измеренные и смоделированные суммарные частотные характеристики.



Path difference = 2.2cm



Measurement	X	Y	Z
Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,0000
Woofer (X,Y,Z) =	0,0000	-0,1350	0,0000
MIC Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,4000
MIC Woofer (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,4000

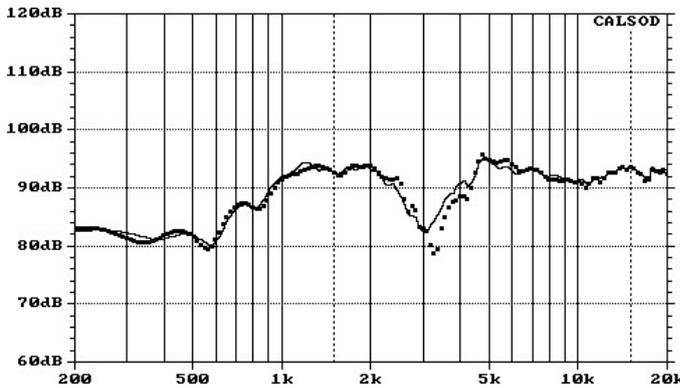
Simulation	X	Y	Z
Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,0000
Woofer (X,Y,Z) =	0,0000	-0,1350	-0,0224
MIC (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,4000

**Figure 6.6.13** CALSOD simulation results.

На рисунке 6.6.13 показаны результаты, полученные с помощью CALSOD. На правой панели показано наложение координат моделирования на измеренные данные. Разницу между двумя акустическими центрами можно увидеть под осью Z низкочастотного динамика. В целом, моделирование выглядит очень похожим на результаты измерений.

Хотя данные, показанные на рисунке 6.6.9, не так хорошо совпадают, эти результаты вполне приемлемы, поскольку они отличаются всего примерно на 1 дБ.

В отличие от варианта А, на рисунке 6.6.14 показано, что происходит, когда измеренные и смоделированные координаты не совпадают.



FR & Minimum Phase, path difference = 2.2cm

Measurement	X	Y	Z
Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,0000
Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	-0,1350	0,0000
MIC Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,4000
MIC Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,4000

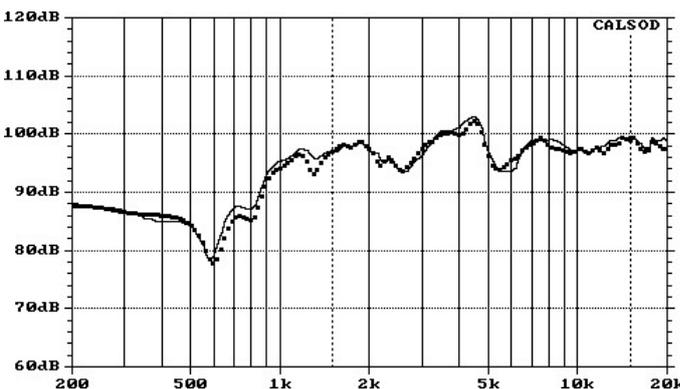
  

Simulation	X	Y	Z
Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,0000
Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	-0,1350	-0,0224
MIC (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,8000

Figure 6.6.14 CALSOD: минимальная фаза с имитацией акустических центров на расстоянии 80 см.

Для моделирования задано значение 80 см (сплошная линия), в то время как пунктирная линия представляет измеренные данные для 80 см, тогда как на самом деле измерение было произведено на расстоянии 40 см. Мы видим, что согласование не является идеальным, но данные, тем не менее, пригодны для использования и представляют собой значительное улучшение по сравнению с трассировками, показанными на рисунке 6.6.10.

Чтобы продолжить это сравнение, давайте посмотрим, что произойдет, если мы разместим имитацию на 10 градусов выше оси твитера (рис. 6.6.15).



FR & Minimum Phase, path difference = 2.2cm

Measurement	X	Y	Z
Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,0000
Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	-0,1350	0,0000
MIC Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,4000
MIC Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,4000

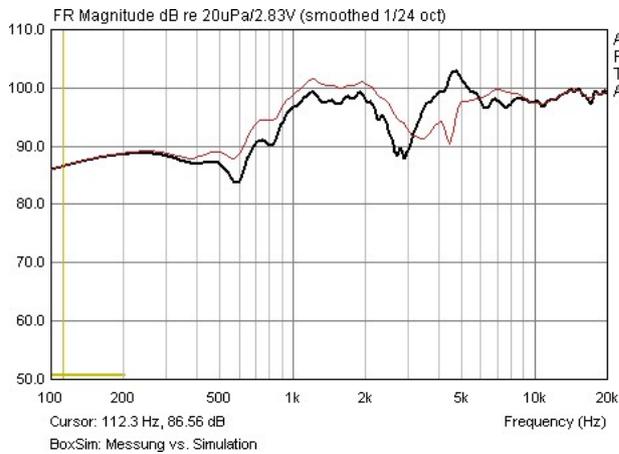
  

Simulation	X	Y	Z
Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,0000
Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	-0,1350	-0,0224
MIC (X,Y,Z) =	0,0000	0,0700	0,4000

Figure 6.6.15 Имитация на 10 градусов выше оси твитера на расстоянии 40 см.

**BoxSim**

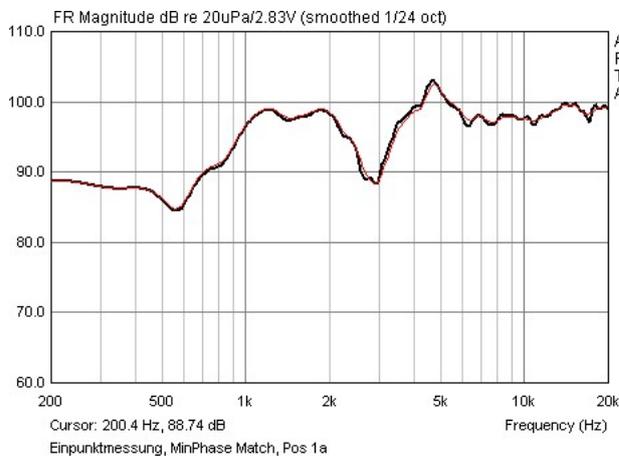
Мы знаем, что BoxSim работает с осью Z (акустическим центром) несколько иначе, чем ALSO, так что же произойдет, если мы повторим эксперимент, показанный на рис. 6.6.14?



**Figure 6.6.16** Результаты моделирования: BoxSim, минимальная фаза с разницей акустических центров.

Рисунок 6.6.16 иллюстрирует сравнение между измеренными и смоделированными результатами для расстояния до микрофона 40 см. Очевидно, что моделирование сработало не очень хорошо, и результаты были бы бесполезны. Следует признать, что при таких обстоятельствах мы, вероятно, в любом случае использовали бы вариант А.

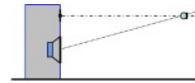
Эксперимент с разницей в длине пути 3,93 см, которая соответствует разнице во времени распространения, полученной при одноточечном измерении без геометрической коррекции, дает результаты, показанные на рисунке 6.6.17.



**Figure 6.6.17** Результаты моделирования: Бокс-симулятор с согласованной минимальной фазой.

Ранее мы предположили, что BoxSim лучше справится с данными измерений, полученными на каждой оси драйвера. Чтобы проверить это, на рисунке 6.6.18 показаны результаты моделирования, основанного на параллельных измерениях. Две трассы идеально совпадают. Данные о местоположении каждого драйвера на перегородке не вводились, так как это повлияло бы на результаты только с точки зрения дифракционных эффектов.

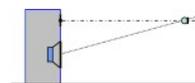
**FR & Minimum Phase, path difference = 2.2cm**



Measurement	X	Y	Z
Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,0000
Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	-0,1350	0,0000
MIC Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,4000
MIC Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,4000

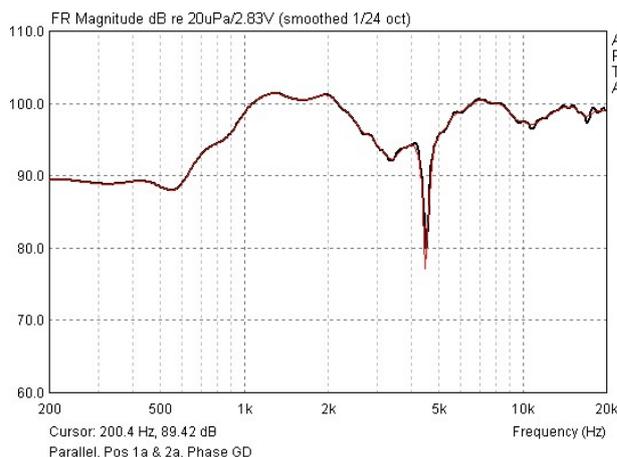
Simulation	X	Y	Z
Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,0000
Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	-0,1350	-0,0224
MIC (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	∞

**Minimum Phase Match, SEO = 3,93 cm**

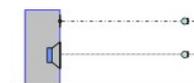


Measurement	X	Y	Z
Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,0000
Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	-0,1350	0,0000
MIC Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,4000
MIC Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,4000

Simulation	X	Y	Z
Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,0000
Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	-0,1350	-0,0393
MIC (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	∞



FR & MinPhase Match, path difference = 2.2cm



Measurement	X	Y	Z
Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,0000
Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	-0,1350	0,0000
MIC Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	-0,0675	0,4000
MIC Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	-0,0675	0,4000

Simulation	X	Y	Z
Tweeter (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	0,0000
Woofers (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	-0,0224
MIC (X,Y,Z) =	0,0000	0,0000	∞

Figure 6.6.18 Результаты моделирования: VoxSim, параллельные измерения, минимальная фаза цели с разницей в акустическом пути.

### Резюме

Реалистичность моделирования зависит от качества измеренных данных, которые должны точно отражать настройку громкоговорителя и условия измерения. Ни измерения ближнего поля, ни условия, позволяющие преобладать эффектам помещения, не являются идеальными для этого.

Самый простой способ провести измерения и обработать данные - убедиться, что координаты измерения и моделирования идентичны (вариант А). Измерения для низкочастотных и твитерных динамиков выполняются из одной контрольной точки, и расстояние от источника до микрофона не должно быть чрезмерно коротким. Частотные и фазовые характеристики для экспорта следует недостатком является то, что данные будут иметь лишь очень ограниченную полезность обрабатывать, установив курсор в одинаковом положении для всех драйверов. Единственным для моделирования, включающего другие расстояния и высоты.

Вариант В является более гибким в этом отношении. Для моделирования необходима разность акустических трасс в дополнение к данным частотной и фазовой характеристики. Относительную разность акустических трасс следует определять с использованием параллельных измерений и усреднения, поскольку это дает результаты с наименьшей погрешностью. Файлы FRD для экспорта должны быть максимально свободны от текущей фазы (что приводит к чрезмерному переносу фаз), поэтому используйте либо минимальную фазу, либо сопоставьте положение курсора, чтобы определить разницу между акустическими центрами.

Несмотря на то, что при измерениях и обработке данных соблюдается большая осторожность, характеристики громкоговорителя (размер, расстояние между динамиками, расположение на перегородке, тип динамика и т.д.) и расстояние, используемое для измерения, все еще могут в большей или меньшей степени приводить к ошибкам. Перед запуском моделирования всегда стоит проверить соответствие данных измерений моделируемым условиям.