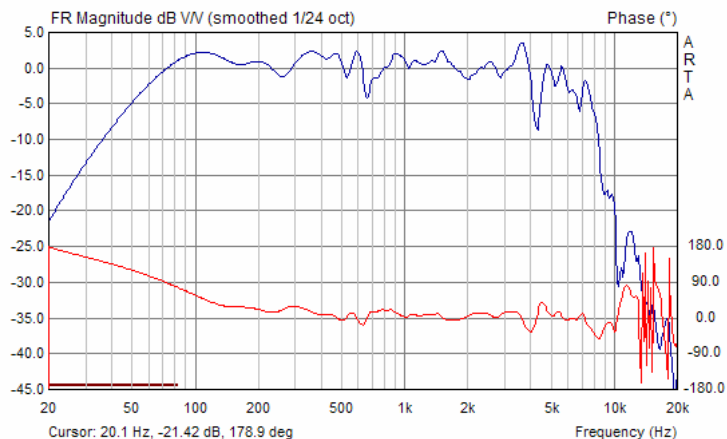


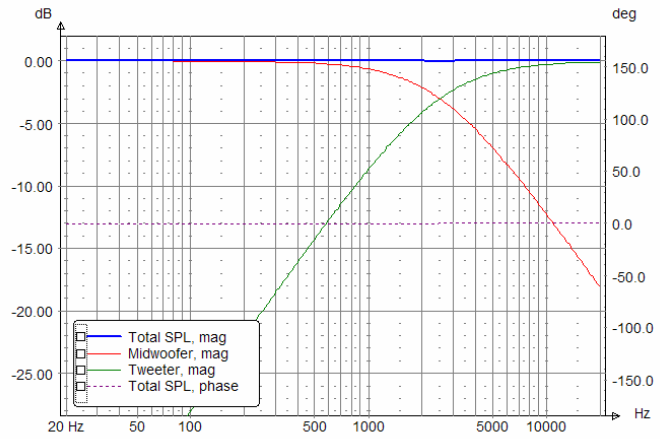
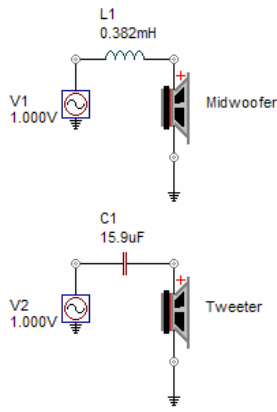
## Непростой расчет кроссоверов акустических систем

Как любителями звука обычно проектируется многополосная акустическая система? Очень просто. Под имеющийся в наличии НЧ (НЧ/СЧ) динамик разрабатывается необходимого объема бокс. Ширину передней панели определяет размер НЧ (НЧ/СЧ) динамика, остальные динамики располагаются, исходя из эстетических соображений. Кроссовер рассчитывается также «классическим» методом – на бумаге (или с помощью небольших программ) по формулам с давно известными коэффициентами для получения требуемой характеристики фильтра. Сложив все это вместе и получив какой-то результат, одни остаются им довольны, а другие начинают задаваться вопросом: почему результат не соответствует расчетам. Не обходится и без особо «продвинутых», начинающих заявлять, что все многополосные системы, мягко говоря, не стоят внимания. Действительно, каков вывод! В прошлом я сам рассчитывал акустические оформления и кроссоверы по формулам. Расчет кроссоверов производился, опираясь на номинальное сопротивление ( $Z$ ) динамиков, после чего следовала долгая процедура подгонки «на слух». Получалось, но не ахти как. Удовлетворительно. Все дело в том, что я не учитывал целый ряд особенностей при расчете. Особенности, которые отличают динамики от резисторов, а многополосную акустику от точечного излучателя. Сейчас мне проще, есть измерительный комплекс, с которым я научился хорошо работать, и есть САД системы, которые позволяют промоделировать акустику, учитывая все ее тонкости. И вот при очередном знакомстве с изделием, рассчитанным по формулам и принесенном на измерения, я решил уделить повышенное внимание кроссоверу. Конструкция, как оказалось, была с несводимыми в принципе полосами, чего на первый взгляд не скажешь. Особенно, глядя на АЧХ простого и недорогого мидбаса:

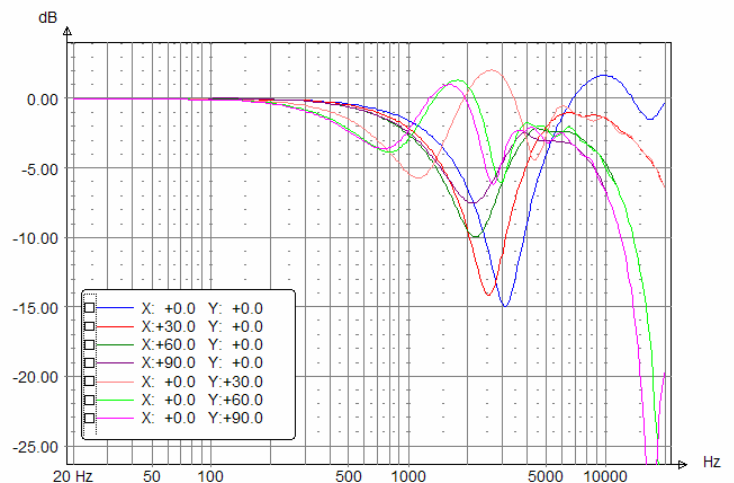
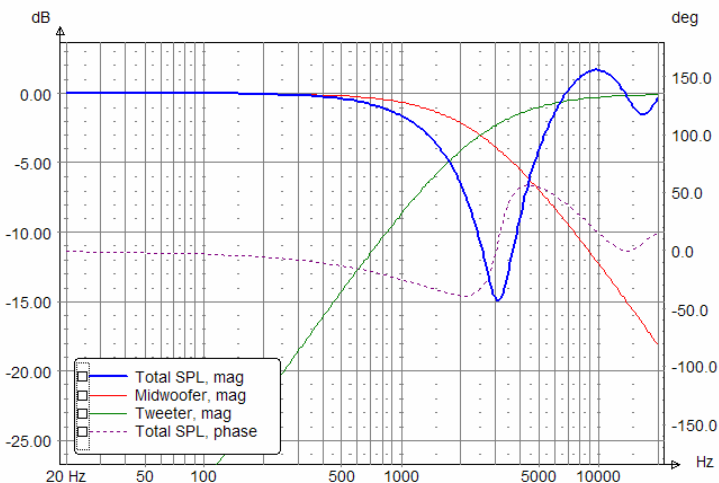
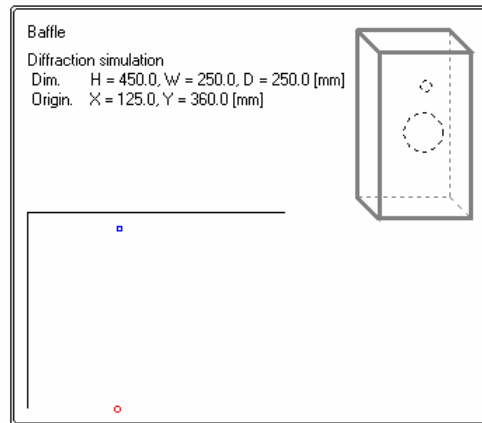
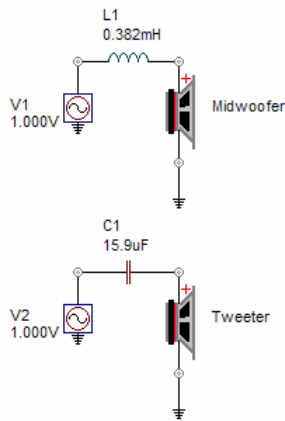


Используемый кроссовер – классика. Первый порядок на мидбасе (на изображении выше измерения проведены без кроссовера) и первый порядок на твитер. Казалось бы, что может быть лучше, чем фильтр первого порядка? Практически любой аудиофил скажет, что в двухполосной акустической системе сопряженные таким фильтром головки обеспечат линейную фазо-частотную характеристику (ФЧХ) и хорошую, без колебаний и затягивания, переходную характеристику (ПХ). А широкий совместный диапазон излучения можно компенсировать разнесением частот раздела. К сожалению, все хорошо только в теории. На практике же первый порядок фильтра редко работает с приемлемым результатом. Я попробую внести ясность, почему так происходит. Реальных результатов измерений не привожу, только моделирование в LspCAD. Как показала практика, результаты моделирования в этой САД системе с высокой точностью подтверждаются результатами реальных измерений.

На изображении ниже показана двухполосная система с использованием фильтров первого порядка с частотой раздела полос 2500 Гц. Кроссовер рассчитан, исходя из номинального сопротивления нагрузки для ФНЧ – 6 Ом, для ФВЧ – 4 Ома. Динамикам присвоено константное сопротивление 6 Ом (Midwoofer) и 4 Ома (Tweeter). Размер их излучающих поверхностей составляет 1 мм, а акустические центры расположены в одной точке ( $x = 0, y = 0, z = 0$ ). В общем, идеальные условия работы, чего в реальной жизни не может быть. Передаточная характеристика такой системы показана на графике рядом. Остальные характеристики в данном случае также линейны.

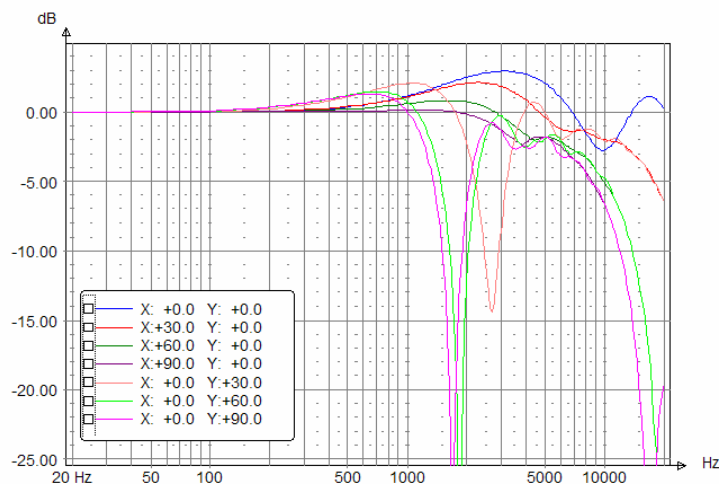
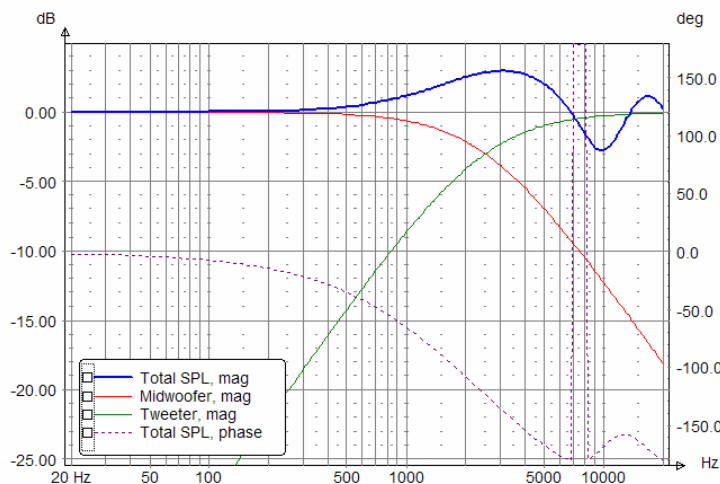


На первый взгляд, кроссовер идеален. Но ведь и вся система здесь представлена идеальной. Исправим досадный недочет и немного приблизим ее к реальности. Добавим подходящий бокс и используем размеры излучающих поверхностей для мидвуфера – 110 мм, а для твитера – 25.4 мм. Расположение твитера будет референсной точкой с координатами  $x = 0, y = 0, z = 0$ . Мидвуфер же расположен ниже твитера, его акустический центр смещен вниз на 130 мм и углублен на 25 мм ( $x = 0, y = -130, z = 25$ ). Среди двухполосных систем с использованием 4.5 дюймового мидвуфера и 1 дюймового твитера это типичные значения расположения акустических центров.

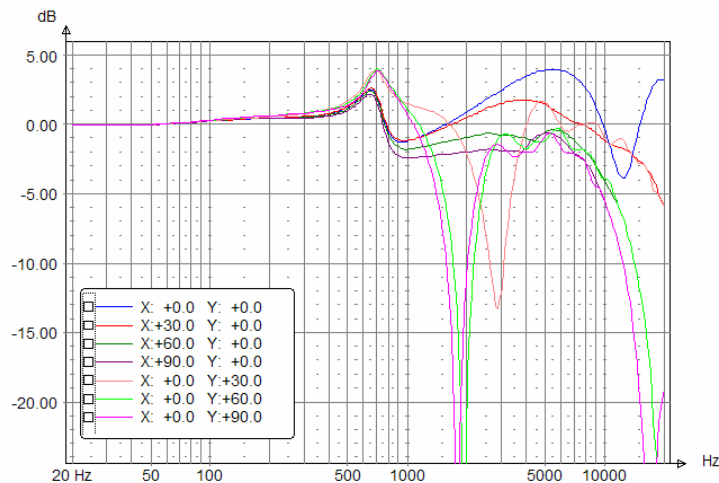
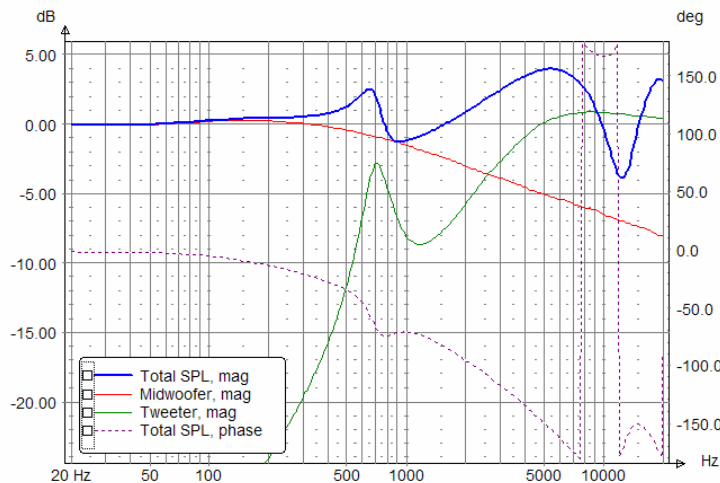


На первом графике изображена АФЧХ системы, на втором – внеосевые АЧХ. Ожидали такого результата? Так как акустические центры излучателей находятся на некотором расстоянии друг от друга, между ними для звуковых волн существует временная разница, следовательно можно говорить о различии их акустических фаз. Выровнять фазовую характеристику можно двумя методами: расположением акустических центров головок строго на оси (коаксиальный излучатель), либо фазовой коррекцией в кроссовере. Но поскольку речь идет о фильтрах первого порядка, по понятным причинам фазовая коррекция в кроссовере с ними невозможна. Поэтому идем другим путем.

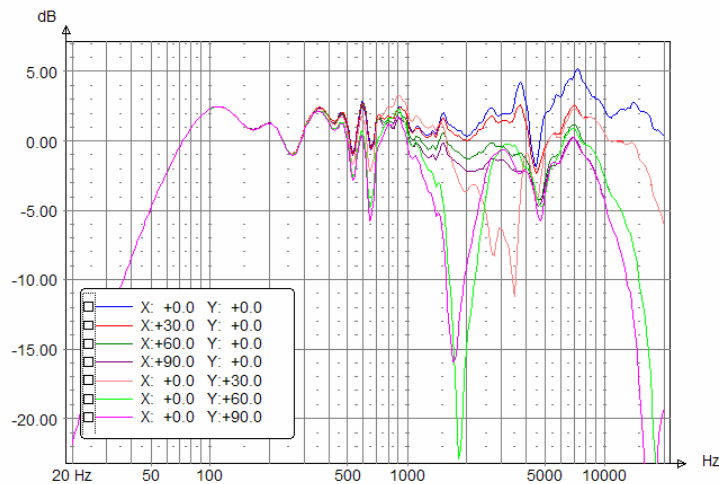
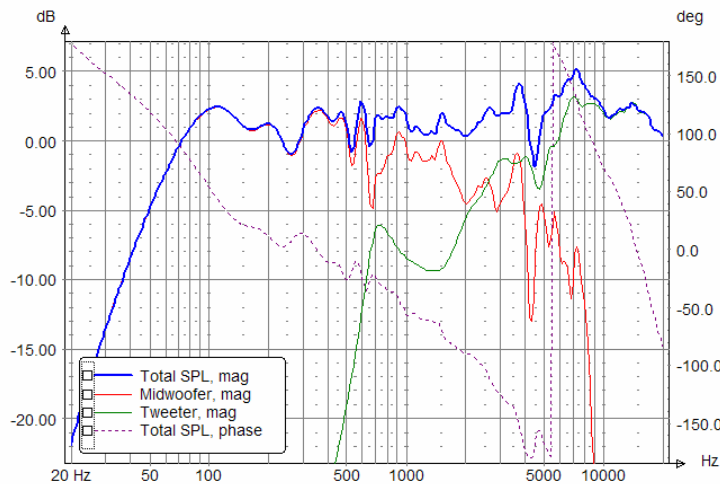
Так как на изображении выше отчетливо виден сильный провал в области частоты раздела, напрашивается мысль о противоположном знаке акустических фаз излучателей в этой области. Пробуем противофазное включение, хотя это опять врезрез идет с теорией. На сей раз о синфазной работе головок при использовании фильтров первого порядка.

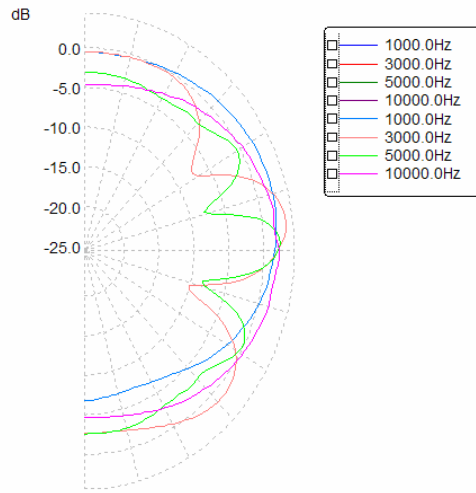
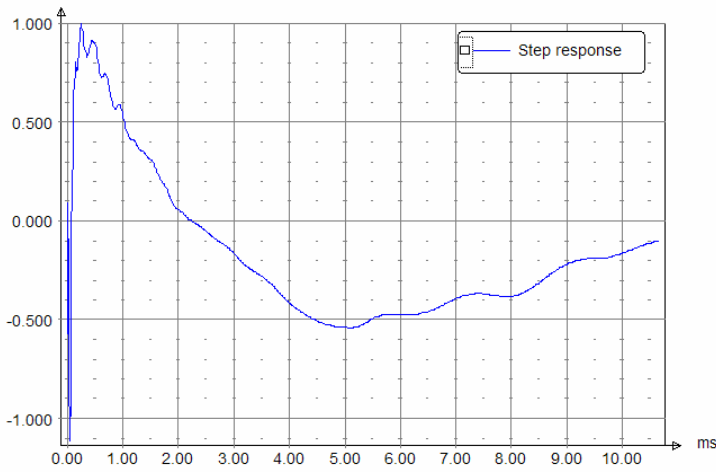


Теперь АЧХ находится в пределах неравномерности  $\pm 3$  дБ, хотя с ФЧХ наблюдаются явные проблемы. Зато что происходит с внеосевыми АЧХ! А ведь это все еще «идеальные» динамики. Добавляем реальный импеданс.



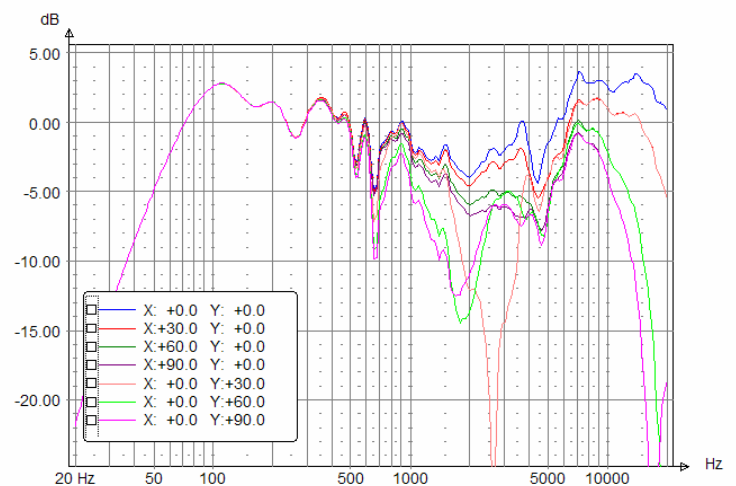
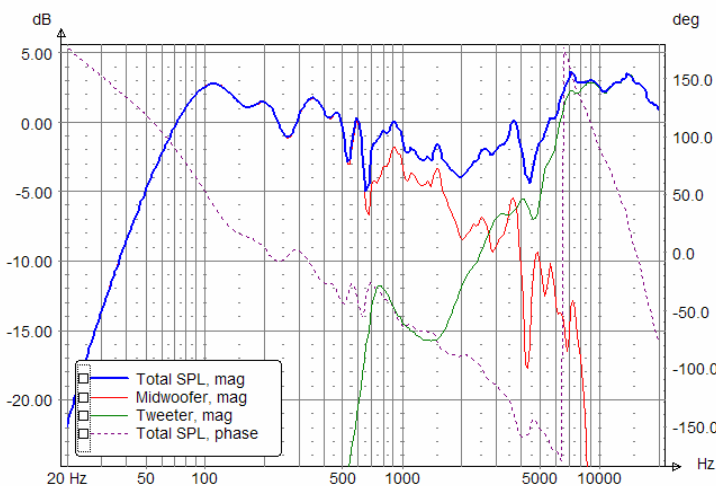
С таким фильтром твитер без каких-либо преград работает в области частоты резонанса (а она находится достаточно низко – 750 Гц). Мидвуфер же практически без ослабления воспроизводит всю полосу частот. Смотрим, что будет, если добавить реальные АФЧХ головок.



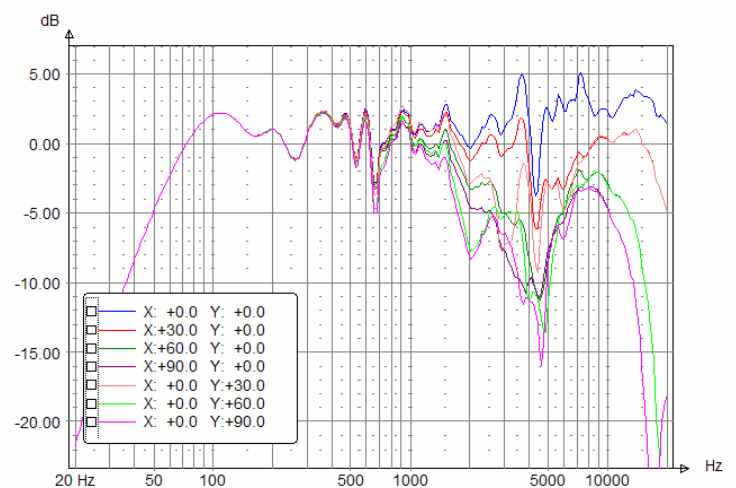
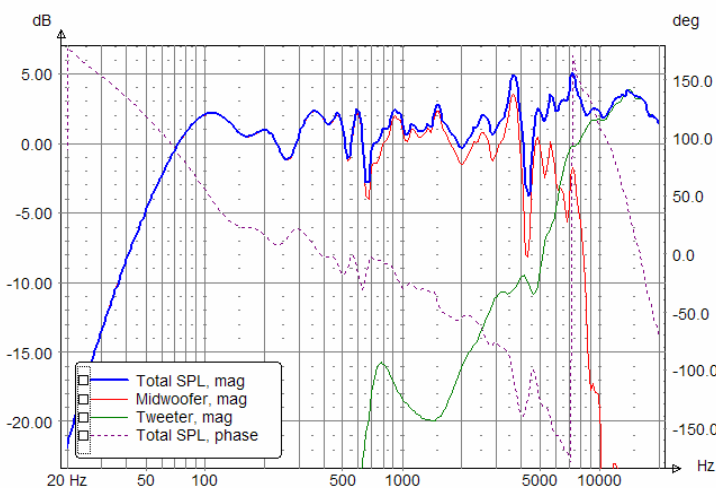


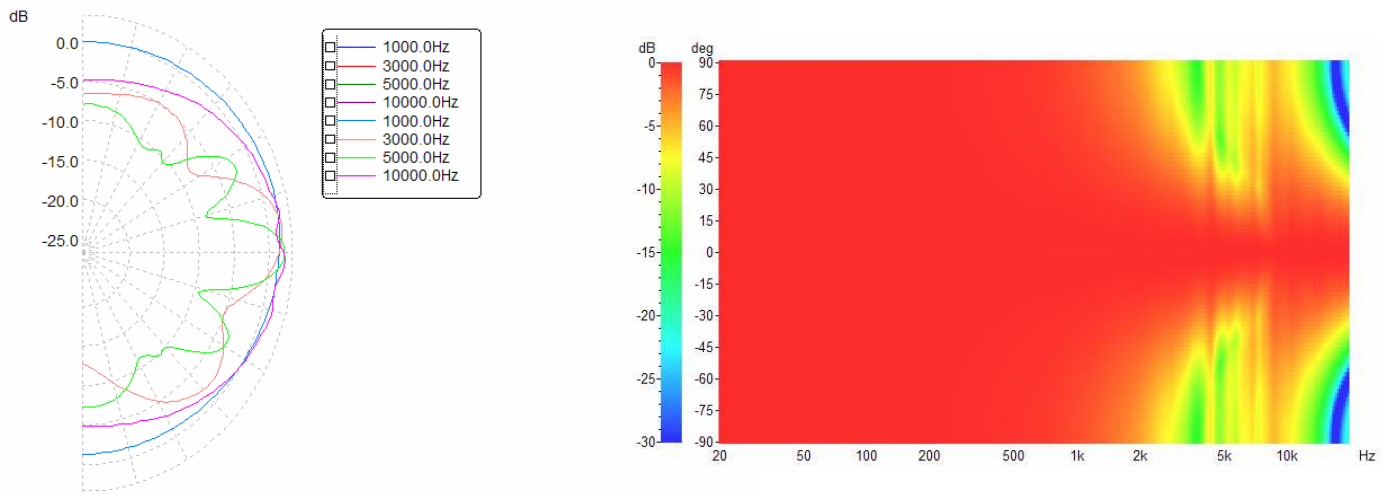
Спрашивается: за что боролись? Совместная работа головок обеспечивается в диапазоне 600 Гц – 8 кГц, ФЧХ имеет излом. Внеосевые АЧХ и диаграмма направленности обещают окраску звучания в широком диапазоне частот, узкую зону стереоэффекта и необходимость прослушивания такой системы строго на оси твитера. Сам твитер работает в области резонанса, а мидвуфер – за пределами поршневой зоны. Единственное, что осталось удовлетворительным – ПХ.

При широком частотном диапазоне совместной работы головок, часто пользуются разнесением частот раздела. Пробуем такой вариант. Для ФНЧ используется частота среза 1 кГц, для ФВЧ – 6 кГц.

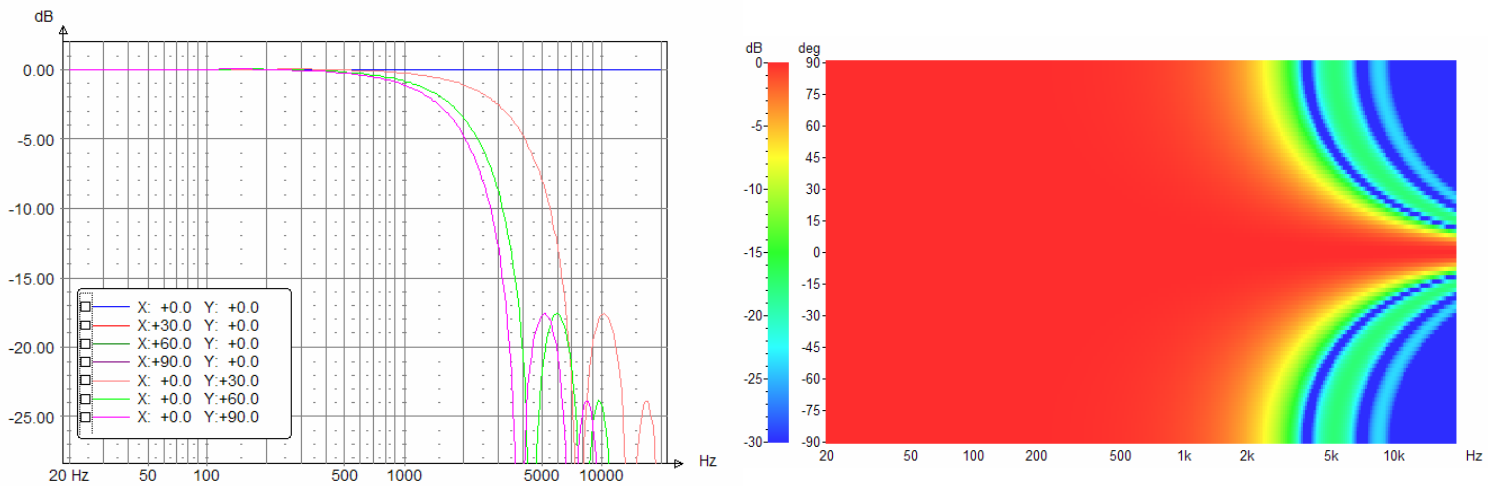


Прежние недостатки еще больше усугубились. Теперь наблюдается БОЛЬШАЯ неравномерность осевой АЧХ и худшие внеосевые АЧХ. Может, стоит попробовать высокую – 8...10 кГц – частоту раздела? Так как мидвуфер по результатам измерений АЧХ работает до 8 кГц, можно подключить его без фильтра, а для твитера использовать фильтр первого порядка с частотой среза 10 кГц. Пробуем такой вариант.

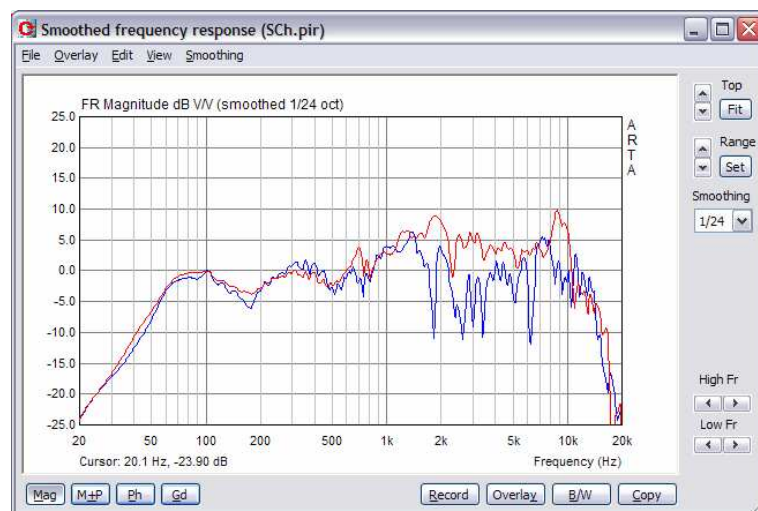




Как видим, ослабление на частоте резонанса твитера недостаточно даже для такой высокой частоты раздела. А что происходит с внеосевыми АЧХ? Мидвуфер работает без фильтра в широком диапазоне частот, твитер его только поддерживает вверху, а диаграмма направленности хуже, чем в любом другом случае. Мидвуфер, в силу законов физики, имеет сужение диаграммы направленности выше частоты, которая определяется размерами его излучающей поверхности. В идеальном случае, эта частота составляет  $c/d$ , где  $c$  – скорость звука в воздушной среде (345 м/с),  $d$  – диаметр диафрагмы (в метрах). Для используемого в примерах мидвуфера диаметр диафрагмы составляет 110 мм, что ограничивает его использование на частотах выше 3 кГц.



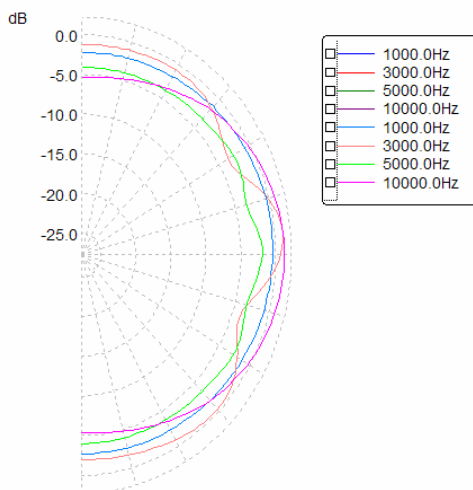
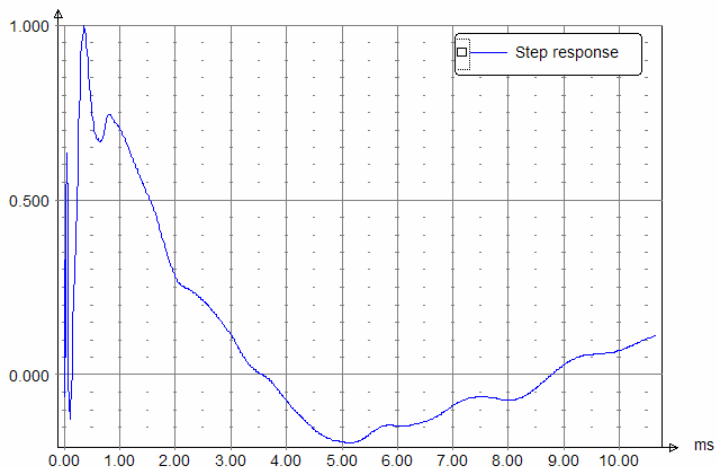
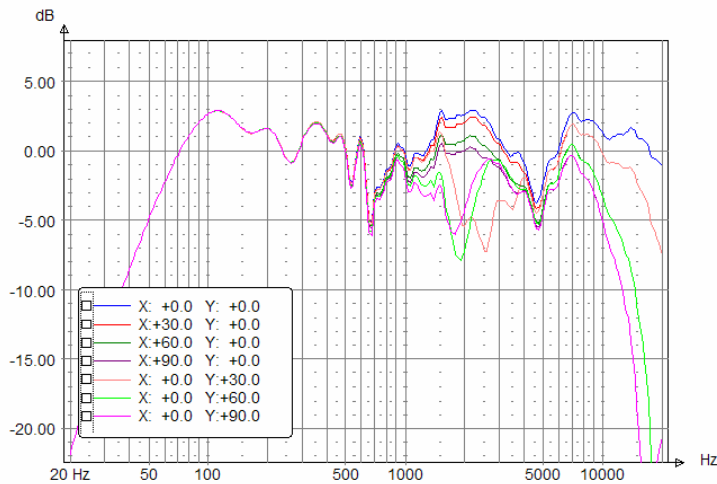
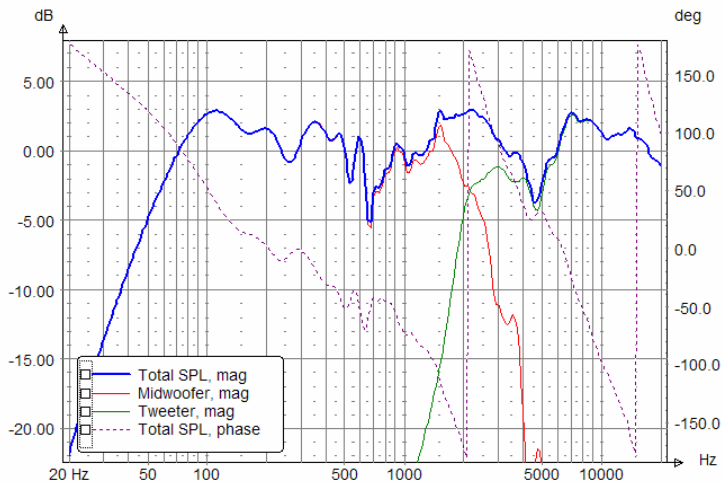
Изменение внеосевых АЧХ и сужение диаграммы направленности проявляется и в комбинированных широкополосных динамиках. Для примера, ниже приведен результат измерения широкополосного динамика 4A28 при измерении на оси и с отклонением от оси на 45 градусов.



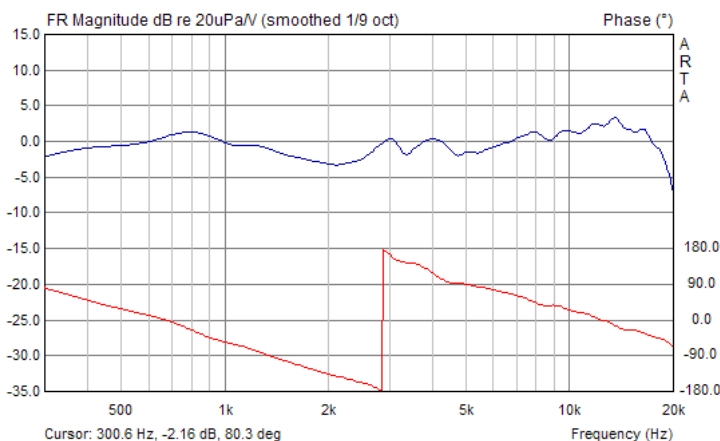
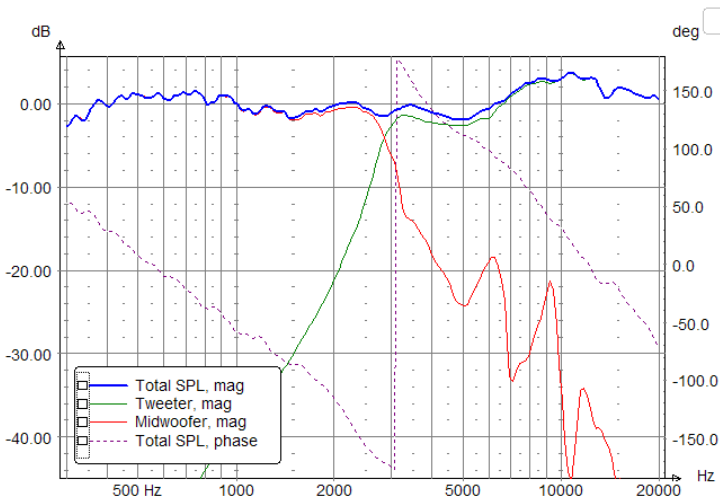
Как можно видеть, изменение АЧХ происходит, начиная с частоты 1500 Гц, что хорошо согласуется с вышеприведенной формулой ( $c/d = 1604$  Гц).

По указанной причине, расположение акустических центров излучателей в многополосной системе должно производиться так, чтобы расстояние между ними не превышало длины волны на частоте раздела.

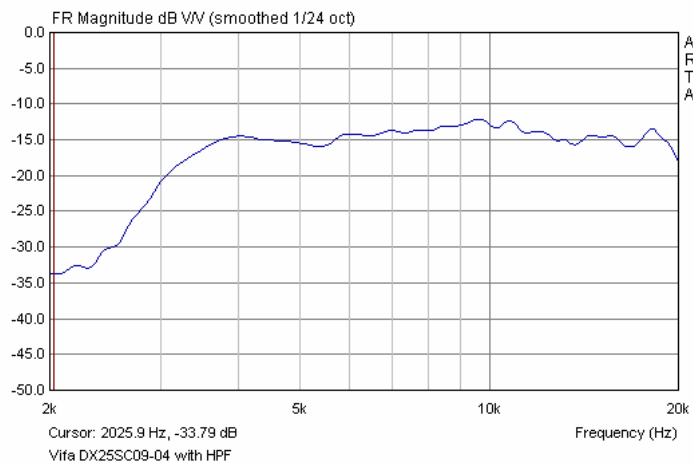
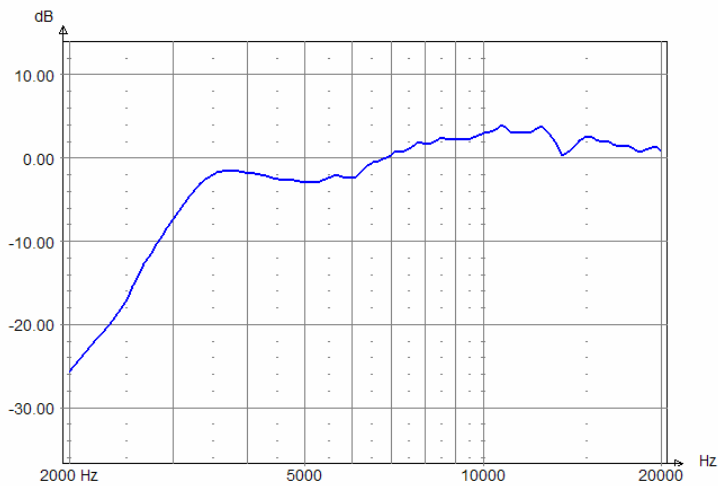
Что можно сделать для устранения всех перечисленных недостатков при использовании тех же мидвуфера и твитера. Не сильно углубляясь в моделирование, при использовании фильтров третьего порядка я получил следующую картину.



Проведя час-другой за моделированием, можно выровнять характеристики до погрешности в пару децибел, а диаграмму направленности сделать еще шире. Резонный вопрос: совпадут ли результаты моделирования с результатами реальных измерений. Предлагаю посмотреть на изображения ниже и самому ответить на этот вопрос.







Но для того, чтобы получить требуемые результаты, САД системе необходимо «знать» о будущей АС все: размеры бокса, расположение динамиков, их АФЧХ и ИЧХ. Иначе вместо того, что можно было бы получить (первое изображение ниже), получим то, что будет (второе изображение ниже).

