

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина

Методические указания к выполнению БДЗ
«Применение планарных антенно-фидерных устройств»

По курсу
«Моделирование антенно-фидерных устройств в среде Keysight Advanced Design System»

Москва, Зеленоград

2021

Оглавление

Оглавление	2
Введение	2
Методика выполнения работы	3
Исследование устойчивости согласующей цепи к параметрам подложки	3
Использование двушлейфного направленного ответвителя	9
Использование кольцевого направленного ответвителя	13
Использование направленного ответвителя на связанных линиях	17
Использование кольцевого развязанного делителя мощности	24
Задание на выполнение	31
1. Исследование спроектированных моделей	31
2. Информационный поиск	31
Требования к отчёту	33
Литература	34

Введение

Цель работы: ознакомиться с примерами использования разработанных ранее полосковых устройств в среде Keysight Advanced Design System (ADS); освоить информационный поиск по темам расчета, моделирования, проектирования и использования полосковых устройств.

Используемое оборудование или ПО: материал подготовлен на основании версии Keysight Advanced Design System 2020 upd1. Однако, в работе не используются никакие специфичные для данной версии инструменты, все используемое и описываемое существует в ADS практически в таком же виде как минимум с версии ADS 2011.11.

Продолжительность работы: 8 часов.

В разделе «Методика выполнения» приведены только необходимые действия по выполнению самостоятельной работы. Подробно описываются только новые по отношению к выполненным лабораторным работам приемы работы в ADS.

Методика выполнения работы

Исследование устойчивости согласующей цепи к параметрам подложки

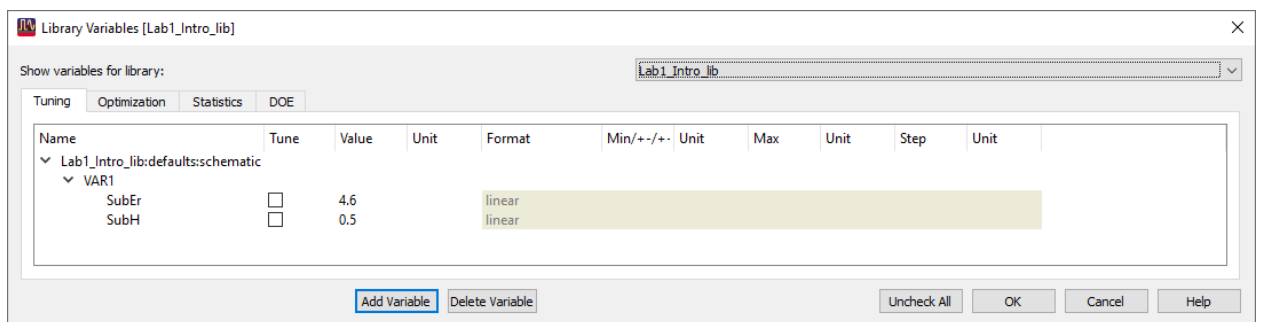
Исследуем устойчивость спроектированной согласующей цепи к параметрам подложки. Исследовать будем по точности относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика и его толщины.

Исследовать будем в режиме ЕМ-моделирования.

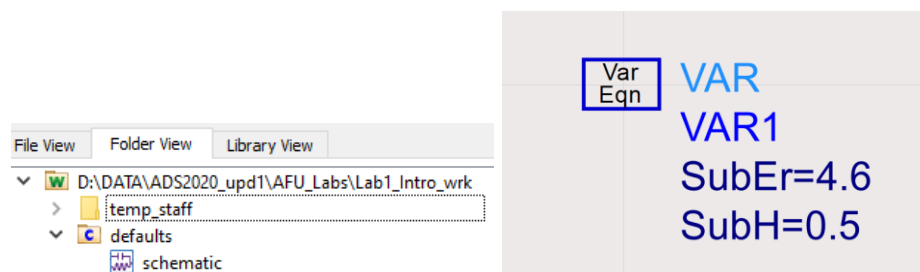
Для того, чтобы можно было параметризовать подложку для ЕМ-моделирования нужно провести несколько преобразований (манипуляции показаны для проекта из лабораторной работы №1):

1. Создать параметры библиотеки проекта.

В основном окне ADS по команде Options – Technology – Variables Definitions по команде Add Variable добавим две переменные – SubEr и SubH. Переменным библиотеки нет возможности назначать тип, они являются безразмерными числами. Договоримся, что толщина диэлектрика SubH в мм.



В библиотеку проекта добавляется ячейка defaults со схематиком, в котором находится блок VAR с переменными библиотеки. Этот схематик фактически является местом хранения переменных библиотеки проекта и там тоже можно с ними работать.

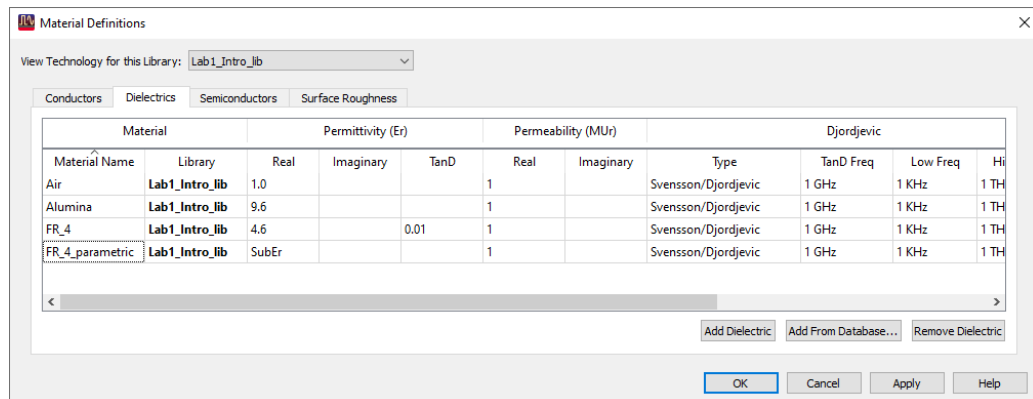


Переменные библиотеки проекта видны всем ячейкам, а также определению подложки и материалов.

2. Добавить параметризованный ВЧ-диэлектрик.

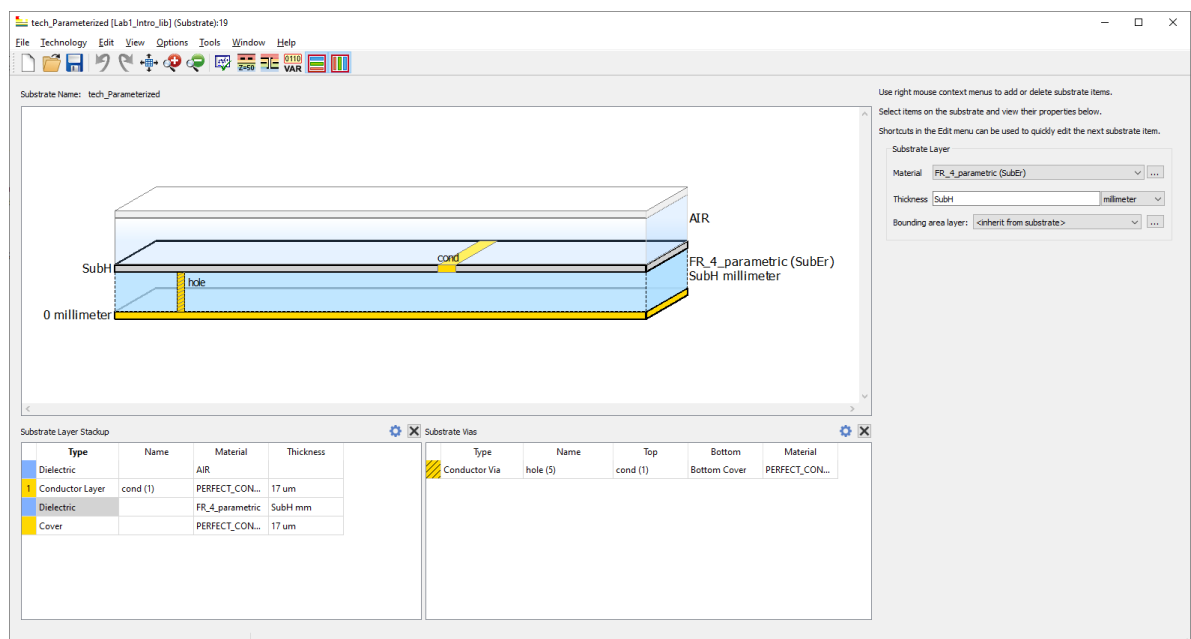
Из основного окна ADS по команде Options – Technology – Material Definitions выйдем в окно параметров материалов. Скопируем строку с

базовым ВЧ-диэлектриком и заменим ему значение относительной диэлектрической проницаемости с фиксированной цифры на значение переменной SubEr.

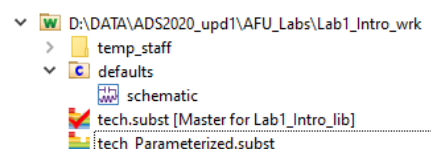


3. Создать параметризированное определение подложки.

По ПКМ – Copy File скопируем технологическое определение подложки tech.subst как tech_Parameterized. Материал подложки выберем параметризированный (FR_4_parametric) и толщину тоже зададим переменной SubH. Т.к. переменные проекта безразмерные, то для толщины нужно указать единицу (мм).



В дереве проекта теперь у нас есть дополнительная параметризированная подложка. Она не является основной технологической подложкой для библиотеки проекта, а будет использоваться только для параметрического ЕМ-моделирования.

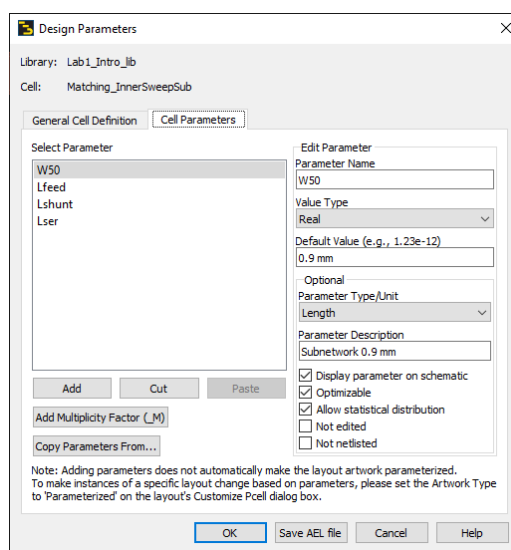


Доступ к окнам технологии библиотеки также возможен и из редактора подложки (меню Technology).

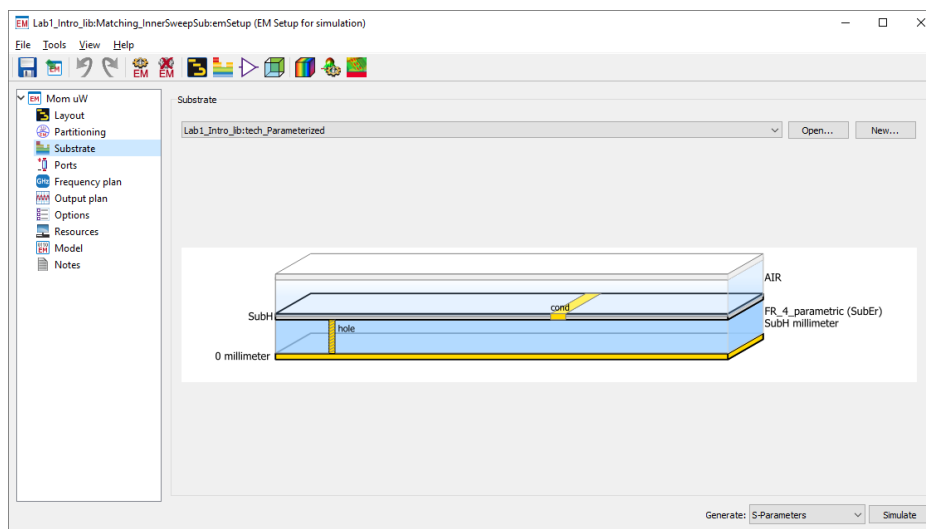
4. Создать внутреннюю ячейку с измененной подложкой.

В дереве проекта по ПКМ – Copy Cell скопируем ячейку с внутренней топологией согласующей цепью (Matchin_EM_Inner) как Matching_InnerSweepSub.

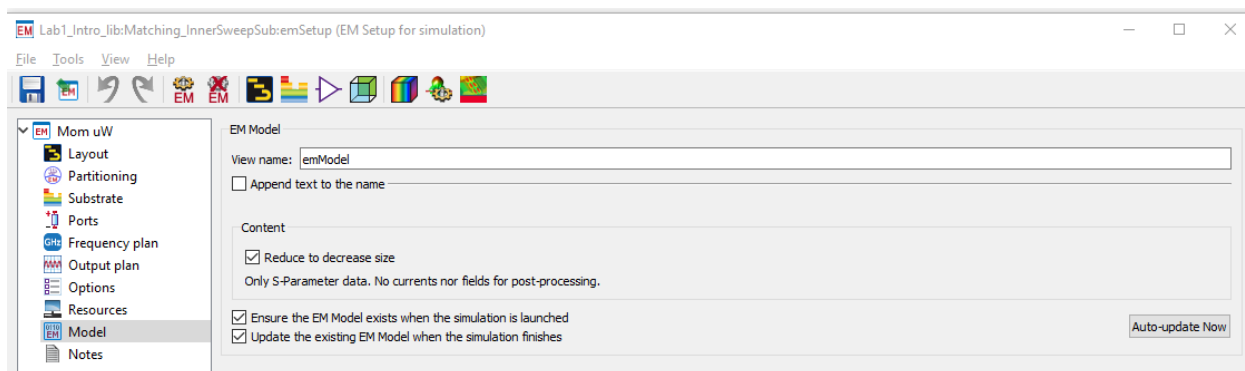
В новой внутренней ячейке надо убедиться, что она параметризирована. Для этого в ее топологии по команде File – Design Parameters на вкладке Cell Parameters должны быть соответствующие параметры. Если их нет, то по кнопке Copy Parameters From можно скопировать параметры из исходной ячейки.



Далее в новой внутренней ячейке в настройках emSetup нужно выбрать параметризованную подложку (вкладка Substrate).



Также на вкладке Model нужно обновить emModel по кнопке Auto-update Now (или убедиться, что стоит автообновление новыми результатами).



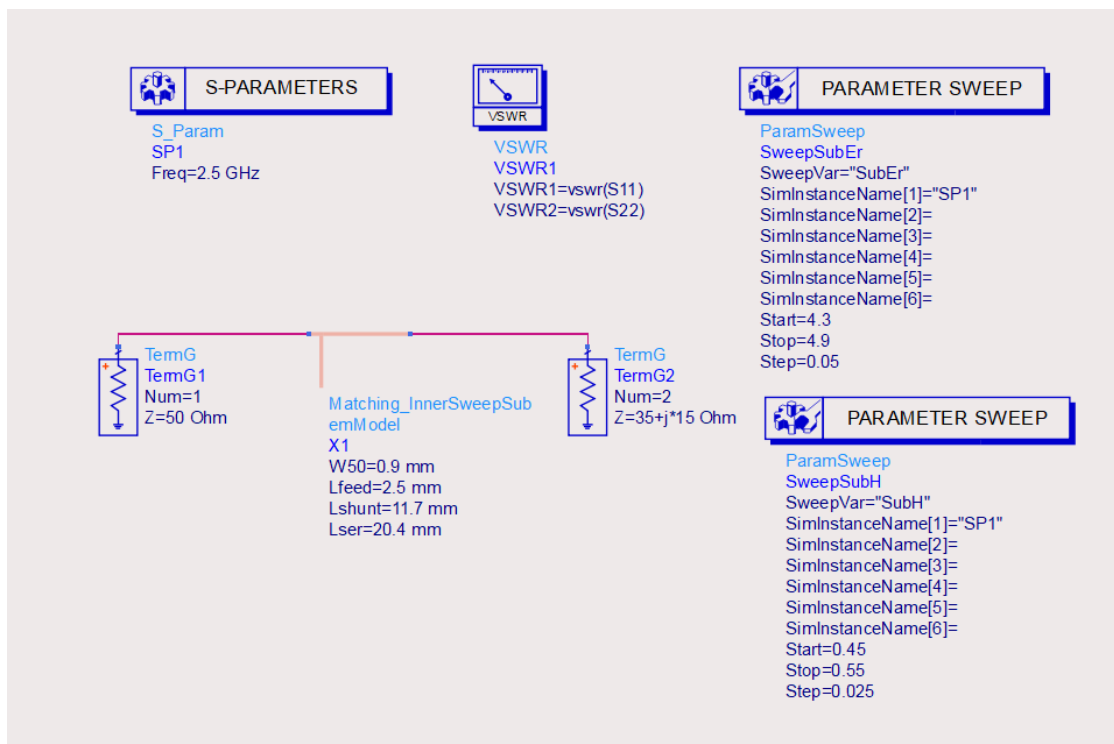
5. Создать верхнюю ячейку Match_TopParameterized.

В нее внести ячейку нижнего уровня Matching_InnerSweepSub как emModel.

Частоту расчета установим одну, центральную. Сделаем два независимых свипа (для каждого подчиненным контроллером будет SP1), по SubEr и по SubH. Как было указано ранее, эти переменные видны из всех ячеек библиотеки проекта и к ним можно обращаться по имени.

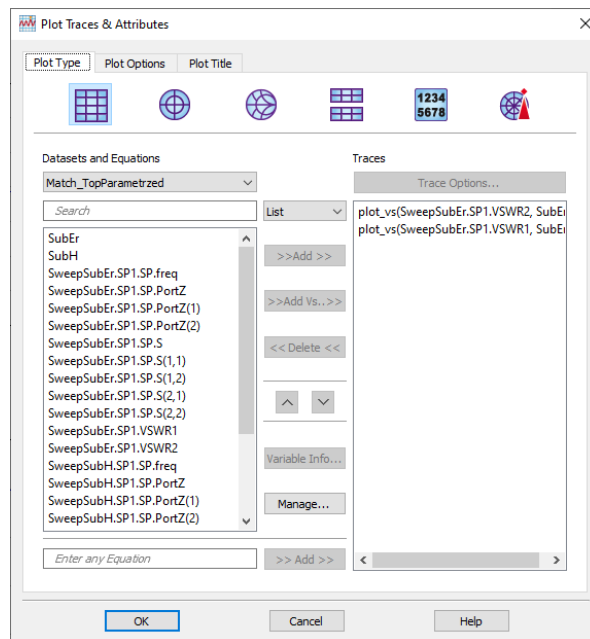
Относительная диэлектрическая проницаемость может меняться у разных производителей, иногда в значительных пределах. Просвипаем в пределах $\pm 6-7\%$ от номинала.

Толщину также прогоним в пределах $\pm 10\%$.



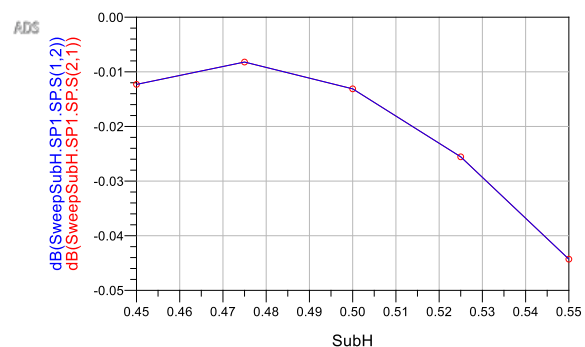
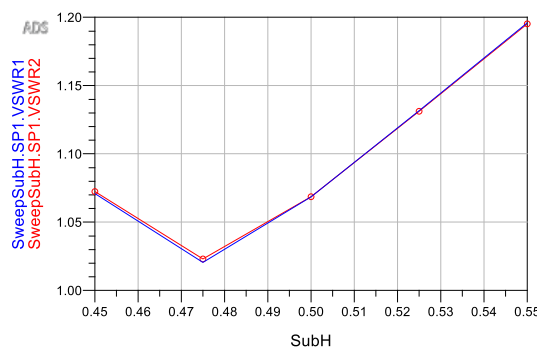
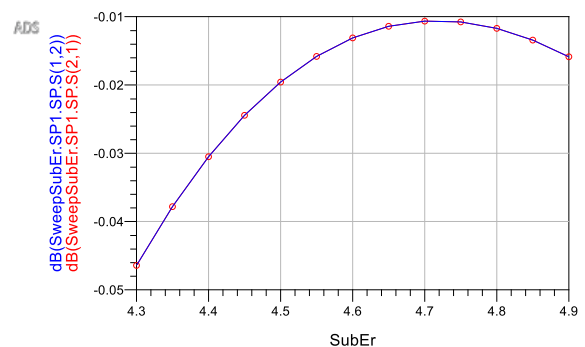
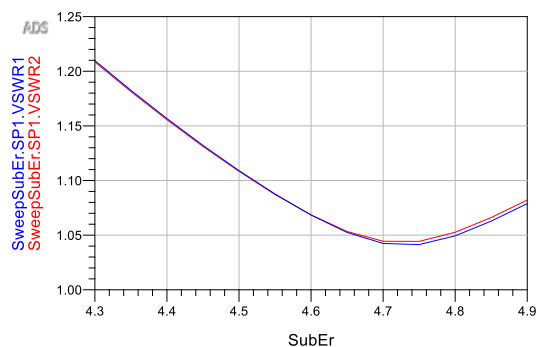
В результатах будет два набора независимых результатов от двух контроллеров верхнего уровня SweepSubEr и SweepSubH. Отображаемое

выражение будет иметь вид `plot_vs()`, а собственно результат будет содержать полную свою строку (в виде иерархии вида `SweepSubEr.SP1.VSWR1`).



Отообразим зависимости КСВН и коэффициентов передачи от SubEr и SubH.

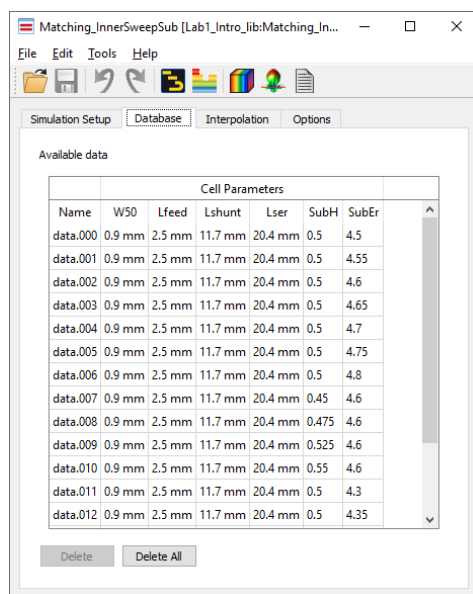
Для отображения зависимости КСВН1 относительно переменной SubEr, нужно выбрать отображаемый график и нажать Add Vs, затем выбрать независимую переменную SubEr. Аналогично для других результатов.



Видно, что присутствует некоторое ухудшение КСВН как из-за точности относительной диэлектрической проницаемости, так и от толщины подложки. Коэффициент передачи при этом ухудшается незначительно.

Данная цепь довольно простая и нерезонансная. Для более сложных цепей (особенно фильтров) влияние параметров подложки может оказаться более значительным.

Если открыть вкладку Database для emModel ячейки Matching_InnerSweepSub, то видно, что результаты хранятся как для переменных ячейки, так и для переменных библиотеки проекта.



The screenshot shows a software window titled "Matching_InnerSweepSub [Lab1_Intro_lib:Matching_In...". It has tabs for "Simulation Setup", "Database", "Interpolation", and "Options". The "Database" tab is active, displaying a table of "Available data".

Name	Cell Parameters					
	W50	Lfeed	Lshunt	Lser	SubH	SubEr
data.000	0.9 mm	2.5 mm	11.7 mm	20.4 mm	0.5	4.5
data.001	0.9 mm	2.5 mm	11.7 mm	20.4 mm	0.5	4.55
data.002	0.9 mm	2.5 mm	11.7 mm	20.4 mm	0.5	4.6
data.003	0.9 mm	2.5 mm	11.7 mm	20.4 mm	0.5	4.65
data.004	0.9 mm	2.5 mm	11.7 mm	20.4 mm	0.5	4.7
data.005	0.9 mm	2.5 mm	11.7 mm	20.4 mm	0.5	4.75
data.006	0.9 mm	2.5 mm	11.7 mm	20.4 mm	0.5	4.8
data.007	0.9 mm	2.5 mm	11.7 mm	20.4 mm	0.45	4.6
data.008	0.9 mm	2.5 mm	11.7 mm	20.4 mm	0.475	4.6
data.009	0.9 mm	2.5 mm	11.7 mm	20.4 mm	0.525	4.6
data.010	0.9 mm	2.5 mm	11.7 mm	20.4 mm	0.55	4.6
data.011	0.9 mm	2.5 mm	11.7 mm	20.4 mm	0.5	4.3
data.012	0.9 mm	2.5 mm	11.7 mm	20.4 mm	0.5	4.35

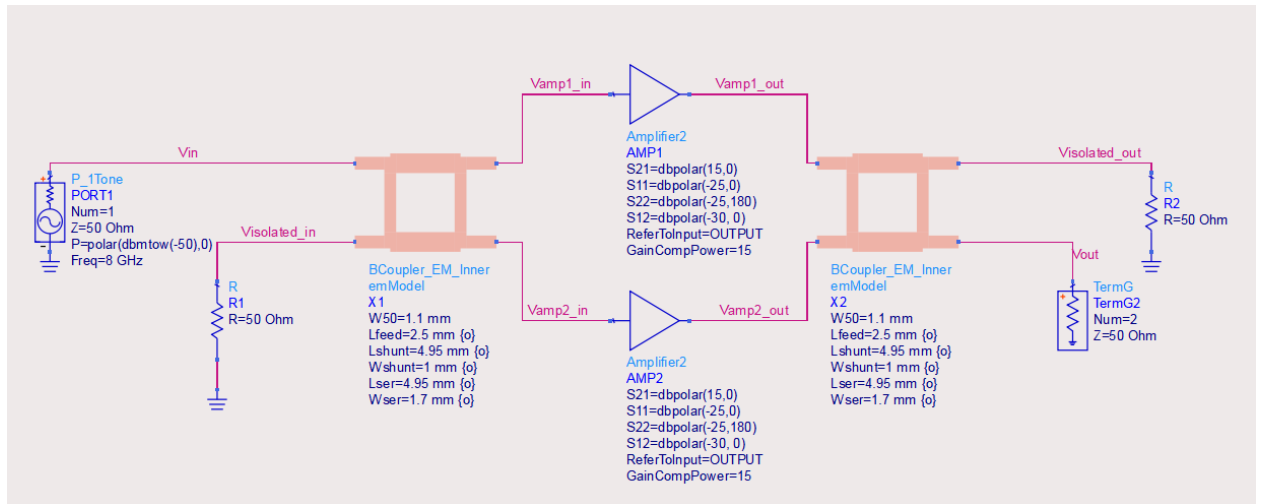
At the bottom of the window, there are "Delete" and "Delete All" buttons.

Для полосковых цепей еще можно исследовать зависимость от свойств металла (толщина, модель шероховатости поверхности и собственно материал металлизации), а также от тангенса угла диэлектрических потерь ВЧ-диэлектрика.

Использование двушлейфного направленного ответвителя

Исследуем схему, позволяющую за счет параллельного сложения мощностей на двушлейфных НО увеличить уровень выходной мощности усилительного устройства.

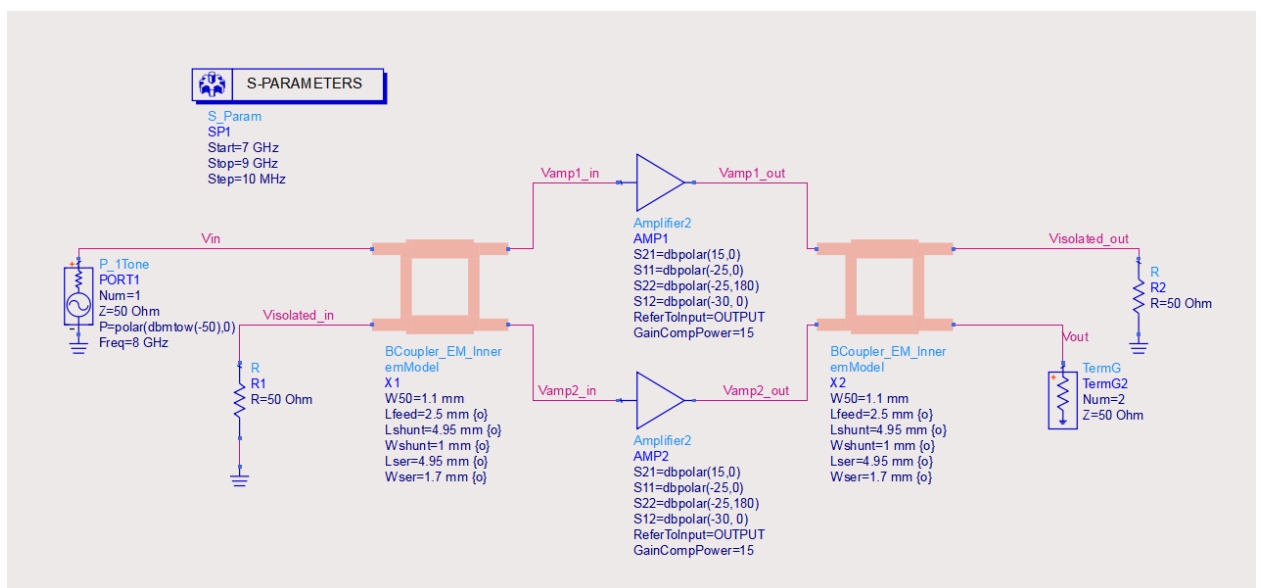
Базовая схема показана ниже



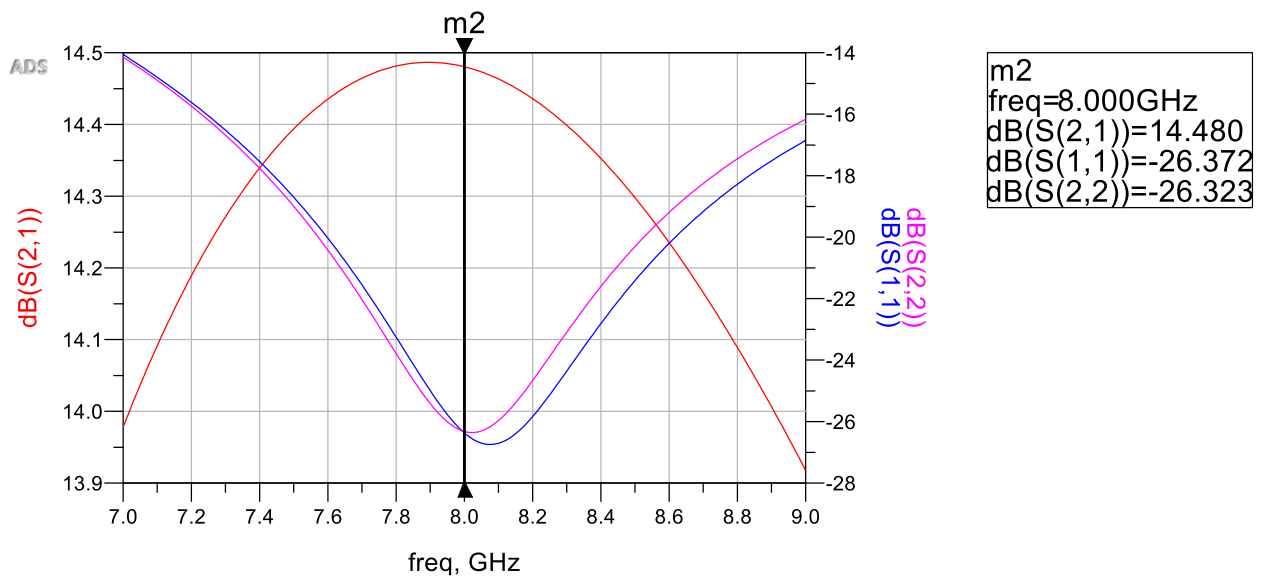
Уровень входной мощности должен быть в линейном участке (в примере -50 дБмВт). В качестве усилителя выбраны два одинаковых усилителя ($K_p = 15$ дБ, $P_{1dBOut} = 15$ дБмВт). Частота сигнала – соответствует той, на которую настроен двушлейфный НО.

Промоделируем в трех режимах:

1. В режиме S-параметров:

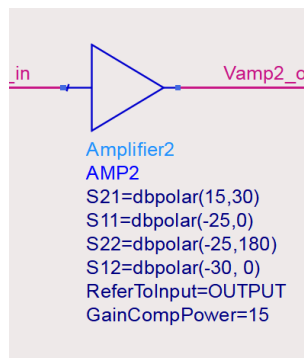


Результат

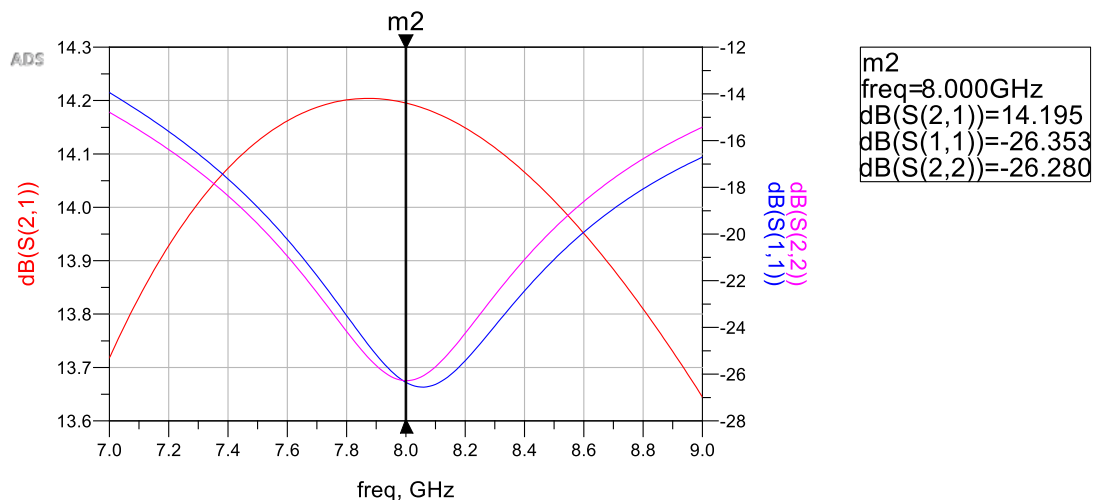


Видно, что коэффициент передачи равен 14,5 дБ – т.е. 15 дБ от усилителя с дополнительными потерями от идеальных –3 дБ на каждом двухшлейфном НО. Коэффициенты отражения разумные (-25..-20 дБ).

Введем у нижнего усилителя есть разбаланс по фазе (+30° к S21).

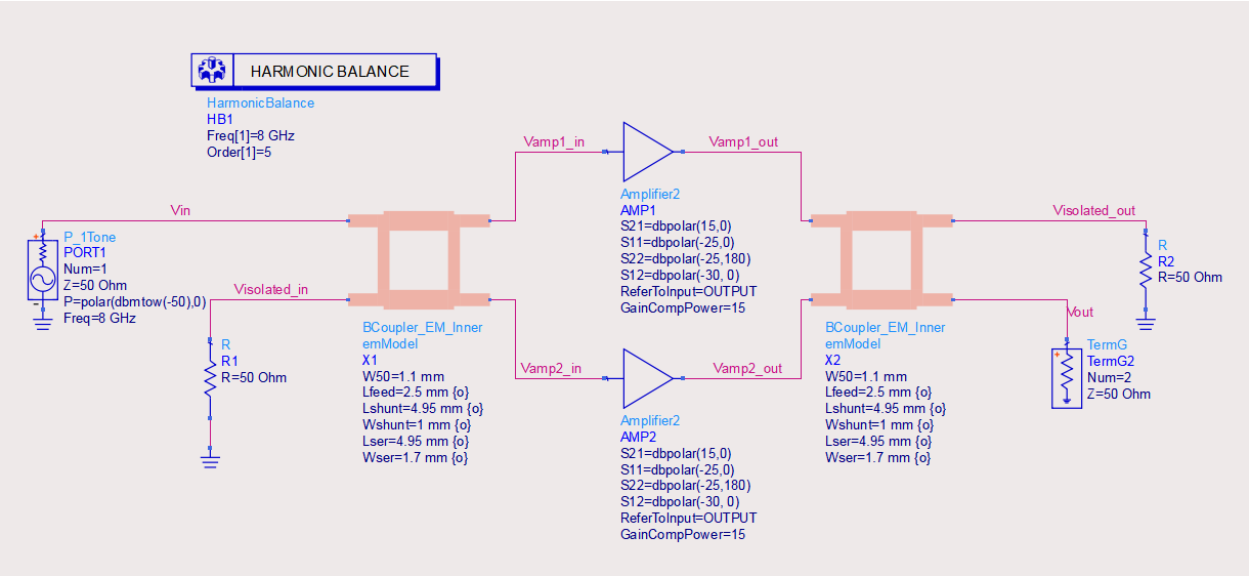


Результат уходит не сильно.



Но при большей разбалансировке фаз все может стать заметно хуже. Самостоятельно найдите такой разбаланс фаз усилителей, что применение такой схемы станет нецелесообразно.

2. В режиме НВ. Уберем разбаланс фаз усилителей.



Результат надо смотреть по несущей частоте 8 ГГц.

freq	dBm(Vin)	dBm(Vamp1_in)	dBm(Vamp2_in)	dBm(Vamp1_out)	dBm(Vamp2_out)	dBm(Vout)	dBm(Visolated_out)	dBm(Visolated_in)
0.0000 Hz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>
8.000 GHz	-49.972	-52.412	-53.188	-37.923	-38.610	-35.520	-56.359	-70.166
16.00 GHz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>
24.00 GHz	-226.975	-207.939	-201.802	-173.431	-170.283	-194.938	-193.101	-224.182
32.00 GHz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>
40.00 GHz	-398.897	-386.152	-403.466	-361.358	-365.543	-373.295	-369.498	-397.439

Входной сигнал был задан $V_{in} = -50$ дБмВт. При попадании на входы усилителей видны потери на входном двухшлейфном НО ($V_{amp1_in} = -52,4$ дБмВт и $V_{amp2_in} = -53,2$ дБмВт). После усилителей перед выходным двухшлейфном НО ($V_{amp1_out} = -37,9$ дБмВт и $V_{amp2_out} = -38,6$ дБмВт) видно усиление на них порядка +15 дБ. На выходе $V_{out} = -35,5$ дБмВт.

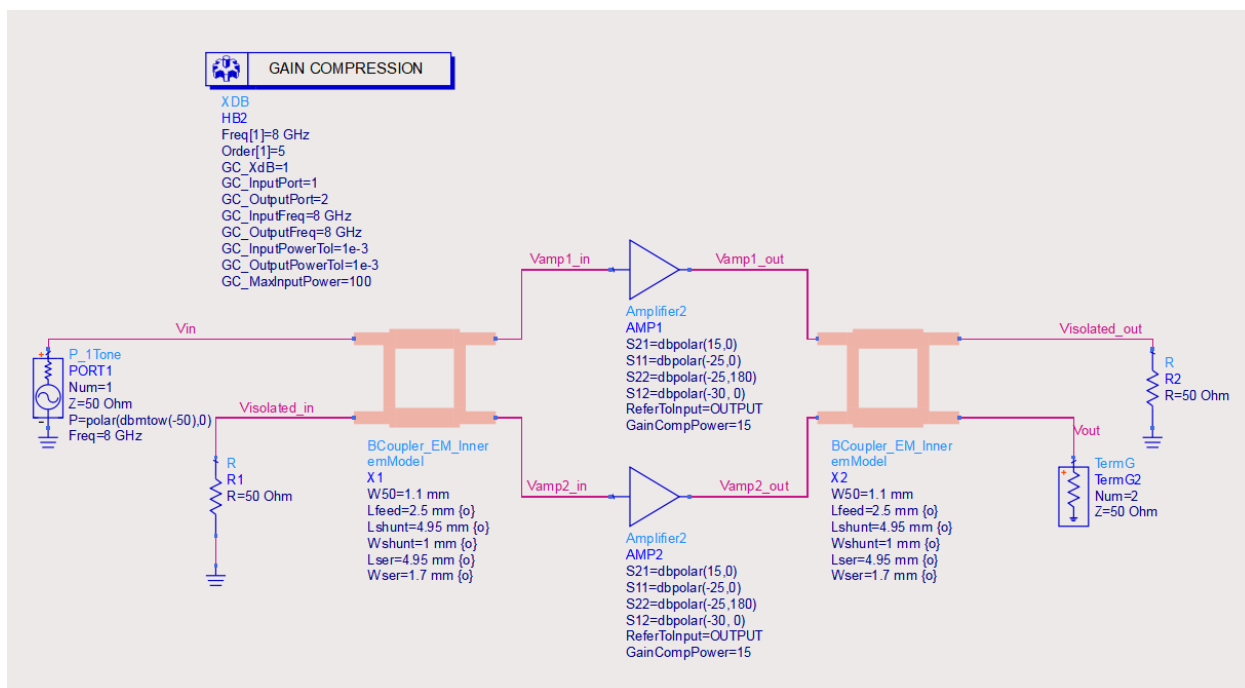
Т.е. коэффициент передачи всей схемы ($V_{out} - V_{in} = 14,5$ дБ), получается немного хуже, чем коэффициент усиления одиночного усилителя за счет потерь в двухшлейфных НО.

При этом в изолированные выходы не идет почти ничего ($Visolated_in$ и $Visolated_out$).

По фазовым соотношениям видно, что в верхнем и нижнем плечах есть сдвиг по фазе на 90° между собой.

freq	phase(Vamp1_in)	phase(Vamp2_in)
0.0000 Hz	0.000	0.000
8.000 GHz	174.337	81.828
16.00 GHz	0.000	0.000
24.00 GHz	86.781	72.649
32.00 GHz	0.000	0.000
40.00 GHz	-148.113	79.316

3. Определим точку однодецибелной компрессии.



Результат.

inpwr	outpwr
4.257 dBm	17.74 dBm

Суммарная точка однодецибелной компрессии по выходу $P_{1dBOut} = 17,8$ дБмВт — приблизительно +3 дБ относительно однодецибелной компрессии по выходу одиночного усилителя (+15 дБмВт).

Самостоятельно по исследуйте, что будет с суммарной точкой однодецибелной компрессии при разбалансе фаз усилителей.

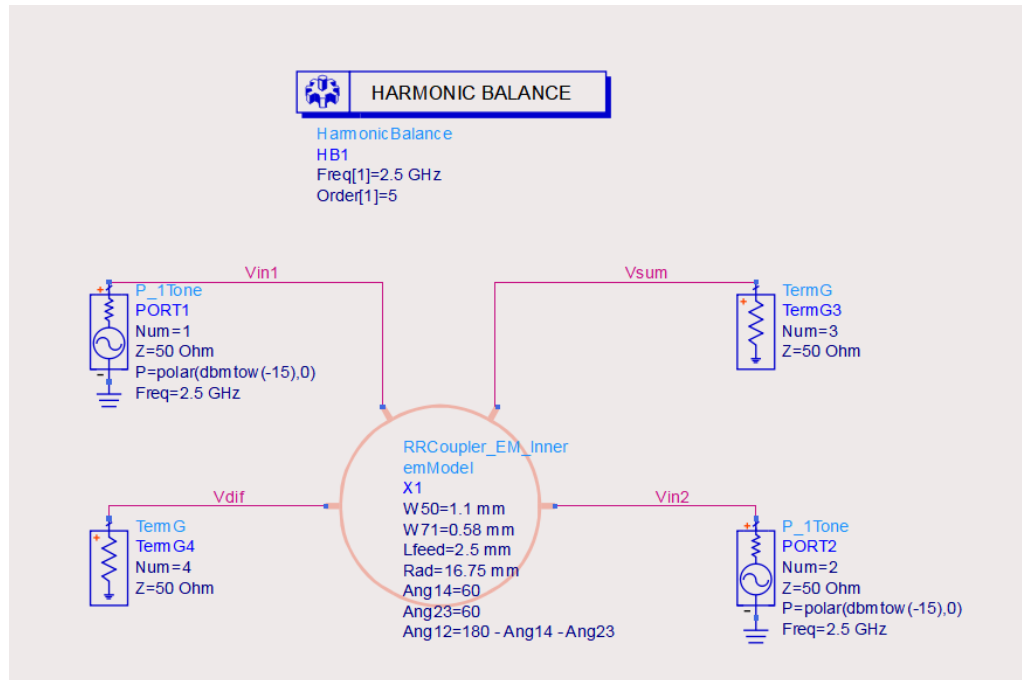
Таким образом, использование двушлейфного направленного ответвителя для параллельного суммирования мощностей позволяет достичь предельно в два раза (минус потери на двушлейфном НО) большей выходной мощности. При этом коэффициент передачи соответствует коэффициенту передачи одиночного усилителя мощности (минус потери на двушлейфном НО). Однако, необходимо сохранять приемлемый разбаланс фаз между усилителями.

Применение такой схемы возможно и для большего количества параллельных плеч.

Использование кольцевого направленного ответвителя

Кольцевой направленный ответвитель часто используется для создания суммарно-разностного сигнала, в том числе для балансных схем смесителей.

1. Проверим сначала при подаче одинаковых сигналов (по -15 дБмВт, без сдвига по фазе).

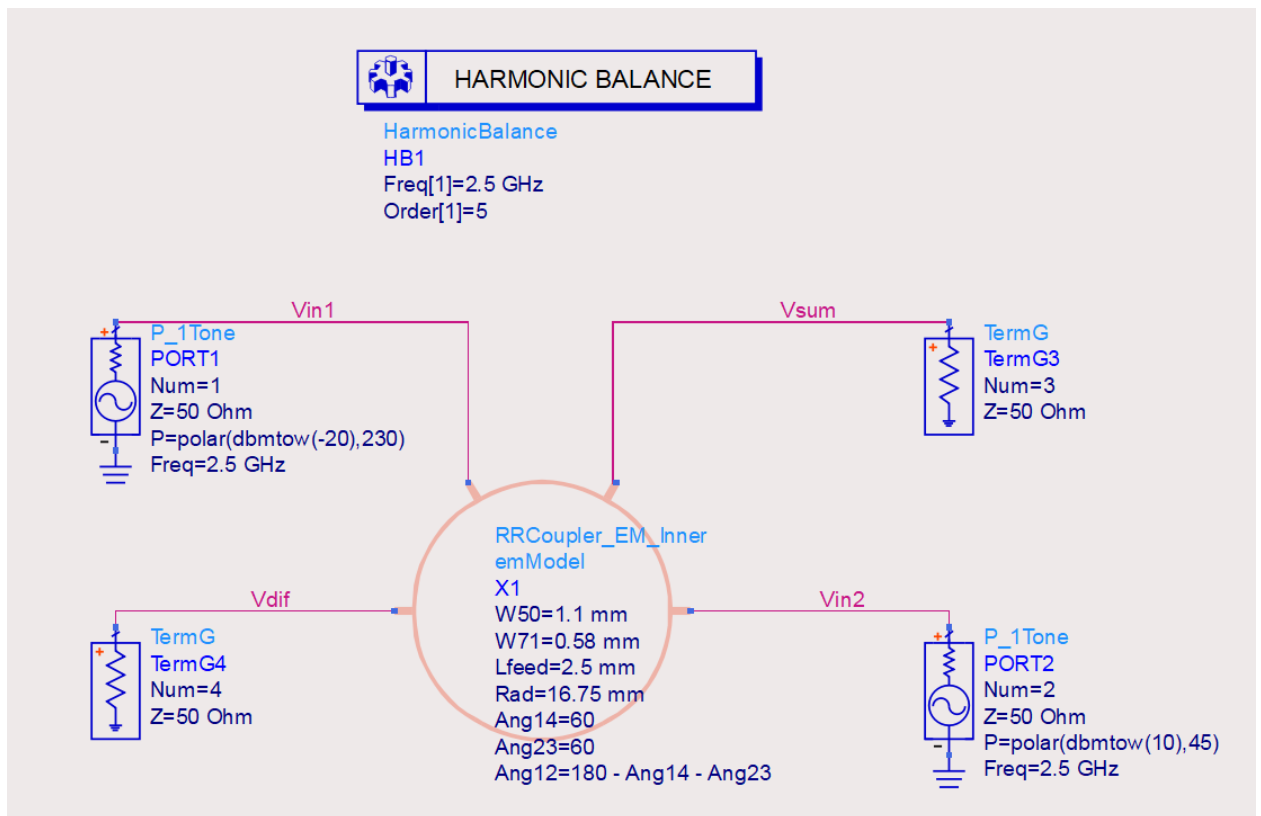


Результат.

freq	dBm(Vin1)	dBm(Vin2)	dBm(Vsum)	dBm(Vdif)
0.0000 Hz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>
2.500 GHz	-15.007	-14.991	-12.025	-57.411
5.000 GHz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>
7.500 GHz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>
10.00 GHz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>
12.50 GHz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>

На суммарный выход V_{sum} приходит -12 дБмВт (сумма входных мощностей -15 дБмВт). На разностный вывод V_{diff} почти ничего не идет.

2. Посмотрим на созвездие при типовой работе в смесителях – от опорного генератора поступает сигнал фиксированной мощности (пусть P на входе $V_{in2} = 10$ дБмВт, с некоторой случайной начальной фазой, пусть будет 45°), от ВЧ-входа смесителя – значительно более малого уровня (P на входе $V_{in1} = -20$ дБм, со случайной начальной фазой 230°).



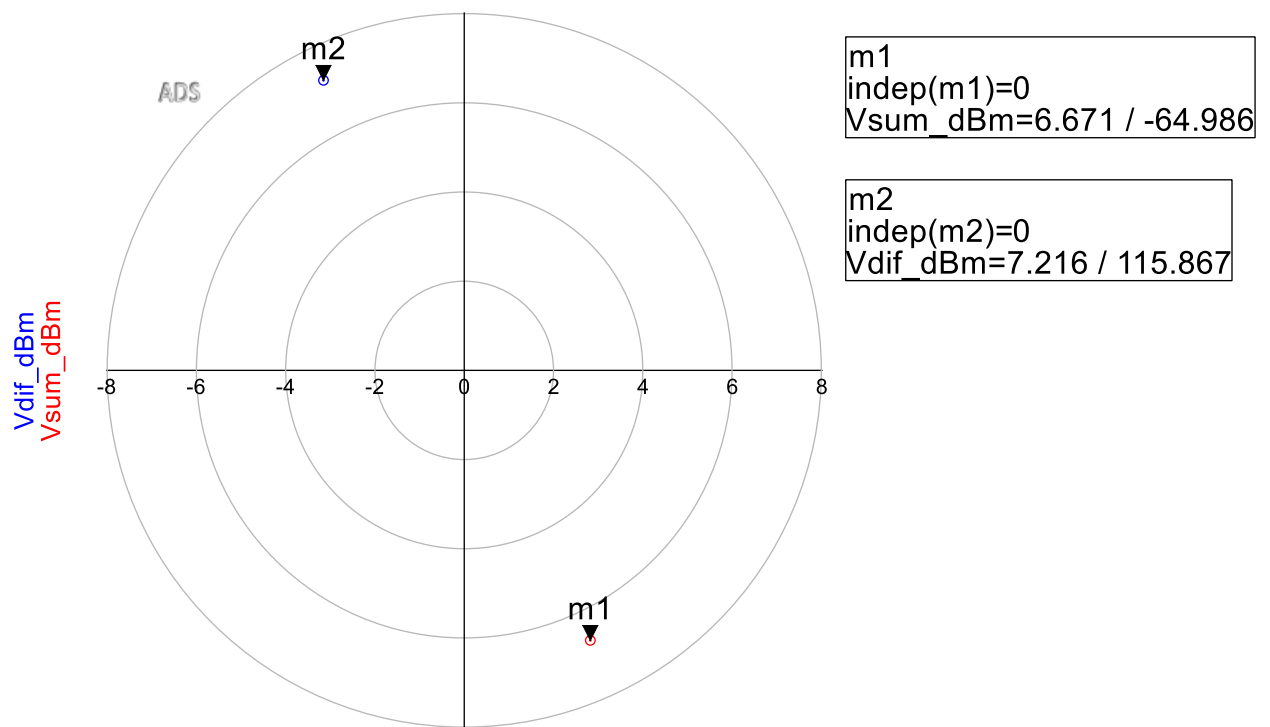
Изобразим созвездия на частоте 2,5 ГГц. Для получения данных в формате дБмВт/град для гармоник 1 (фундаментальная частота) используем выражения.

$$\text{Eqn} \text{ Vsum_dBm} = \text{polar}(\text{dBm}(\text{Vsum}[1]), \text{phase}(\text{Vsum}[1]))$$

$$\text{Eqn} \text{ Vdif_dBm} = \text{polar}(\text{dBm}(\text{Vdif}[1]), \text{phase}(\text{Vdif}[1]))$$

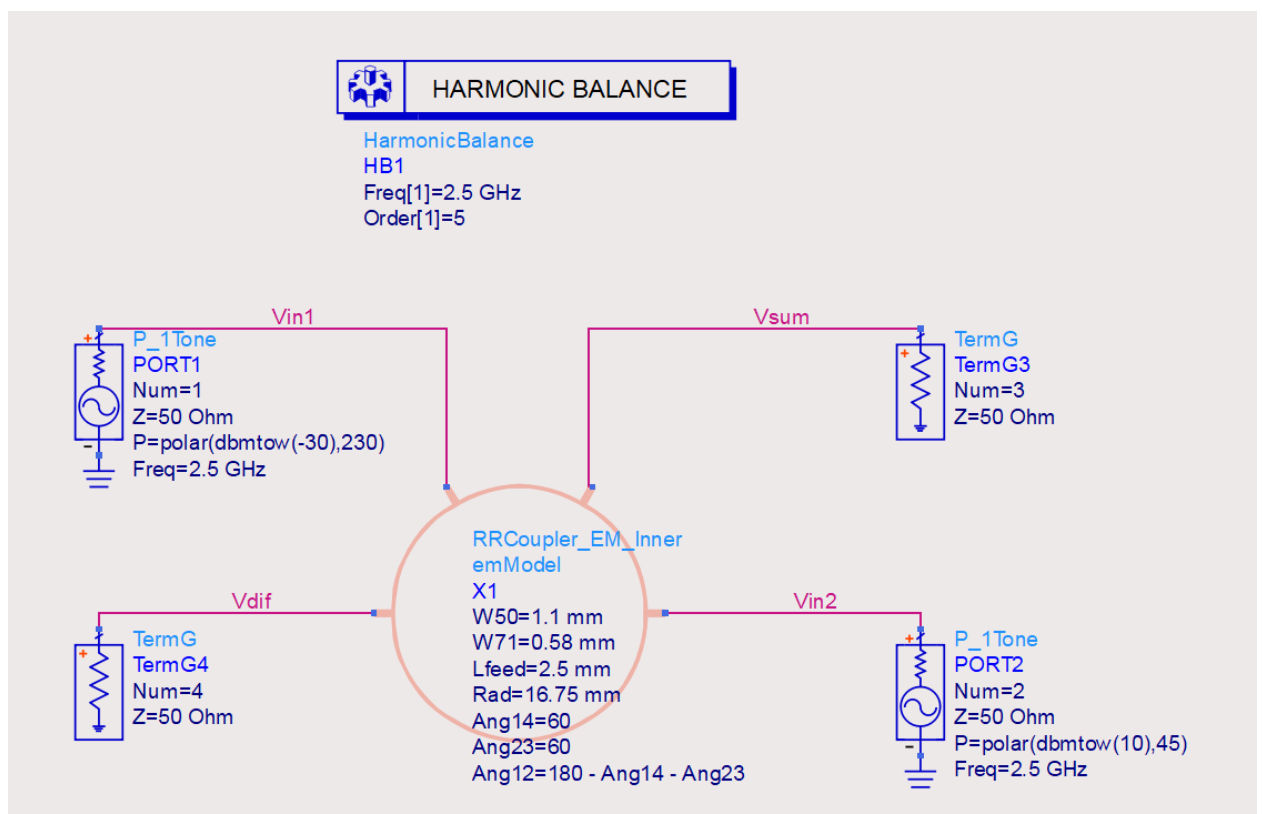
Отобразим их на полярном графике.

* Данный прием отображения в ADS корректно работает только с положительными по амплитуде значениями, т.к. полярный график не умеет работать с амплитудой в логарифмическом масштабе (т.е. сжимать центр к $-\infty$).

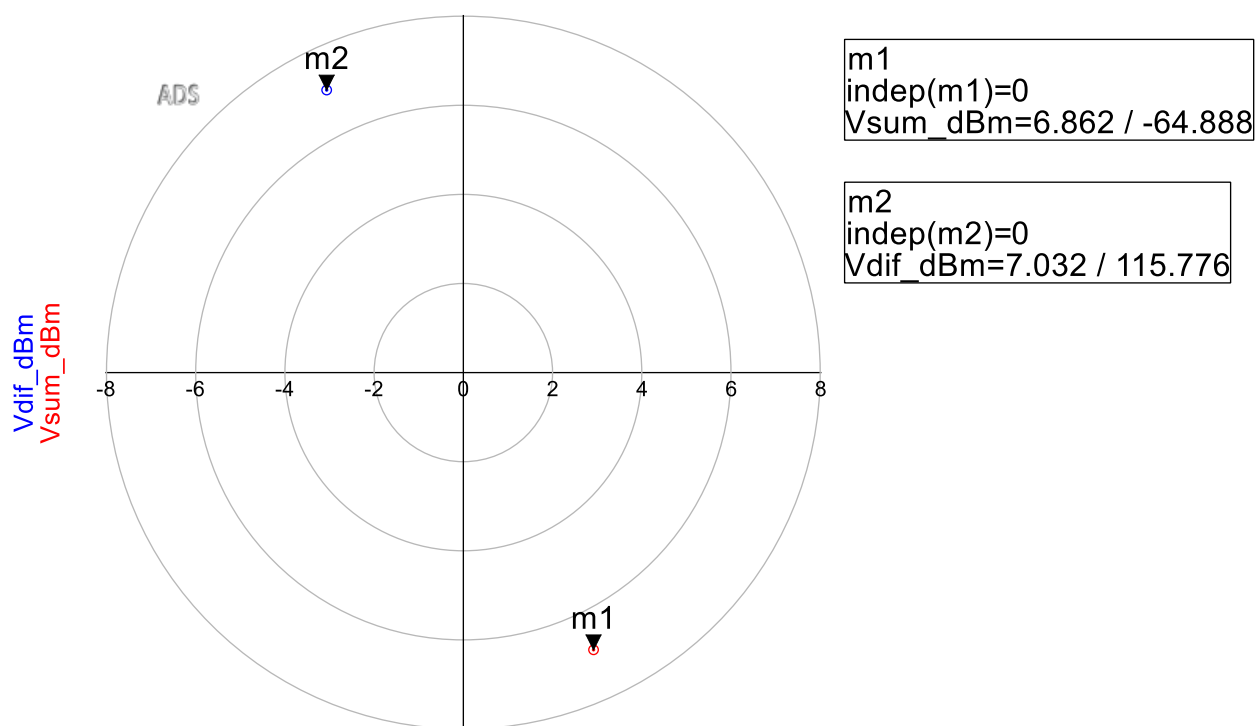


Видно, что суммарный и разностный сигнал незначительно различаются по амплитуде и практически противоположны по фазе.

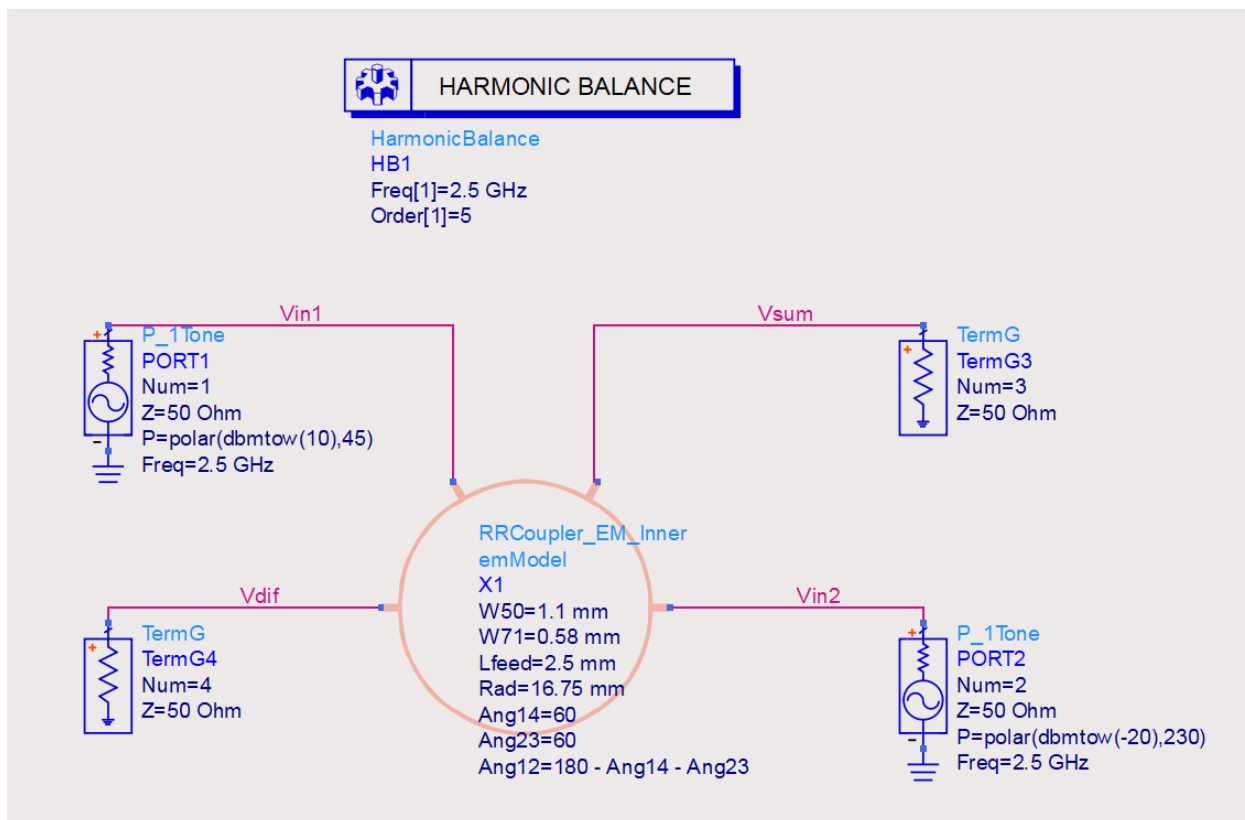
Уменьшим еще входной сигнал (V_{in1} до -30 дБмВт).

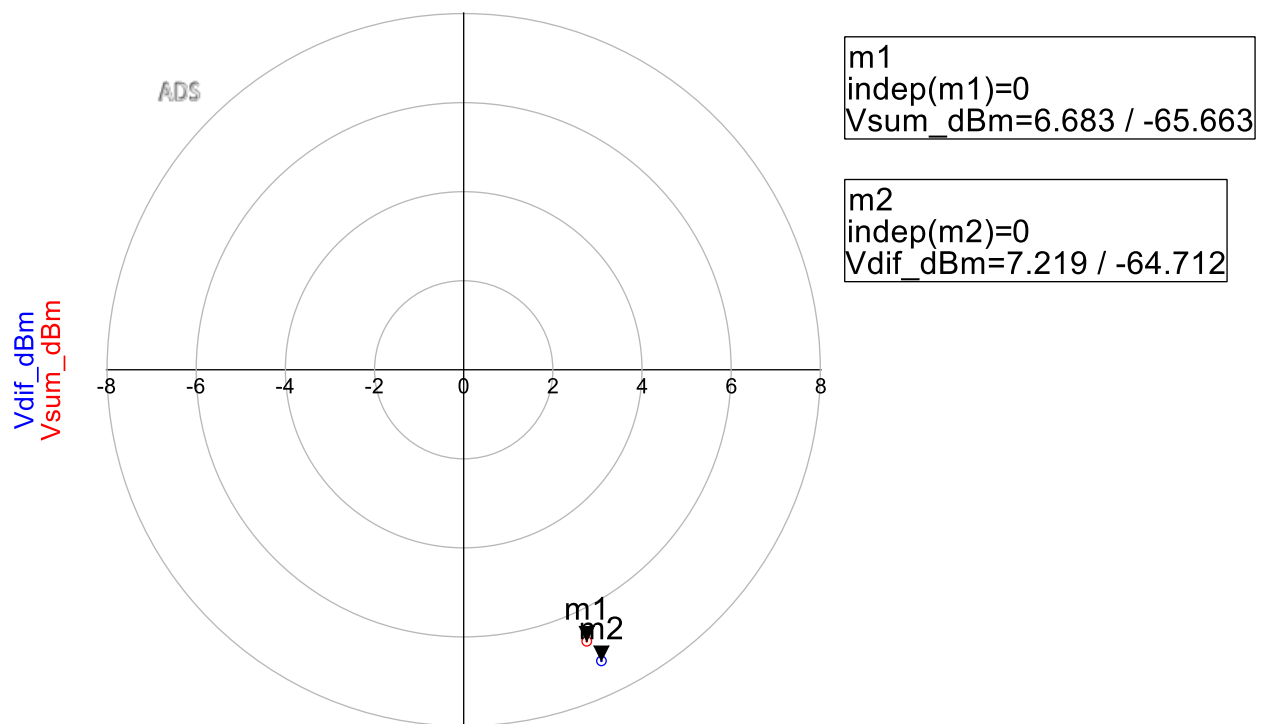


Суммарно-разностный сигнал станет еще более симметричным.



3. Поменяем местами сигналы на входах Vin1 и Vin2.





V_{sum} и V_{diff} практически сливаются. Попробуйте объяснить увиденное и исходя из двух предыдущих результатов определить, как правильно нужно подавать сигнал опорного генератора и входной ВЧ-сигнал для получения суммарно-разностного сигнала.

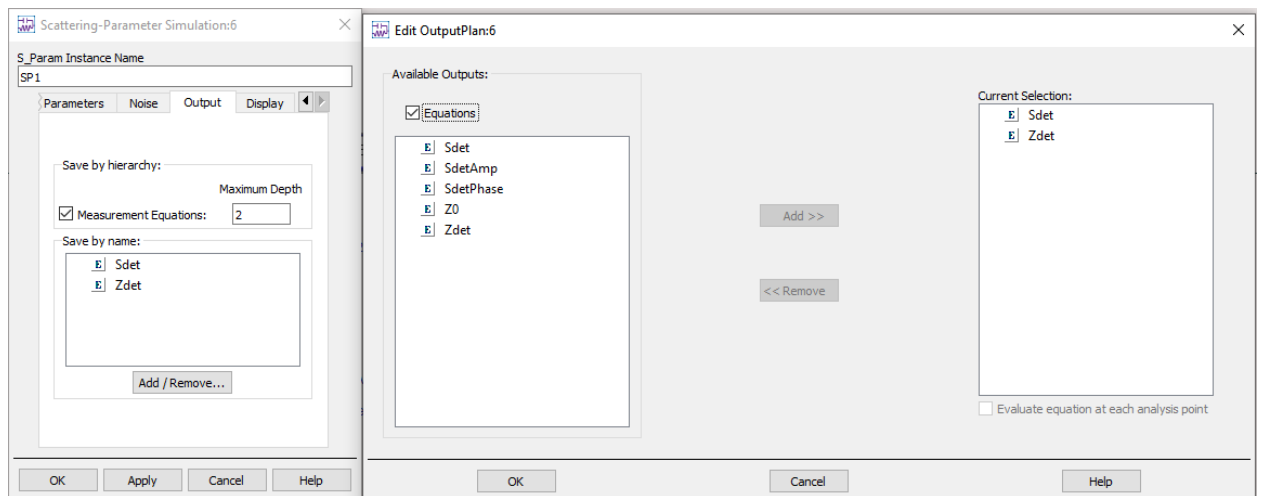
Использование направленного ответвителя на связанных линиях

Построим модель для использования направленного ответвителя на связанных линиях как устройства ответвления мощности из основного канала в детектор мощности и исследуем, как на него влияет рассогласованность детектора мощности.

Сweepать будем коэффициент отражения детектора мощности в пределах некоторого радиуса коэффициента отражения S_{detAmp} (пусть до 0,5). Фазу $S_{detPhase}$ прогоним во всей окружности (от 0° до 360°). Шаг свипов пока установим приблизительно, потом при анализе результатов будет видно, нужно ли его уточнять или угрублять (для получения понятных картинок).

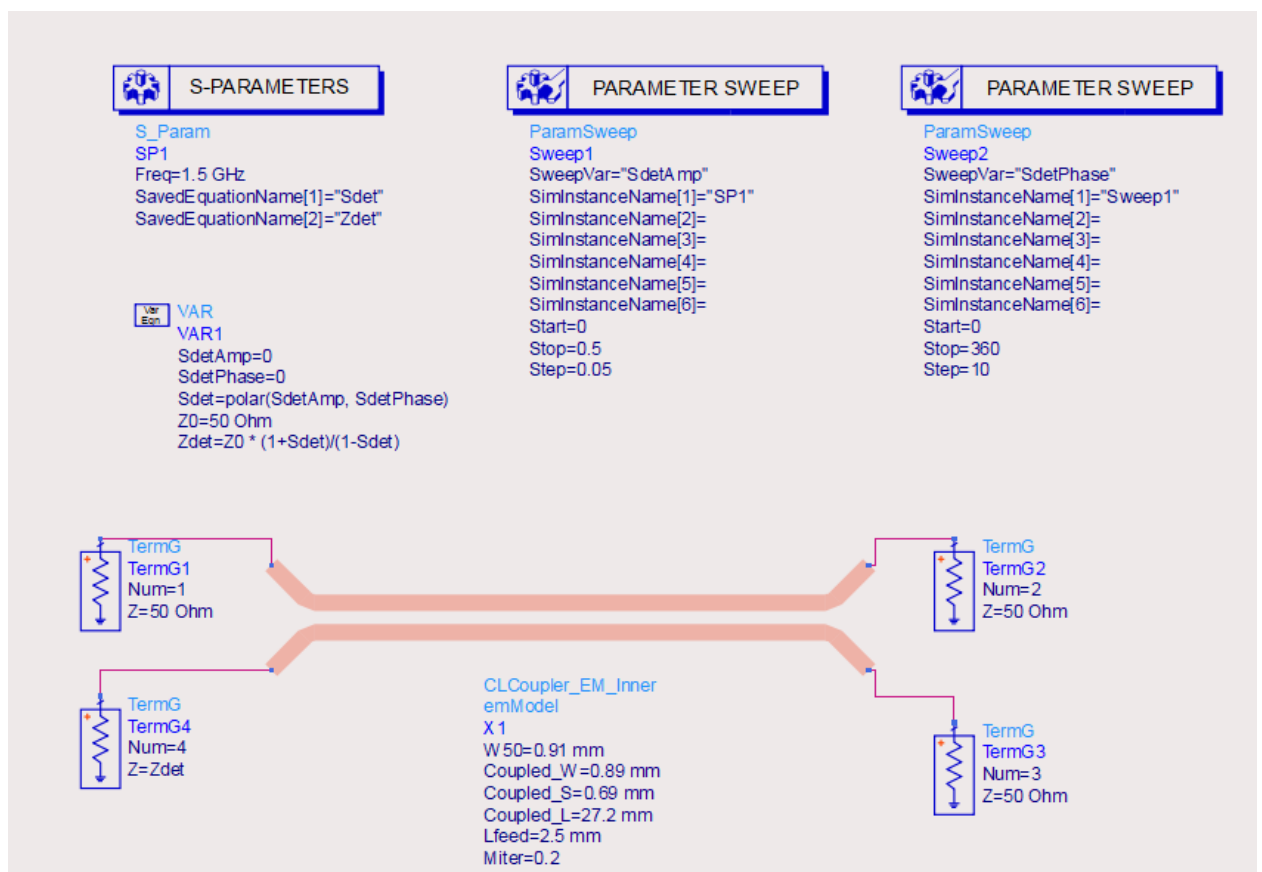
S_{detAmp} и $S_{detPhase}$ собираются в комплексный коэффициент отражения S_{det} , который в свою очередь, пересчитывается в импеданс Z_{det} . Импеданс Z_{det} подставляется в импеданс терминатора 4, имитирующего детектор мощности.

Для использования в выражениях пробросим значения переменных Sdet и Zdet в датасет (вкладка Output контроллера симуляции SP1).



Иерархия свипов Sweep2 (SdetPhase) → Sweep1 (SdetAmp) → SP1 (расчет на одной частоте 1,5 ГГц).

Общий вид схемы.



После моделирования для удобства, определим выражения вида $S_{xx_dB} = S(x, x)[::, ::, 0]$ для коэффициента отражения S11, рабочего затухания S21, переходного ослабления S41 и развязки S31. Нужно это для того, чтобы в

результатах убрать зависимость от индекса частоты (в данном случае он равен 0).

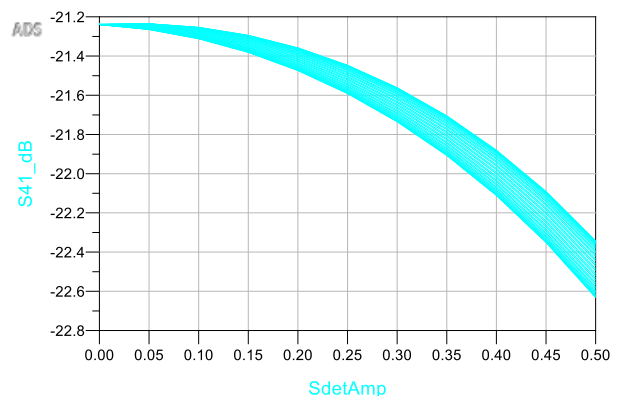
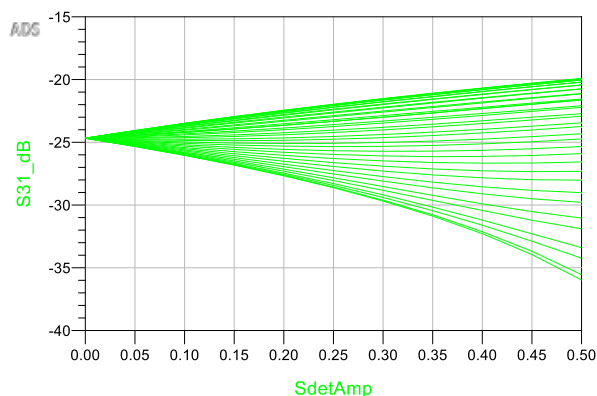
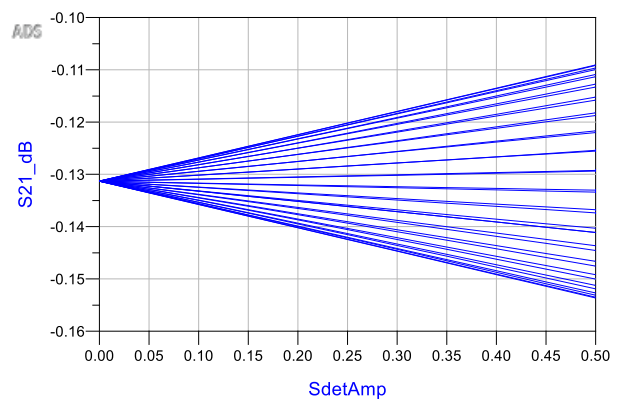
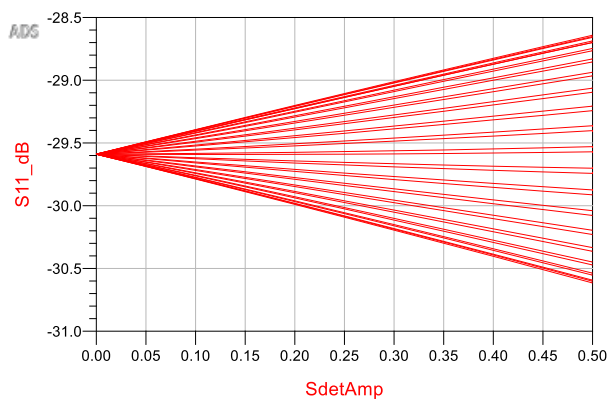
$$\text{Eqn } S_{11_dB} = \text{dB}(S(1,1)[::, ::, 0])$$

$$\text{Eqn } S_{21_dB} = \text{dB}(S(2,1)[::, ::, 0])$$

$$\text{Eqn } S_{31_dB} = \text{dB}(S(3,1)[::, ::, 0])$$

$$\text{Eqn } S_{41_dB} = \text{dB}(S(4,1)[::, ::, 0])$$

Выведем их на прямоугольные графики для предварительного анализа. Т.к. присутствует зависимость от двух независимых переменных SdetAmp и SdetPhase, то отобразятся семейства графиков.



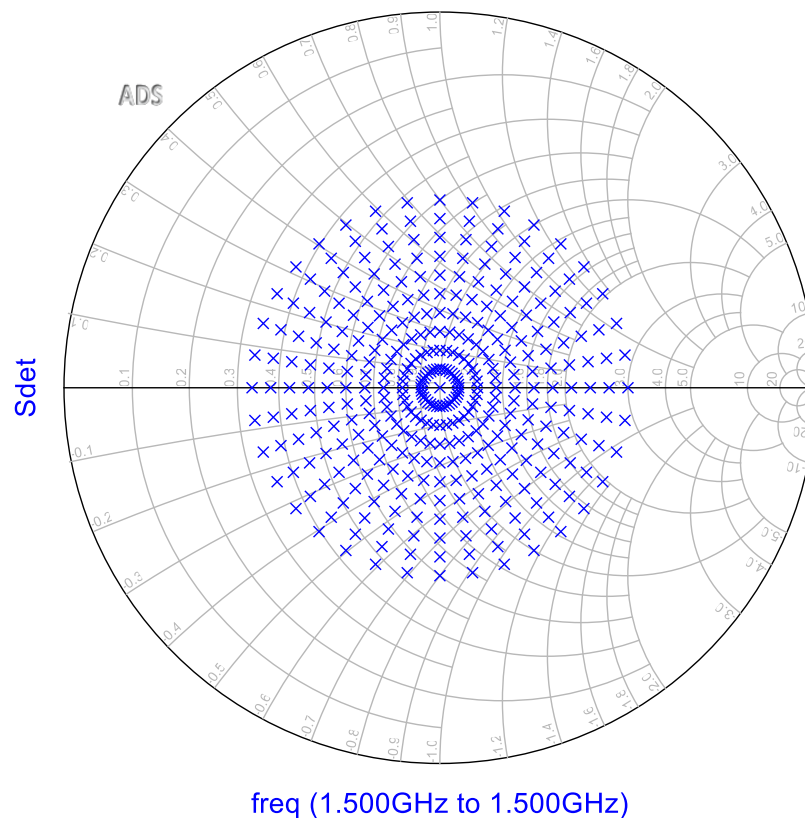
По результатам видно, что:

- коэффициент отражения S_{11} сохраняется отличным, не более $-28,5$ дБ;
- рабочее затухание S_{21} отличное и практически не меняется;

- развязка S31 меняется довольно сильно, но на этом выходе в исследуемом применении обычно находится согласованная нагрузка и поэтому на способность НО на связанных линиях работать как устройства ответвления сигнала в детектор не влияет;

- переходное ослабление S41 меняется от -22,6 дБ до -21,2 дБ – это уже серьёзно и необходимо отдельно по исследовать, и возможно, определить ограничения на импеданс детектора.

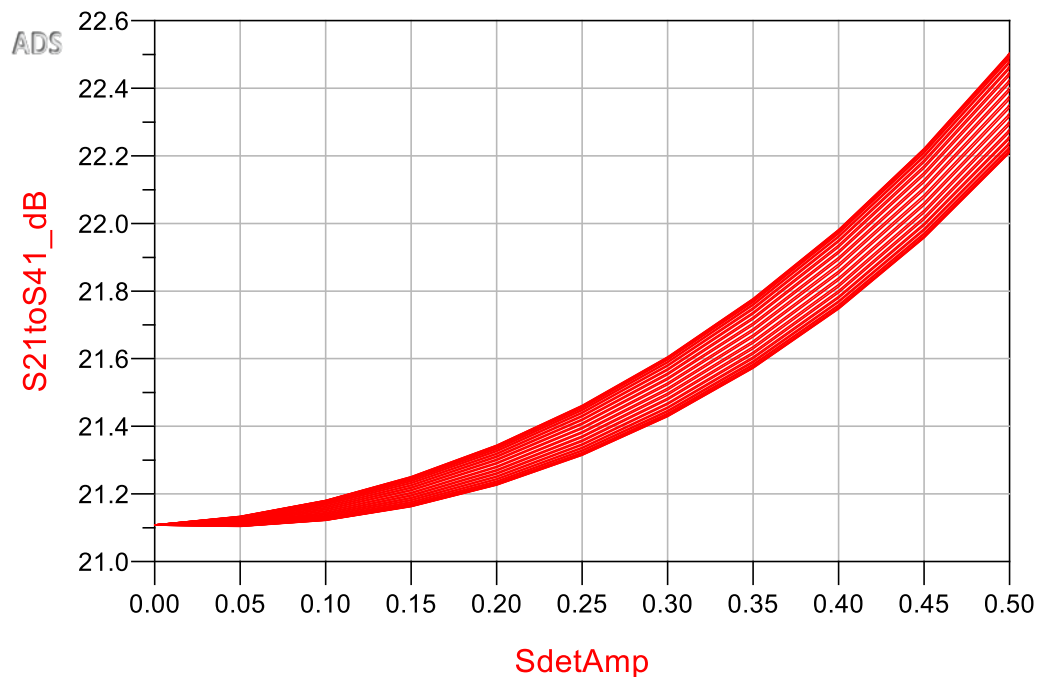
Дополнительно выведем Sdet на отдельную диаграмму Смита, чтобы видеть, при каких диапазонах Sdet проводилось моделирование.



Переходное ослабление в применении НО на связанных линиях как устройства детектирования само по себе не всё говорит о качестве работы. Обычно интересует значение уровня выходного сигнала с учетом рабочего затухания. Т.е. более информативна направленность S21/S41, показывающая отношение выходного сигнала к ответвленному. По исследуем ее с помощью контуров постоянного уровня на диаграмме Смита.

Определим S21toS41 на фиксированной частоте и отобразим на прямоугольном графике для предварительного анализа.

$$\text{EqnS21toS41_dB} = \text{dB}(\text{S21}[:, :, 0]/\text{S41}[:, :, 0])$$



Видно, что направленность меняется в диапазоне от 21,1 дБ до 22,5 дБ. Введем необходимые переменные для использования функции `contour_polar()`

$$\text{EqnS21toS41_Step}=0.1$$

$$\text{EqnInterpMode} = 2$$

$$\text{EqnS21toS41_Min}=21.1$$

$$\text{EqnS21toS41_Max}=22.5$$

$$\text{EqnS21toS41_Levels}=[\text{S21toS41_Min}::\text{S21toS41_Step}::\text{S21toS41_Max}]$$

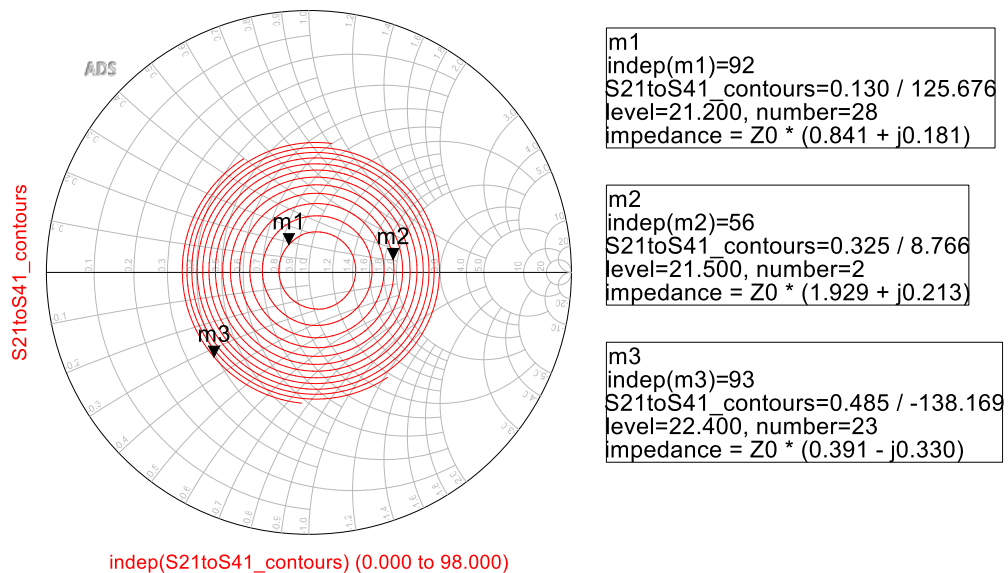
Нужно задать желаемые уровни для отображения (связка `_Min`, `_Max`, `_Step` и `_Levels`). Также задается вид интерполяции `InterpMode = 2` (кубическая).

Т.к. независимые переменные формируют комплексный коэффициент отражения как амплитуда и фаза, то вид исходных данных является “MA”.

Формируем контура

$$\text{EqnS21toS41_contours}=\text{contour_polar}(\text{S21toS41_dB}, \text{S21toS41_Levels}, \text{InterpMode}, \text{"MA"})$$

Отообразим их на диаграмме Смита.



Видно, что до определенного уровня согласованности детектора мощности, направленность стабильна и сохраняется около 21,2 дБ. При большей рассогласованности видно, что направленность уходит до 22,4 дБ, что сильно отличается от целевого значения.

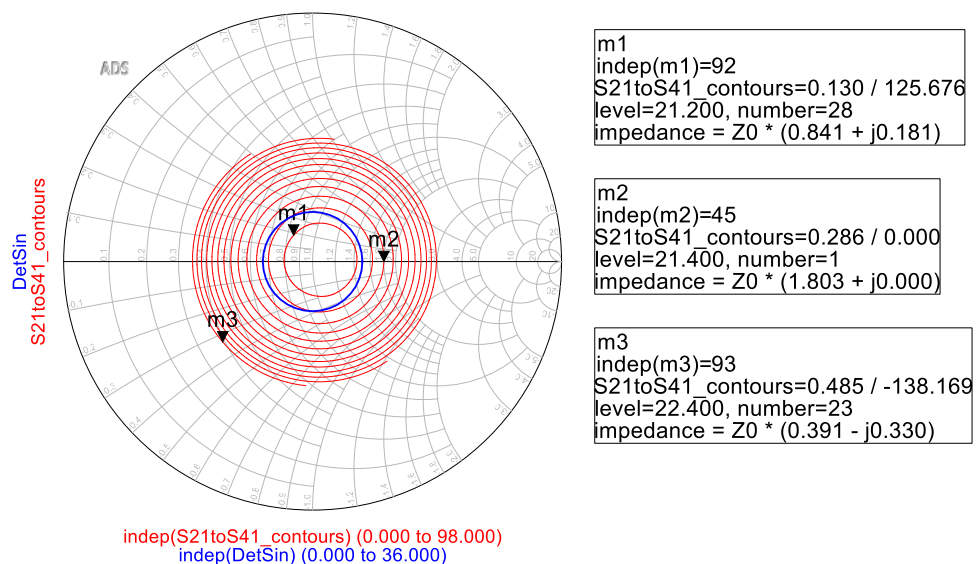
Добавим простую цепочку выражений, для того, чтобы определить, до какого КСВН нужно согласовать детектор мощности. Исходя из желаемого КСВН детектора DetVSWR будет отображаться круг соответствующего коэффициента отражения DetSin.

$$\text{EqnDetVSWR} = 1.5$$

$$\text{EqnDetSinAmp} = (\text{DetVSWR} - 1) / (\text{DetVSWR} + 1)$$

$$\text{EqnDetSin} = \text{polar}(\text{DetSinAmp}, [0::10::360])$$

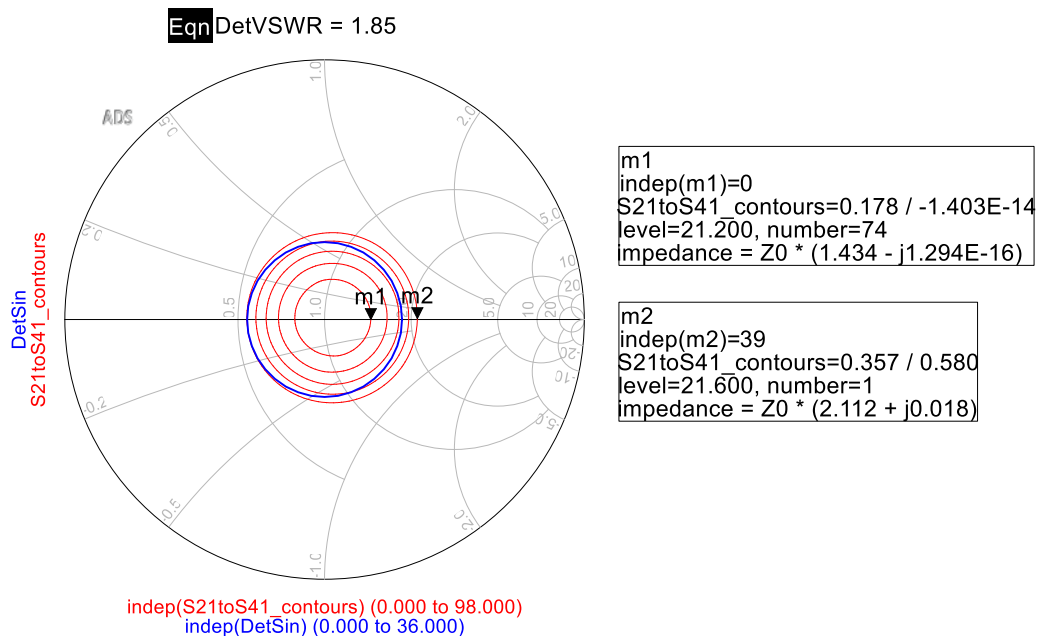
И отобразим на диаграмме Смита с контурами.



Пусть мы зафиксируем требование, что направленность не должна отличаться от номинальной 21,1 дБ более чем на 0,5 дБ. С использованием выражения $S_{21toS41_Max} = 21,6$ обрежем отображаемые контура.

$$\text{Eqn } S_{21toS41_Max}=21.6$$

Т.к. уровни контуров идут от минимума к максимуму наружу, то надо найти такое максимальное значение КСВН детектора, при котором круг постоянного КСВН он не выходит за пределы контура уровня 21,6. Найденное значение КСВН детектора 1,85.



Отсюда можно сделать вывод, что на центральной частоте нужно согласовать детектор мощности на 50 Ом так, чтобы его КСВН не превышало 1,85. Тогда ошибка детектирования выходной мощности не будет превышать 0,5 дБ.

Также визуально видно, что центр контуров немного смещен относительно центра диаграммы Смита. Попробуйте объяснить почему так получается и как это можно использовать.

В данном анализе считается, что у детектора идеальная линейная кривая детектирования, что, естественно, у реальных устройств не так. Также надо учитывать, что входной импеданс детектора мощности меняется при разных уровнях входной мощности.

Использование кольцевого развязанного делителя мощности

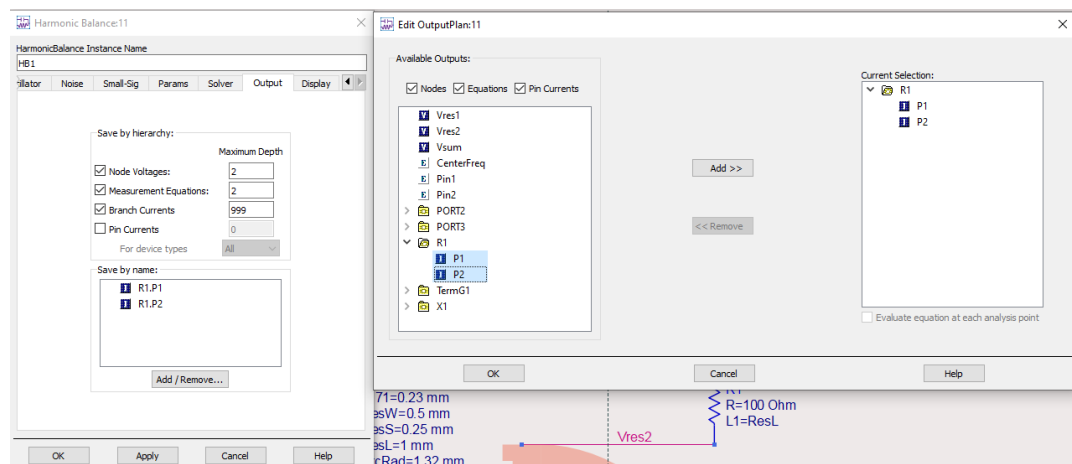
Поисследуем кольцевой развязанный делитель мощности в роли устройства сложения сигналов.

1. Исследование разбаланса амплитуд.

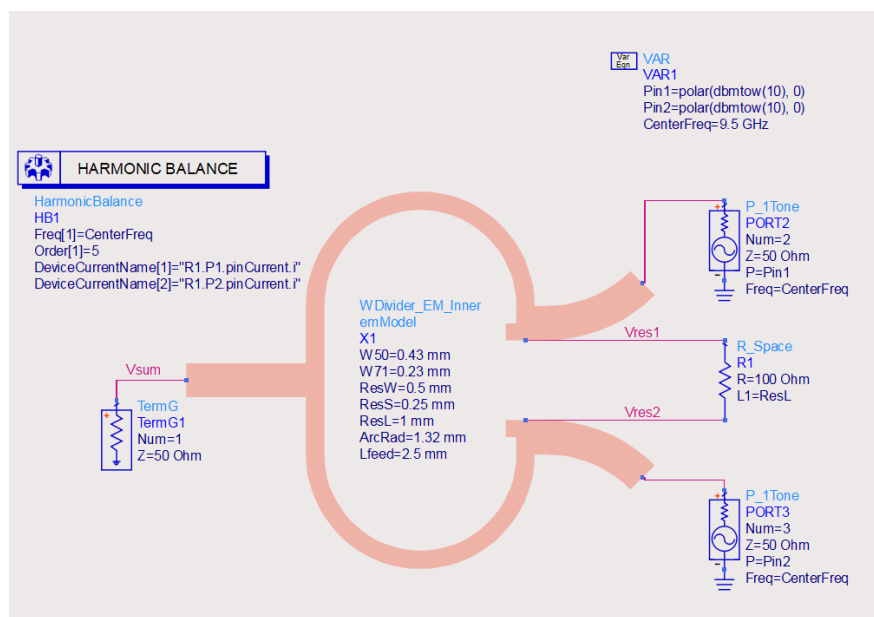
Подавать сигналы будем с портов типа P_1Tone, для первой прикидки по 10 дБмВт без сдвига по фазе. Задавать входные сигналы будем с помощью переменных $\text{Pin1} = \text{Pin2} = \text{polar}(\text{dbmtow}(10), 0)$. В дальнейшем при исследовании будем менять только эти переменные.

Для определения мощности, рассеиваемой на резисторе, нужно знать падение напряжения на нем и ток, протекающий через него.

Для передачи в датасет значений токов, протекающих через резистор, добавим токи, протекающие через выходы резистора.



Общий вид схемы перед моделированием.



По результатам моделирования рассчитаем рассеиваемую на резисторе мощность.

Номер интересующей частоты – 1 (следует из таблицы freq)

freq
0.0000 Hz
9.500 GHz
19.00 GHz
28.50 GHz
38.00 GHz
47.50 GHz

Ток, протекающий через резистор на частоте 9,5 ГГц Res_I – это или P1.pinCurrent.i[1] или P2.pinCurrent.i[1]. Падение напряжения Res_V = Vres[1] – Vres2[1]

$$\text{Eqn} \text{ Res_I} = \text{P1.pinCurrent.i[1]}$$

$$\text{Eqn} \text{ Res_V} = \text{Vres1[1]} - \text{Vres2[1]}$$

Т.к. ток и падение напряжения даны для гармонического сигнала, то рассеиваемая мощность PDiss_W равна

$$\text{Eqn} \text{ PDiss_W} = \text{mag}(\text{Res_I} * \text{Res_V})/2$$

Также для удобства пересчитаем в дБмВт:

$$\text{Eqn} \text{ PDiss_dBm} = \text{wtodbm}(\text{PDiss_W})$$

Дополнительно определим выражение для выходной мощности на первой гармонике в дБмВт и в Вт

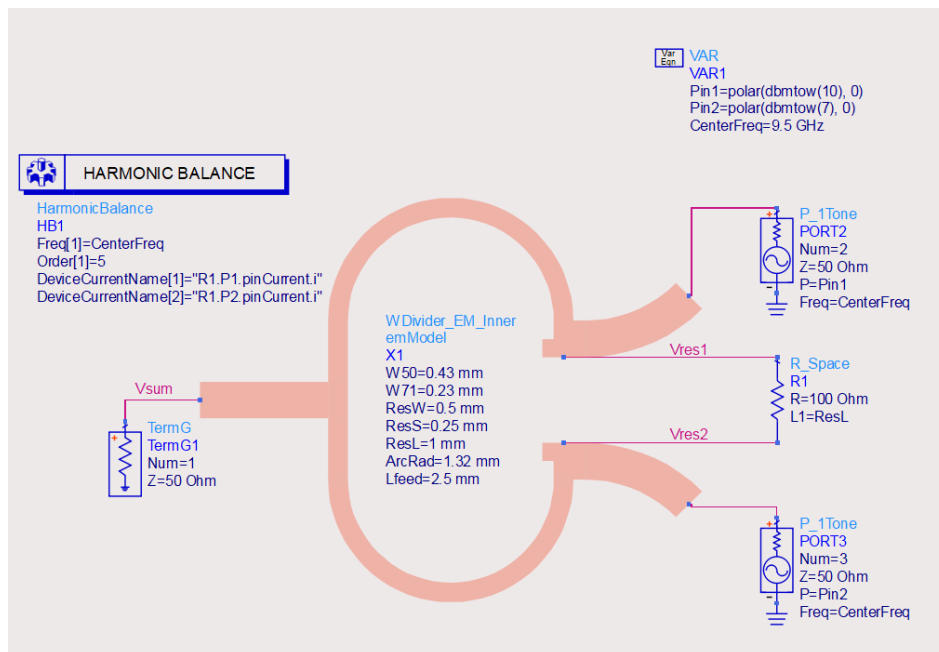
$$\text{Eqn} \text{ PSum_dBm} = \text{dBm}(\text{Vsum[1]})$$

$$\text{Eqn} \text{ PSum_W} = \text{dbmtow}(\text{PSum_dBm})$$

Видно, что при симметричных сигналах практически вся мощность идет на выход и ничего не рассеивается на развязывающем резисторе.

PDiss_W	PDiss_dBm	PSum_dBm	PSum_W
66.32 f	-101.8	12.92	19.59 m

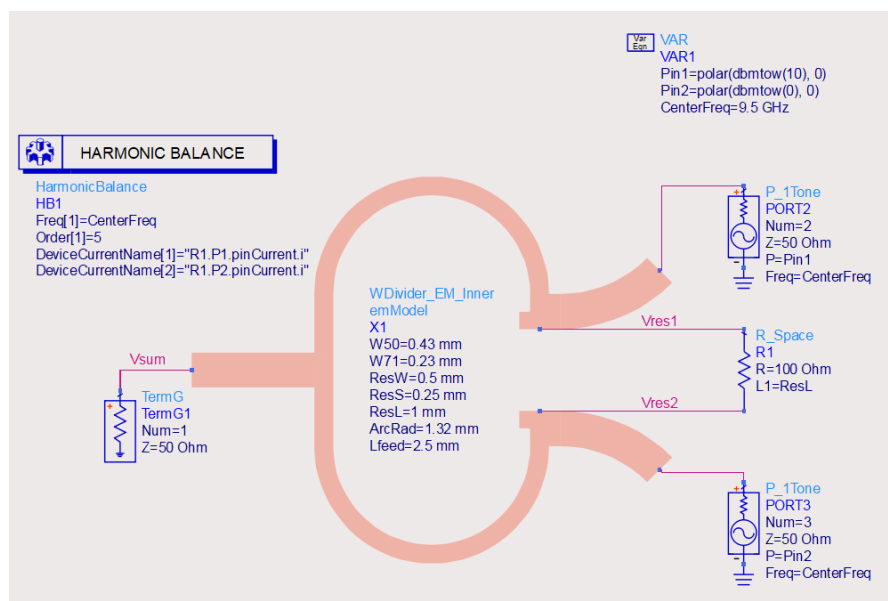
Введем разбаланс амплитуд. Уменьшим на одном из каналов мощность в два раза (Pin2 = 7 дБмВт).



PDiss_W	PDiss_dBm	PSum_dBm	PSum_W
424.2 u	-3.725	11.55	14.29 m

Видно, что суммарная выходная мощность 14,3 мВт незначительно отличается от суммы входных мощностей ($5 + 10 = 15$ мВт). И некоторая пока крайне незначительная часть мощности (400 мкВт) теперь рассеивается на резисторе.

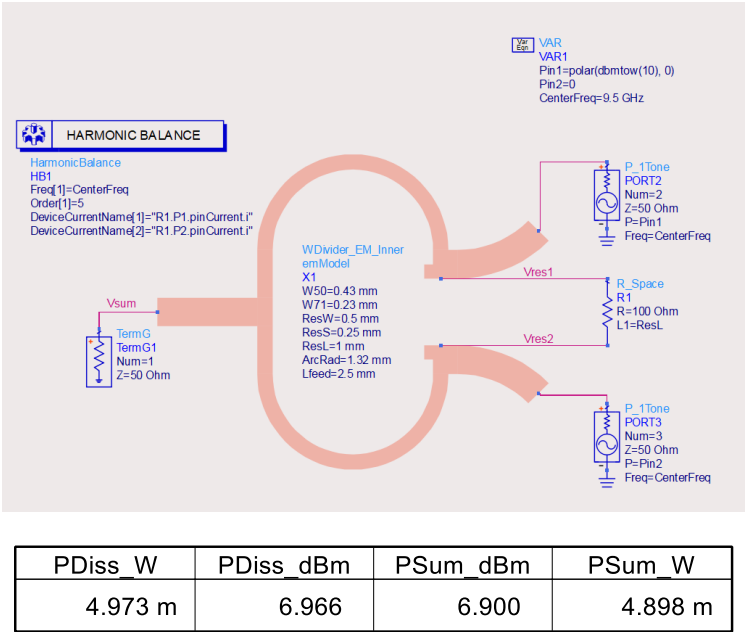
Пусть разбаланс амплитуд будет еще хуже, мощность на втором канале в 10 раз меньше, чем в первом ($\text{Pin2} = 0$ дБмВт).



PDiss_W	PDiss_dBm	PSum_dBm	PSum_W
2.325 m	3.664	9.287	8.486 m

Теперь суммарная выходная мощность 8,5 мВт серьезно отличается и меньше не только суммы входных мощностей ($1 + 10 = 11$ мВт), но и даже мощности с большего канала (10 мВт). Разница между суммой входных мощностей и суммарной выходной мощностью рассеивается на резисторе (2,3 мВт).

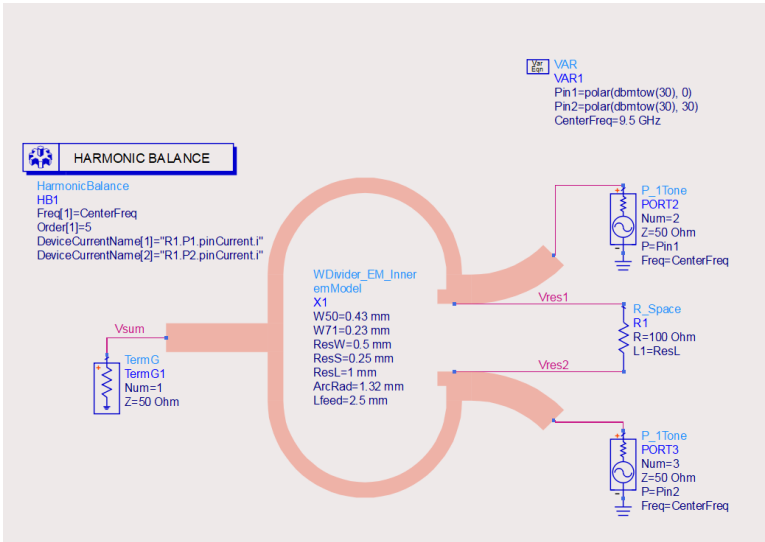
Окончательно отключим один канал (Pin2 = 0).



Выходная мощность 5 мВт равна половине входной мощности от первого канала (10 мВт), при этом вторая половина рассеивается на резисторе (5 мВт).

1. Исследование разбаланса фаз.

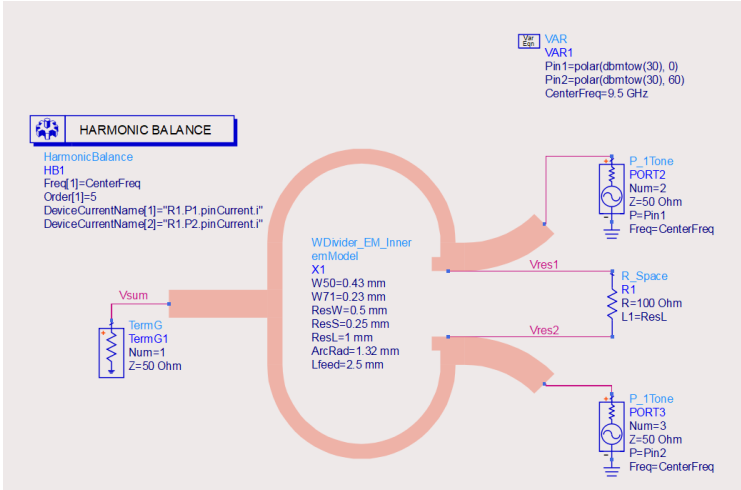
Поисследуем, как влияет разбаланс фаз при суммировании равных мощностей. Пусть на входы приходят два сигнала по 1 Вт с разностью фаз 30° .



PDiss_W	PDiss_dBm	PSum_dBm	PSum_W
133.3 m	21.25	32.62	1.828

Как и ожидаемо, что суммарная выходная мощность 1,83 Вт меньше суммы входных мощностей (1 + 1 = 2 Вт). Часть мощности (130 мВт) рассеивается на резисторе.

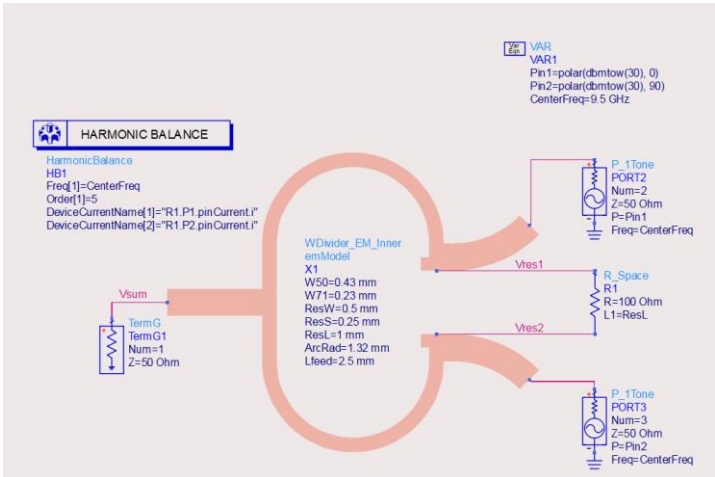
Установим разбаланс фаз в 60°.



PDiss_W	PDiss_dBm	PSum_dBm	PSum_W
497.3 m	26.97	31.67	1.469

Суммарная выходная мощность 1,5 Вт меньше суммы входных мощностей (1 + 1 = 2 Вт). Четверть суммы входных мощностей (500 мВт) рассеивается на резисторе.

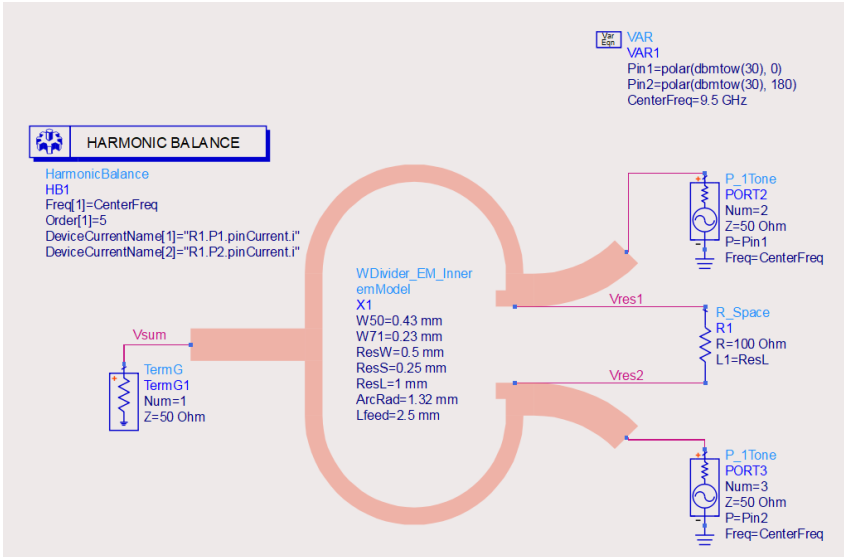
Установим разбаланс фаз в 90°.



PDiss_W	PDiss_dBm	PSum_dBm	PSum_W
994.6 m	29.98	29.91	979.6 m

Суммарная выходная мощность 1 Вт меньше суммы входных мощностей ($1 + 1 = 2$ Вт) и фактически равна входной мощности с одного канала. Половина суммы входных мощностей (1 Вт) рассеивается на резисторе.

Окончательно установим входные сигналы противофазными.



PDiss_W	PDiss_dBm	PSum_dBm	PSum_W
1.989	32.99	-72.88	51.52 p

Вся сумма входных мощностей рассеивается на резисторе, на выход не идет ничего.

Также при проведении таких исследований нужно смотреть, хватает ли способности использованного типоразмера резистора для рассеивания выделяемой на нем мощности. При превышении этого параметра резистор может легко сгореть и повредить аппаратуру. Ниже в таблице 1 приведены стандартные предельные значения рассеиваемой мощности для распространенных типоразмеров (используемый в примере типоразмер 0402).

Видно, что для исследованных значений разбалансов амплитуд развязывающего резистора хватает (просто потому, что сумма входных мощностей 20 мВт меньше предельной рассеиваемой мощности 63 мВт). А вот при подаче двух сигналов мощностью в 1 Вт с разбалансом фаз уже в 30° на резисторе пытается рассеяться 130 мВт, что уже выше его способности рассеять такую мощность (63 мВт).

**Таблица 1. Геометрические размеры и предельная рассеиваемая мощность
(стандартная) распространенных типоразмеров чип-резисторов**

Краткое именование типоразмера (дюйм)	Длина, ResL, мм	Длина выводов, ResS, мм	Ширина выводов, ResW, мм	Предельная рассеиваемая мощность, PDiss_Max, Вт
0402	1,0	0,25	0,5	0,063
0603	1,6	0,3	0,8	0,1
0805	2,0	0,4	1,25	0,125
1206	3,1	0,5	1,6	0,25

Из данного небольшого исследования должно быть хорошо видно, что гибридный развязанный делитель мощности хорошо подходит для суммирования более-менее равных по амплитуде и синфазных сигналов. При достаточной несимметричности можно получить ситуацию, что суммарный сигнал меньше уровня даже большего из входных сигналов, т.е. суммирование не имеет смысла.

Для изначально неравномерных схем суммирования нужно использовать делители с неравными коэффициентами деления, а разность фаз необходимо обязательно компенсировать (с помощью фазовращателей или настроенных линий задержки).

Также нужно контролировать способность выбранного типоразмера развязывающего резистора рассеивать мощность из-за несимметричности входных сигналов.

Задание на выполнение

1. Исследование спроектированных моделей

Используя спроектированные на лабораторных занятиях 1-5 модели, по методике выше провести исследование моделей в приведенных применениях.

Модели использовать финальные, после настройки на топологическом уровне (параметризированные emModel; при именовании ячеек по методикам лабораторных работ, они имеют постфикс _EM_Inner).

При выполнении исследований ориентироваться на методику выполнения БДЗ, приведенную выше.

В методике выше использованы численные параметры моделирования (центральная частота, шаги свипа переменных, разбалансы фаз и амплитуд, и пр.), соответствующие моделям из примеров в соответствующих лабораторных работах. При выполнении анализа ваших моделей, данные численные значения могут (и будут) отличаться.

Приветствуется, если студент попытается выйти за численные границы, использованные в методике и попытается найти какие-то новые сочетания параметров моделирования, при которых хорошо видны свойства исследуемых моделей, как в нормальном рабочем режиме, так и по границам применимости.

Также можно попробовать придумать иные виды анализа применимости исследуемых моделей.

При выборе допустимого ухода значения какой-то характеристики от рабочего уровня, типовой допустимый уход как правило принимается до 1 дБ для большинства исследуемых устройств.

2. Информационный поиск

Провести информационный поиск по заданным темам, используя информационные ресурсы [2, 3, 4, 5].

Нужно сделать подборку источников (статьи, труды конференций, главы в учебниках или монографиях и пр.), содержащие порядок и примеры расчета, моделирования, проектирования и, возможно, использования заданного полоскового устройства.

Необходимо найти не менее 8 источников и подготовить небольшую аналитическую записку на основании найденных источников. Записку внести как раздел «2. Информационный поиск» в отчет о выполнении БДЗ.

В записке необходимо достаточно подробно, при этом в свободной форме, представить и структурировать найденную информацию.

Текст аналитической записки рекомендовано оформлять как будто это сводная методика (с примерами), которую можно использовать как инструкцию по расчету, моделированию и проектированию заданного полоскового устройства.

Все найденные информационные источники должны быть использованы, т.е. по тексту должны присутствовать обоснованные ссылки.

В последней части аналитической записки должен быть приведен список найденных и использованных информационных источников.

Тема поиска определяется таблицей 2. Также рекомендовано искать источники более близкие к вашим спроектированным моделям (центральная частота, материал и толщина подложки и пр.).

Таблица 2. Задание для информационного поиска.

№ Варианта	Тема для информационного поиска
1, 6	Двушлейфный направленный ответвитель
2, 7	Кольцевой направленный ответвитель
3, 8	Направленный ответвитель на связанных линиях
4, 9	Кольцевой развязанный делитель мощности
5, 10	Неразвязный делитель мощности (тройник), в том числе с неравномерным делением

Требования к отчёту

Важное замечание: Отчеты студентов проверяются на перекрёстное заимствование в разделе «Информационный поиск». Отчёты всех студентов, включая возможный первоисточник заимствования, в которых будут найдены значимые совпадающие части (в первую очередь, в части аналитической записки по информационному поиску), будут отклонены и отправлены на переделку. Работу необходимо выполнять самостоятельно.

Отчет о выполненном БДЗ должен представлять из себя структурированное описание всей выполненной работы, в том числе должен содержать:

- Титульный лист, с наименованием работы, указанием исполнителя и даты выполнения.
- Цель (-и) работы.
- Список использованных инструментов в работе.
- Разделы работы, которые рекомендовано формировать в соответствии с этапами выполнения (аналогично методике и заданию на выполнение).
- Для каждого этапа необходимо привести все выполненные расчеты, подготовленные модели, результаты и анализ результатов.

Отчет должен быть оформлен в соответствии с ГОСТ 7.32-2017 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления» [6], в том числе – шрифт Times New Roman, 14 кегль, полуторный интервал между строк, пронумерованные страницы, подписанные и пронумерованные рисунки и пр.

Отчет должен состоять из двух основных разделов:

1. Исследование спроектированных полосковых устройств.
2. Информационный поиск.

Подробность описания этапов выполненной работе студент определяет самостоятельно. Самое простое правило, которому надо следовать – человек, незнакомый с выполненной работой (но знакомый с использованным

инструментом) должен быть в состоянии по отчету повторить данную работу и понять, что в ней происходит.

Готовый отчет необходимо экспортировать в pdf.

Архив проекта ADS лучше всего делать встроенным инструментом File – Archive Workspace из основного окна ADS. При архивации проекта можно выбрать, какие составляющие проекта добавлять в архив. Если какие-то ячейки или результаты расчета не нужны, то их можно исключить из архивирования.

Созданный архив будет иметь расширение *.7zads и является фактическим 7z-архивом.

По окончании выполнения БДЗ и подготовки отчета, отчет и архив всех проектов надо выложить в ОРИОКС в домашнее задание в дисциплину, привязав к контрольному мероприятию СРС (БДЗ). Именование отчета и архивов проектов должно давать возможность точно понять, к какой теме они относятся.

Данные отчеты и архивы проектов могут быть использованы при проведении оценки сформированности компетенций при аттестации по дисциплине «Моделирование антенно-фидерных устройств в Advanced Design System» в соответствии с Фондом оценочных средств.

Литература

1. Банков, С. Е. Электродинамика для пользователей САПР СВЧ : учебник / С. Е. Банков, А. А. Курушин. — Москва : СОЛОН-Пресс, 2017. — 316 с. — ISBN 978-5-91359-236-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/107661> (дата обращения: 02.02.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

Список профессиональных баз данных и информационно-справочных систем

2. IEEE Xplore – каталог ресурсов (статей, книг, трудов конференций и пр.), издаваемый при поддержке сообщества электронных инженеров IEEE, <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>

3. Scopus – крупнейшая единая база данных, содержащая аннотации и информацию о цитируемости рецензируемой научной литературы, со встроенными инструментами отслеживания, анализа и визуализации данных, <https://www.scopus.com>

4. Web of Science - Наукометрическая реферативная база данных журналов и конференций, <http://www.webofknowledge.com/>

5. Ресурсы, издаваемые через издательство Springer, <https://link.springer.com/>

Перечень ресурсов сети «Интернет»

6. [ГОСТ 7.32-2017](#) Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

7. Сборник примеров работы в ADS «ADS Example Book: Focused on RF and Microwave Design», доступен после свободной регистрации <https://www.keysight.com/main/editorial.jsp?cc=RU&lc=rus&ckey=2704333&id=2704333&cmpid=zzfindeesof-ads-rfmw-examples>

8. База знаний Образовательного центра Keysight EEsof EDA Knowledge Center, доступен после свободной регистрации, <http://edadocs.software.keysight.com/display/support/Knowledge+Center>

9. Тематический раздел «Rf & Microwave Design» форума electronix.ru, доступен после свободной регистрации, <https://electronix.ru/forum/index.php?showforum=63>

10. Интернет-энциклопедия разработчиков СВЧ-аппаратуры «Microwaves101» <https://www.microwaves101.com>

Каналы Youtube с видеоуроками по Keysight Advanced Design System

11. Канал youtube образовательного центра Keysight EEsof EDA <https://www.youtube.com/user/KeysightEESOF>

12. Канал youtube Anurag Bhargava образовательного центра <https://www.youtube.com/user/BhargavaAnurag>

13. Канал youtube Keysight EEsof EDA Field <https://www.youtube.com/c/EEsofAETips>

Разработчик:

Ст. преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.