

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

Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина

Лабораторная работа №3

«Расчет и моделирование кольцевого направленного ответвителя»

**Модуль
«Моделирование антенно-фидерных устройств»**

**По курсу
«Моделирование СВЧ-устройств в САПР»**

Москва, Зеленоград

2025

Оглавление

Оглавление	2
Введение	2
Теоретические сведения	3
Методика выполнения работы	5
Создание проекта	5
Модель на идеальных линиях передачи	6
Модель на схемном уровне в микрополосковом исполнении	12
Модель на топологическом уровне	18
Формирователь суммарно-разностного сигнала	27
Задание на выполнение	31
Требования к отчёту	36
Задание на самостоятельную работу	37
Контрольные вопросы	38
Литература	39



Введение

Цель работы: ознакомиться с расчетом и моделированием кольцевого направленного ответвителя в среде Keysight Advanced Design System (ADS).

Используемое оборудование или ПО: материал подготовлен на основании версии Keysight Advanced Design System 2023. 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.

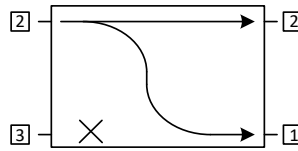
Продолжительность работы: 4 часа.

В разделе «Методика выполнения» приведены только необходимые действия по выполнению лабораторной работы. Подробно описываются только новые приемы работы в ADS. Предполагается, что студент выполнил первую лабораторную работу и освоил базовый предложенный маршрут.

Lab1	показывает места, которые подробно описаны в первой лабораторной работе
	показывает приемы, значительно упрощающие или ускоряющие использование ADS
	показывает места, за которыми надо особенно следить и где легко совершить ошибку

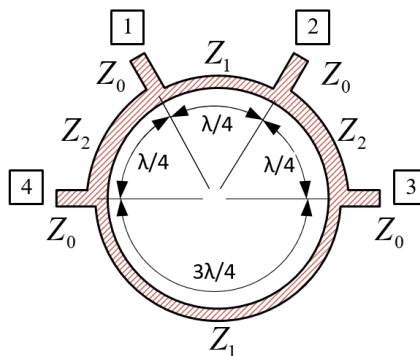
Теоретические сведения

Напомним, что направленные ответвители – это четырехпортовые устройства (восьмиполюсники), предназначенные для отведения части мощности от основного прохода мощности во вторичное плечо. Соответственно, его можно описать матрицей S-параметров размером 4x4.



При использовании любых формул из источников нужно следить за нумерацией портов. Существует несколько различающихся принятых схем обозначений. Использование формул без учета нумерации портов, может привести к странным и некорректным результатам расчетов. В текущей работе нумерация портов отличается от [2] и [3].

Одним из примеров реализации направленного ответвителя является кольцевой направленный ответвитель (Rat-Race Coupler). Его реализацию на линиях передачи можно привести в следующем виде (Z_0 – волновое сопротивление подводящих линий, Z_1 – волновое сопротивление параллельных участков, Z_2 – волновое сопротивление последовательных участков):



Анализ кольцевого направленного ответвителя проще проводить в понятиях нормированных импедансов $\rho = Z/Z_0$. В этом случае расписав выражение для баланса энергий можно получить $\frac{1}{\rho_1^2} + \frac{1}{\rho_2^2} = 1$.

Если ввести коэффициент деления по мощности между основным и ответвленным плечом m , то для нормированных проводимостей можно определить $\rho_1 = \sqrt{m+1}$ и $\rho_2 = \sqrt{\frac{m+1}{m}}$ соответственно.

При использовании кольцевого направленного ответвителя как гибридного ($m=1$), можно определить требования на импедансы участков линий как $\rho_1 = \rho_2 = \sqrt{2}$ или $Z_1 = Z_2 = 71 \text{ Ом}$ (при нормировке на $Z_0 = 50 \text{ Ом}$). В этом случае его матрицу S-параметров можно свести к следующему виду:

$$[S] = -j \begin{bmatrix} 0 & y_1 & 0 & y_2 \\ y_1 & 0 & y_2 & 0 \\ 0 & y_2 & 0 & -y_1 \\ y_2 & 0 & -y_1 & 0 \end{bmatrix},$$

где $y_1 = 1/\rho_1$ и $y_2 = 1/\rho_2$ - нормированные проводимости соответствующих участков.

Также видно, что если за основной порт взять 1, за второй (изолированный) порт 3 и подавать на них сигналы, то на порт 2 эти сигналы выйдут синфазно, а на порт 4 – противофазно. Это позволяет использовать гибридный кольцевой направленный ответвитель для формирования суммарно-разностного сигнала (Hybrid-180° Coupler).

Для кольцевого направленного ответвителя верны все те же рассуждения, что и для двушлейфного направленного ответвителя. В том числе для него аналогично можно использовать следующий список характеристик:

1. Рабочее затухание (Insertion Loss) $L = -20 \lg(|S_{21}|)$;
2. Переходное ослабление (Coupling) $C = -20 \lg(|S_{41}|)$;
3. Развязка (Isolation) $I = -20 \lg(|S_{31}|)$, в пределе $\rightarrow +\infty$ дБ;
4. Направленность (Directivity) $D = -20 \lg(|S_{31}|/|S_{41}|)$, в пределе $\rightarrow +\infty$ дБ.

Видно, что между тремя из этих параметров существует взаимосвязь

$$I[\text{дБ}] = D[\text{дБ}] + C[\text{дБ}].$$

Гибридный кольцевой направленный ответвитель часто используется для формирования суммарно-разностного сигнала, в том числе в балансных схемах смесителей.

Методика выполнения работы

Маршрут работы следующий:

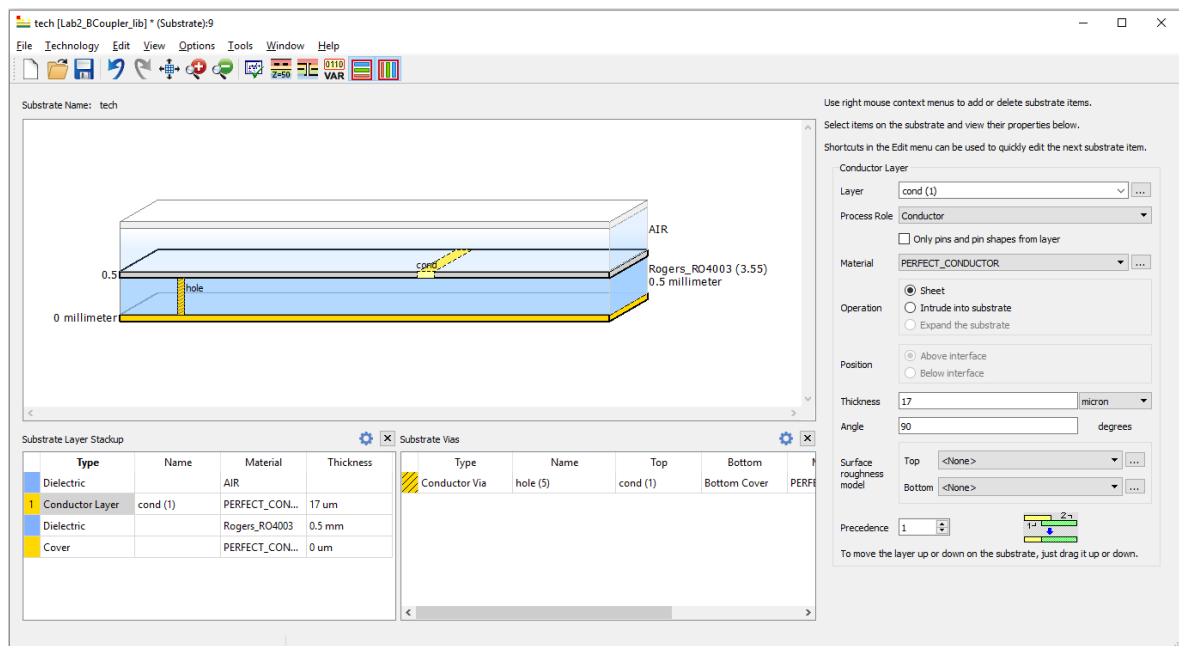
1. Составление модели на идеальных линиях передачи и моделирование в режиме S-параметров и анализ результатов.
2. Преобразование модели на идеальных линиях передачи в схемотехническое представление на заданной ВЧ-подложке с помощью инструмента LineCalc. Моделирование в режиме S-параметров и анализ результатов. При необходимости подстройка модели.
3. Преобразование схемотехнической модели в топологическое представление. Моделирование методами моделирования uMoM (Microwave Momentun). Параметризация ЕМ-модели. При необходимости подстройка модели.
4. Анализ применимости кольцевого направленного ответвителя как формирователя суммарно-разностного сигнала.

Создание проекта

Lab1

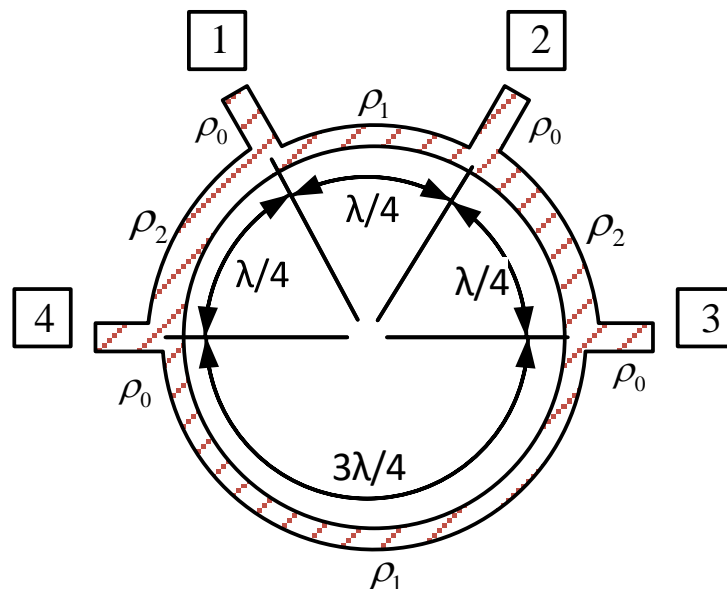
Проект должен быть подготовлен к ЕМ-моделированию, в том числе:

- В качестве библиотеки слоев необходимо дополнительно к библиотеке назначения слоев схемы «ads_schematic_layer» выбрать «ads_standard_layers» (назначение топологических слоев).
- единицы длин проекта – мм, с разрешением 10000 точек/мм
- рекомендовано сразу создать определение подложки tech.subst, в примере RO4003 ($\epsilon_r = 3,55$, $\tan D = 0,0026$), толщиной диэлектрика 0,5 мм, толщиной металлизации 17 мкм.



Модель на идеальных линиях передачи

Кольцевой направленный ответвитель (Rat-Race Coupler, кольцевой направленный ответвитель) при описании его на идеальных линиях передачи описывается следующим рисунком.




Если ввести коэффициент деления по мощности между основным и ответвленным плечом m , то нормированные волновые сопротивления участков равны

$$\rho_1 = \sqrt{m+1} \text{ и } \rho_2 = \sqrt{\frac{m+1}{m}} \text{ соответственно.}$$

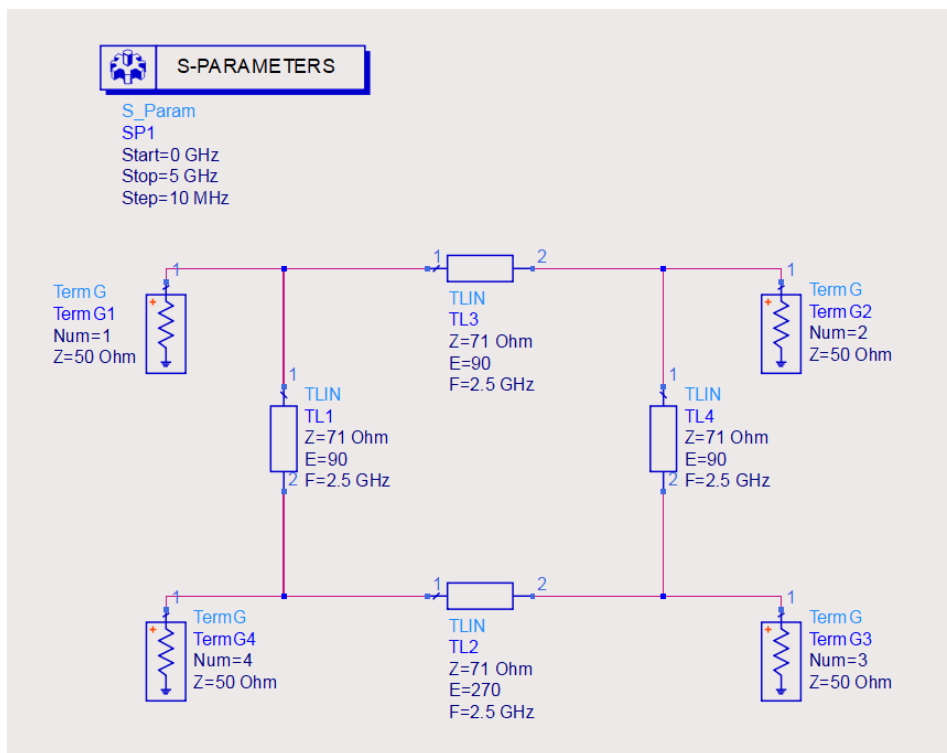
У гибридного кольцевого направленного ответвителя $\rho_1 = \rho_2 = \sqrt{2}$. При нормировке на $Z_0 = 50 \text{ Ом}$, ненормированные волновые сопротивления гибридного кольцевого направленного ответвителя $Z_1 = Z_2 = 71 \text{ Ом}$.

Пусть кольцевой направленный ответвитель настроен на частоту 2,5 ГГц.

Создаем схему RRCoupler_Ideal. Собираем на идеальных линиях передачи (модель TLIN )




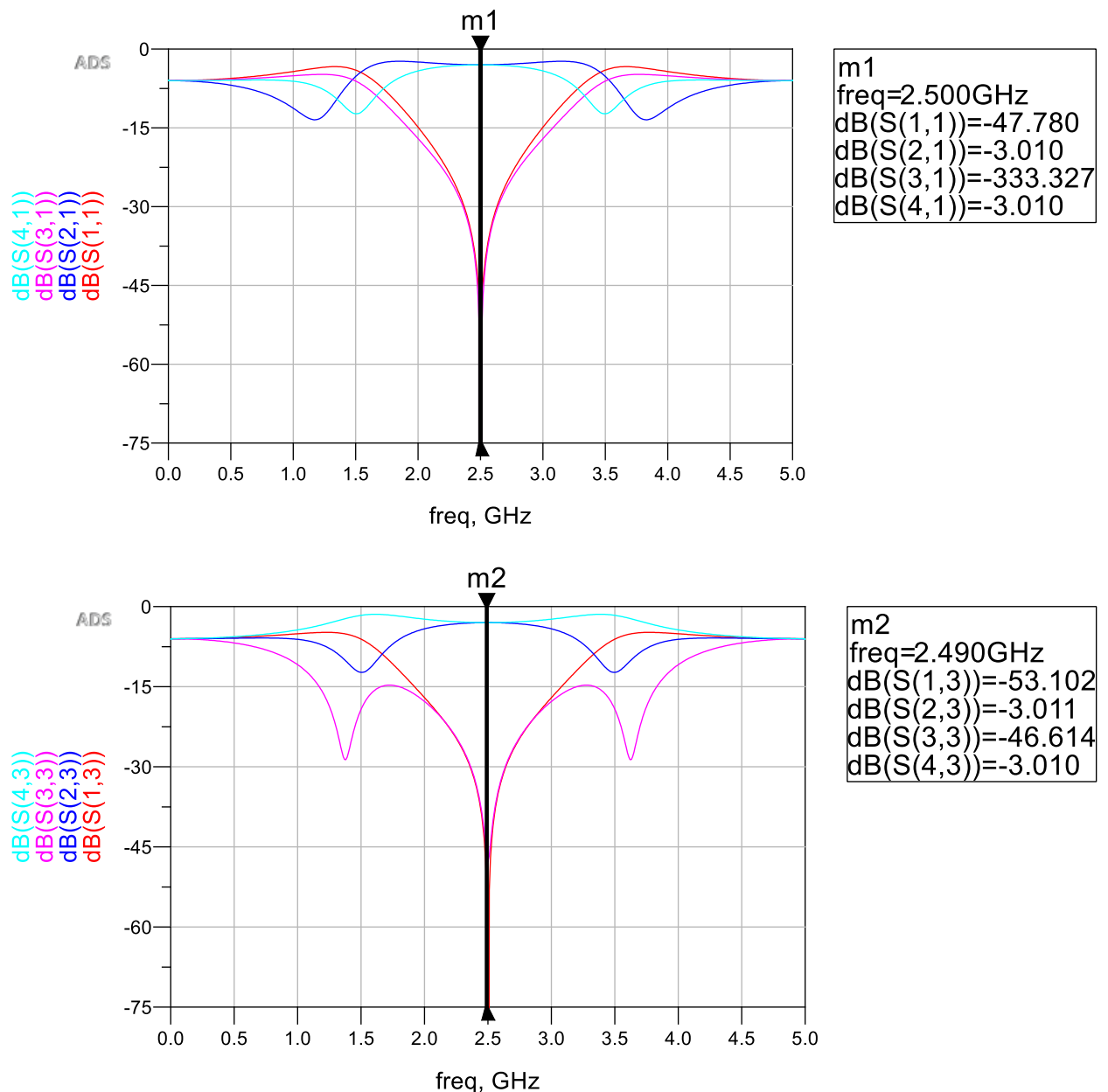
Нужно следить за нумерацией терминаторов Term (свойство Num). Оно определяет порядок обозначений в матрице S-параметров. Эту нумерацию надо будет сохранять одинаковой во всех схемах проекта, чтобы можно было сопоставлять графики.



Запускаем моделирование .

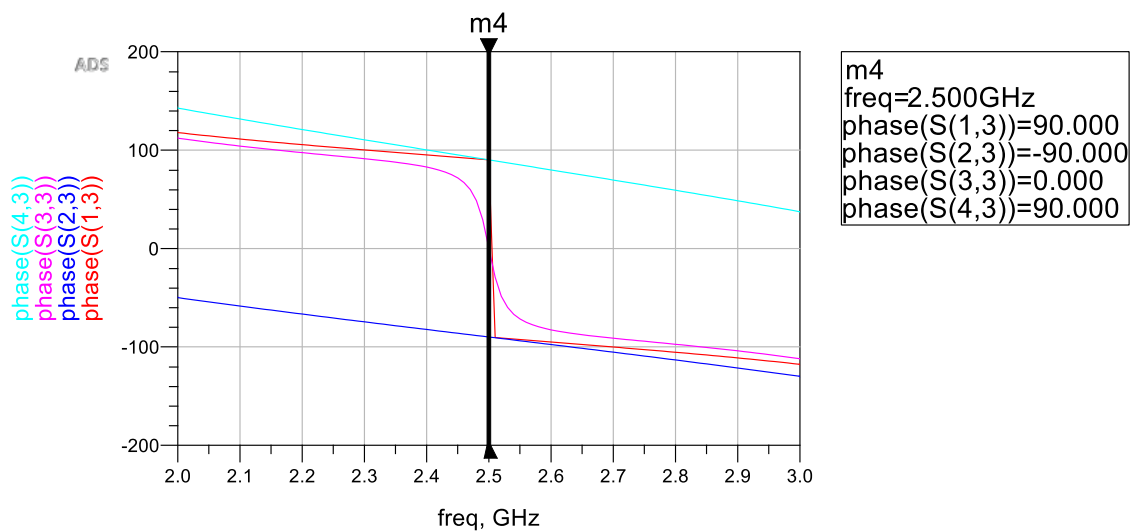
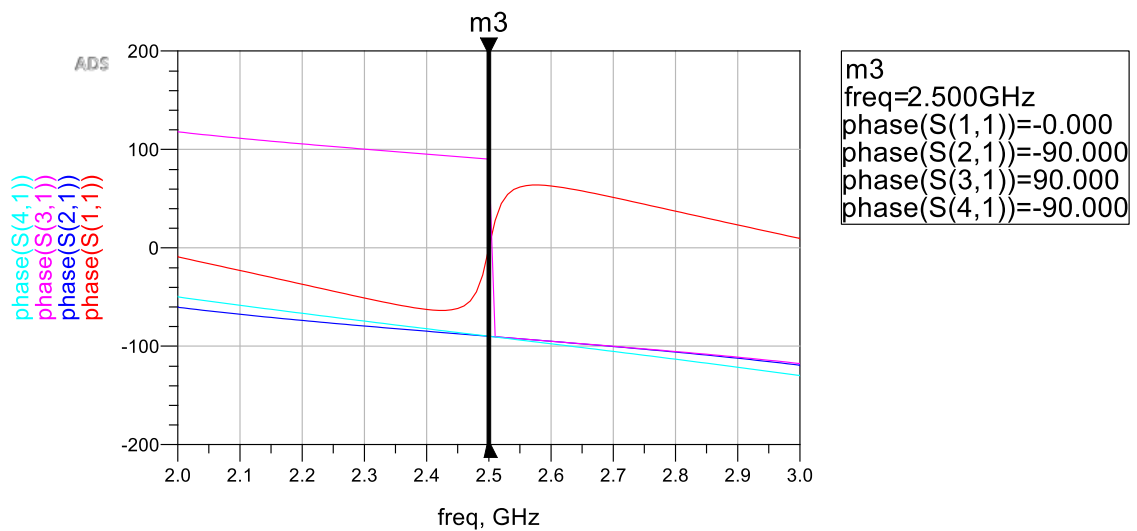
Lab1

Выводим две пары прямоугольных графиков – одна с амплитудными соотношениями относительно портов 1 и 3, вторая пара с фазовыми относительно тех же портов. Для создания фазовых соотношений надо при выборе комплексных данных выбирать постобработку phase (результат в градусах). Для отображения данных для нескольких графиков воспользуемся линейным маркером .



Для амплитудных соотношений видно, что при подаче сигнала в порты 1 или 3 устройство на центральной частоте:

- имеет очень хорошее согласование по входу dB(S11) и dB(S33) → – 45 дБ;
- рабочие затухания порта 1 dB(S21) и порта 3 dB(S23), и соответствующие переходные ослабления dB(S41) и dB(S43) близки к –3 дБ, т.е. устройство гибридное;
- развязка dB(S31) также большая;
- устройство настроено точно на 2,5 ГГц – видно по положению провала на dB(S11), dB(S33) и dB(S31).



При анализе фазовых соотношений видно:

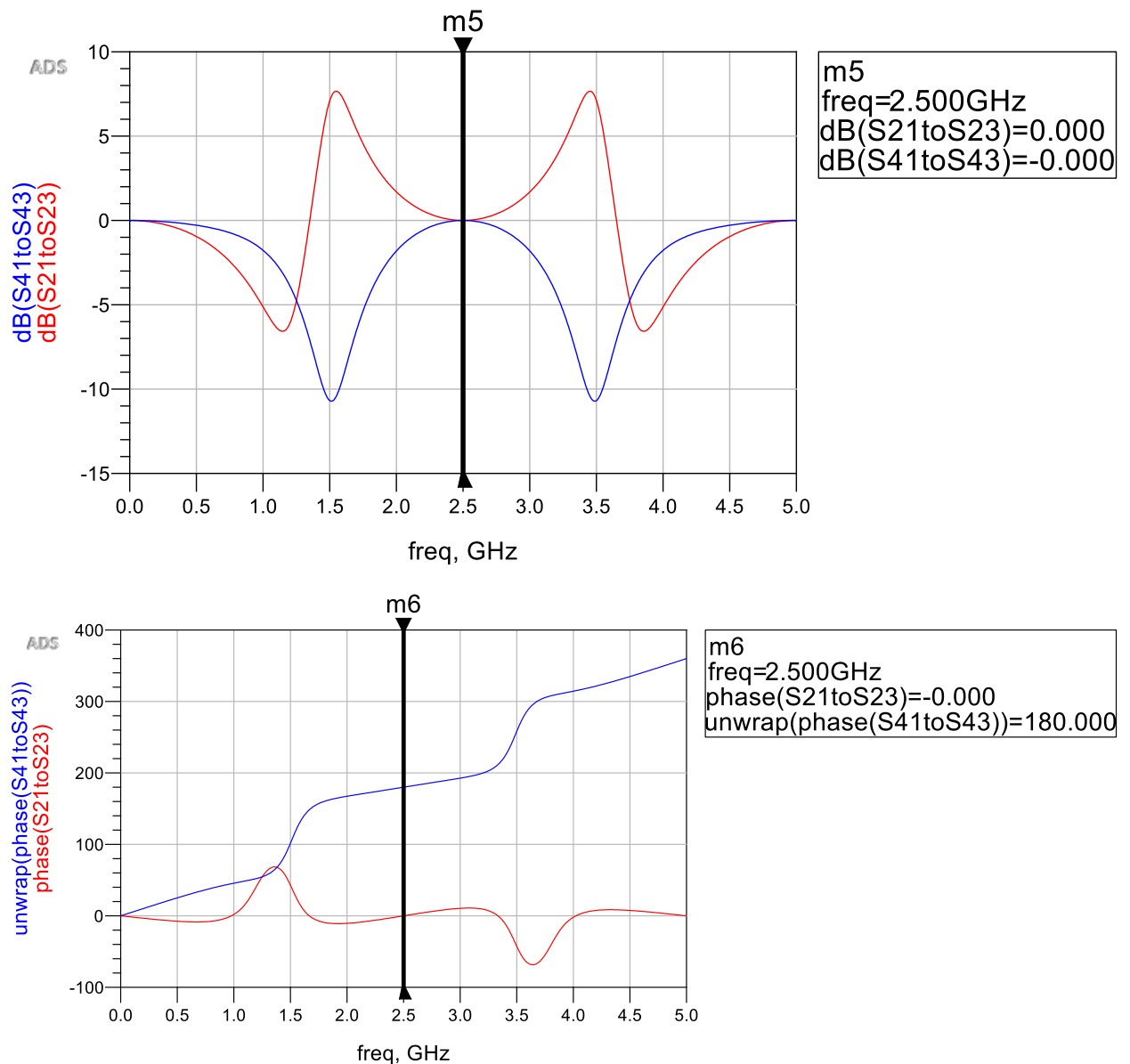
- для порта 1 сдвиг фаз в порты 2 и 4 одинаковый и составляет 270° (-90°);
- для порта 3 сдвиг фазы в порты 2 и 4 отличается на 180° ($\text{phase}(S_{23}) = -90^\circ$, $\text{phase}(S_{43}) = 90^\circ$);
- перегиб ФЧХ коэффициентов отражения $\text{phase}(S_{11})$ и $\text{phase}(S_{33})$ и разрыв ФЧХ развязки $\text{phase}(S_{31})$ на частоте 2,5 ГГц также косвенно говорят о том, что кольцевой направленный ответвитель настроен эту частоту.

Кольцевой направленный ответвитель часто используют для формирования суммарно-разностных сигналов. Пусть сигналы подают на порты 1 (основной вход) и 3 (изолированный вход), а снимают с портов 2 (суммарный выход) и 4 (разностный выход).

Оценим симметричность сигналов. При снятии сигнала с порта 2 это S_{21}/S_{23} , а при снятии с порта 4 S_{41}/S_{43} . Введём их как выражения и выведем амплитудные и фазовые соотношения (если на фазовом соотношении возникает скачок через 360° , его можно убрать, обернув выражение в функцию `unwrap()`).

$$\text{Eqn } S_{21toS23} = S_{21}/S_{23}$$

$$\text{Eqn } S_{41toS43} = S_{41}/S_{43}$$



По амплитудным соотношениям видно, что на центральной частоте каналы симметричны. А по фазе различаются на 180° . Т.е. при выбранной схеме включения и нумерации портов, порт 2 будет суммарным выходом, а порт 4 – разностным.

Известна следующая формула, описывающая матрицу рассеяния кольцевого направленного ответвителя на центральной частоте (нумерация строк в матрице соответствует моделированию в лабораторной работе):

$$S = -j \begin{bmatrix} 0 & y_1 & 0 & y_2 \\ y_1 & 0 & y_2 & 0 \\ 0 & y_2 & 0 & -y_1 \\ y_2 & 0 & -y_1 & 0 \end{bmatrix},$$

где $y_1 = 1/\rho_1$ и $y_2 = 1/\rho_2$ - нормированные проводимости соответствующих участков (введены выше).

Lab1 Создадим в этом же окне графиков идеальную теоретическую матрицу рассеяния и сравним с ней результаты моделирования на идеальных линиях передачи.

Eqn CouplingCoeff = 1

Eqn Yn_1 = 1/sqrt(CouplingCoeff+1)

Eqn Yn_2=sqrt(CouplingCoeff/(CouplingCoeff+1))

Eqn S_theor = -j*{{0, Yn_1, 0, Yn_2}, {Yn_1, 0, Yn_2, 0}, {0, Yn_2, 0, -Yn_1}, {Yn_2, 0, -Yn_1, 0}}

Выведем в таблицу интересующие значения теоретической матрицы рассеяния. Форму результатов для каждого из выражений поставим dB/Degrees (амплитуда в дБ/фаза в градусах), чтобы можно было удобно сравнивать с результатами с графиков.

Таблица будет выглядеть следующим образом.

S_theor(1,1)	S_theor(2,1)	S_theor(3,1)	S_theor(4,1)
<-infinity> / 0.0000	-3.010 / -90.00	<-infinity> / 0.0000	-3.010 / -90.00

S_theor(1,3)	S_theor(2,3)	S_theor(3,3)	S_theor(4,3)
<-infinity> / 0.0000	-3.010 / -90.00	<-infinity> / 0.0000	-3.010 / 90.00

Коэффициенты отражения S11 и S33, а также развязка S31 имеют значение по амплитуде $-\infty$ дБ (поэтому на фазу смотреть не имеет смысла). Рабочие затухания S21 и S32 и переходные ослабления S41 и S43 равны -3 дБ. По фазовым соотношениям видны суммарный и разностный выходы.

Дополнительно рассчитаем волновые сопротивления участков (относительно $Z_0 = 50 \text{ Ом}$) исходя из теоретической матрицы.

$$\text{Eqn } Z_0 = 50 \quad \text{Eqn } Z_1 = Z_0/Y_{n_1} \quad \text{Eqn } Z_2 = Z_0/Y_{n_2}$$

Y_{n_1}	Y_{n_2}	Z_1	Z_2
0.707	0.707	70.711	70.711

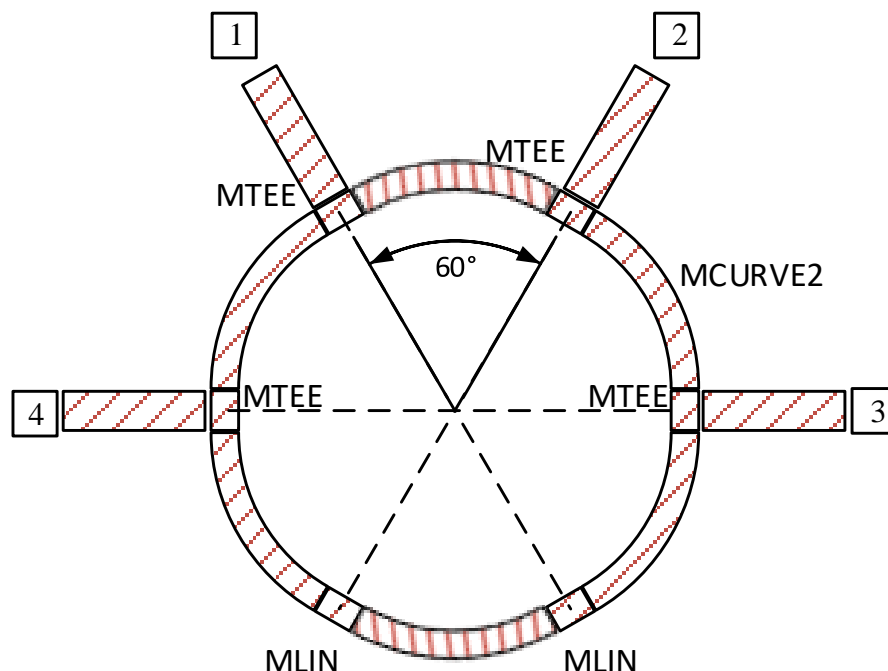
Z_1 и Z_2 незначительно отличаются от 71 Ом.

Модель на схемном уровне в микрополосковом исполнении

Преобразуем рассчитанную ранее схему цепи из идеальных линий передачи в микрополосковое представление на схемном уровне.

Создаем новую схему RRCoupler_MLIN_Sch.

Для того, чтобы сгенерированный схематик можно было превратить в топологию и кольцо замкнулось нормально, разобьём нижнюю дугу на три с угловыми размерами по 60° и дополнительно внесем два участка MLIN с длиной, равной W50 (для компенсации двух верхних тройников) и шириной W71.



Напомним параметры подложки - RO4003 ($\epsilon_r = 3,55$, $\tan D = 0,0026$), толщиной диэлектрика 0,5 мм, толщиной металлизации 17 мкм.

Расчет ведем для частоты 2,5 ГГц.

Lab1 С помощью инструмента LineCalc  рассчитаем геометрические размеры линий.

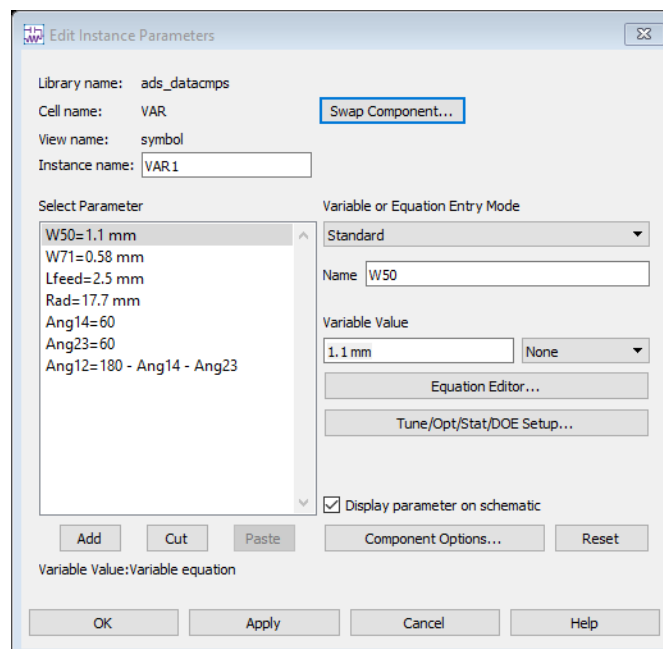
В проектируемом кольце дуги имеют электрическую длину 90° , при этом геометрический угол дуги равен 60° ($360^\circ/6$ – шесть участков дуг). Волновое сопротивление 71 Ом. Ширина дуг $W71 = 0,58$ мм. Четверть длины волны по расчету равна 18,5 мм. Пересчитаем в радиус (т.к. в компонентах типа MCURVE2 задается радиус дуги относительно ее центральной линии).

$$\text{Rad} = \frac{18,5}{2\pi} \cdot \frac{360^\circ}{60^\circ} \approx 17,7 \text{ мм}$$

Участки со стороны портов будем задавать как MLIN шириной $W50 = 1,1$ мм, небольшой длины $L_{\text{feed}} = 2,5$ мм.


Чтобы можно поработать с угловыми размерами между выводами, введем угловые переменные Ang14 и Ang 23 = 60, задающие угловое расстояние в градусах между парами портов 1-4 и 2-3 соответственно. Для полной симметрии кольца угол между портами 1-2 будет высчитываться из них как $\text{Ang12} = 180 - \text{Ang14} - \text{Ang23}$.


Вносим все переменные в блок VAR.



Далее строим схему моделирования на микрополосковых линиях MLIN, дугах MCURVE2 и тройниках MTEE_ADS.

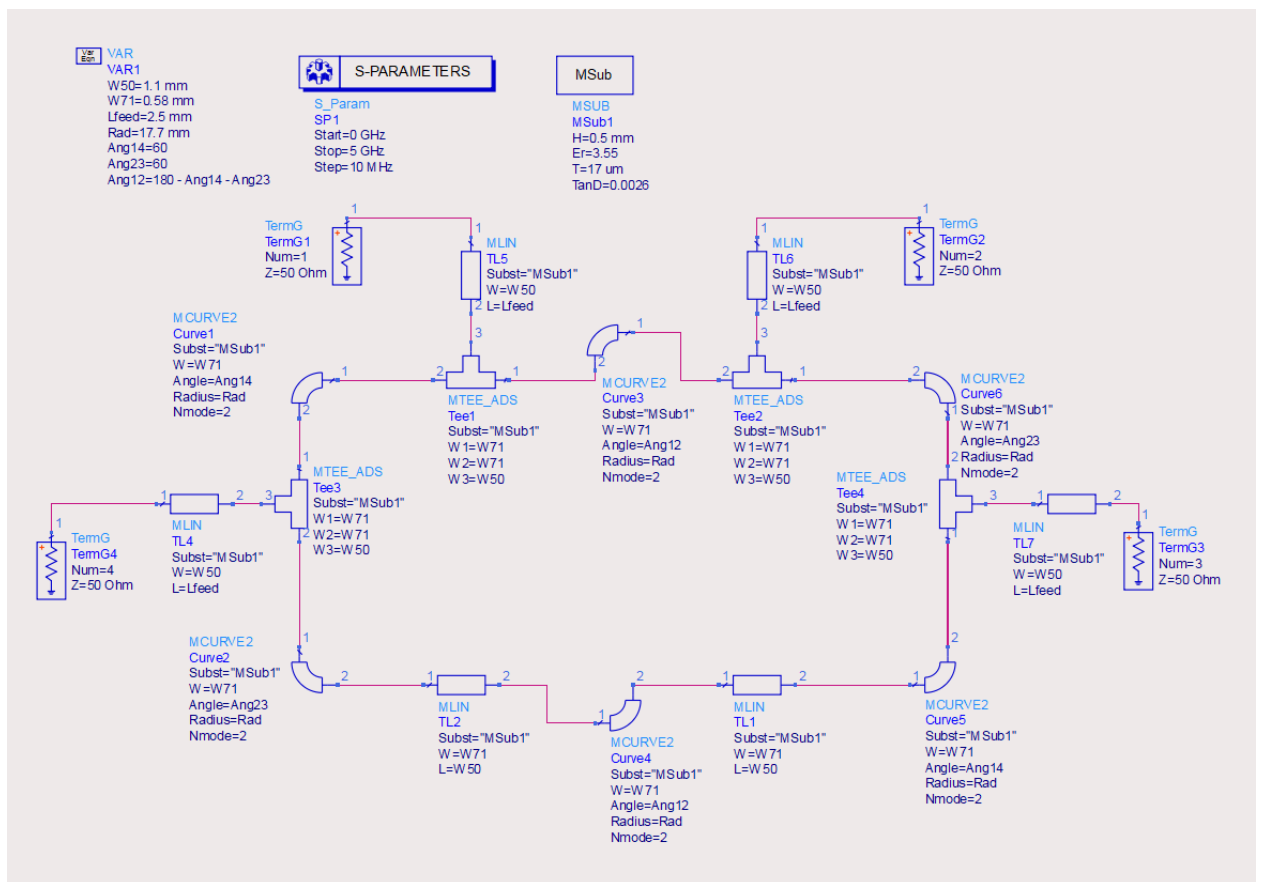


При расположении микрополоковых компонентов в схеме их можно только вращать (Rotate , Ctrl+R). Зеркалить (Mirror About X, Mirror

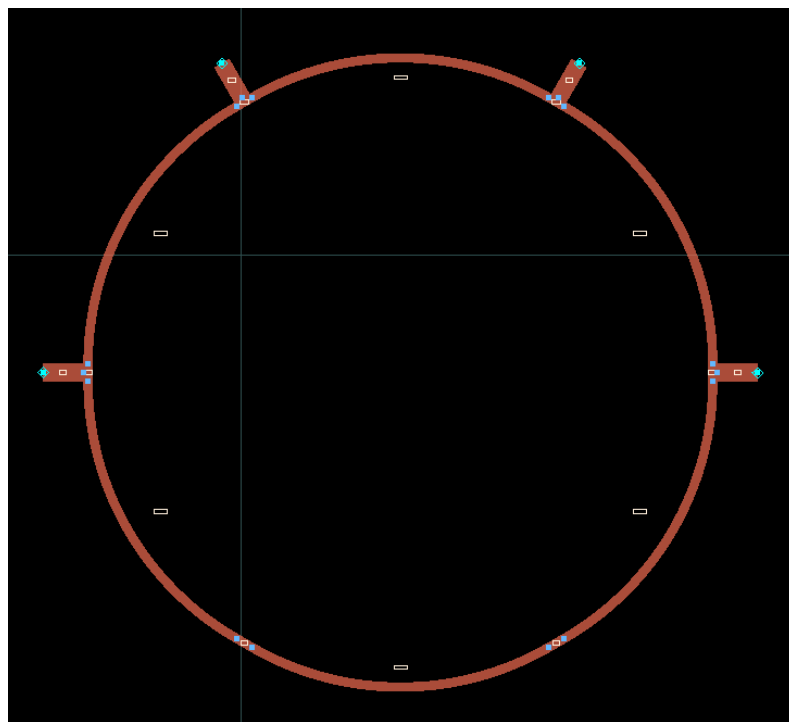
About Y, Shift+X или + Y ) такие компоненты нельзя. Зеркалится только обозначение в схеме, при последующем переносе в топологию это приводит к некорректному построению.



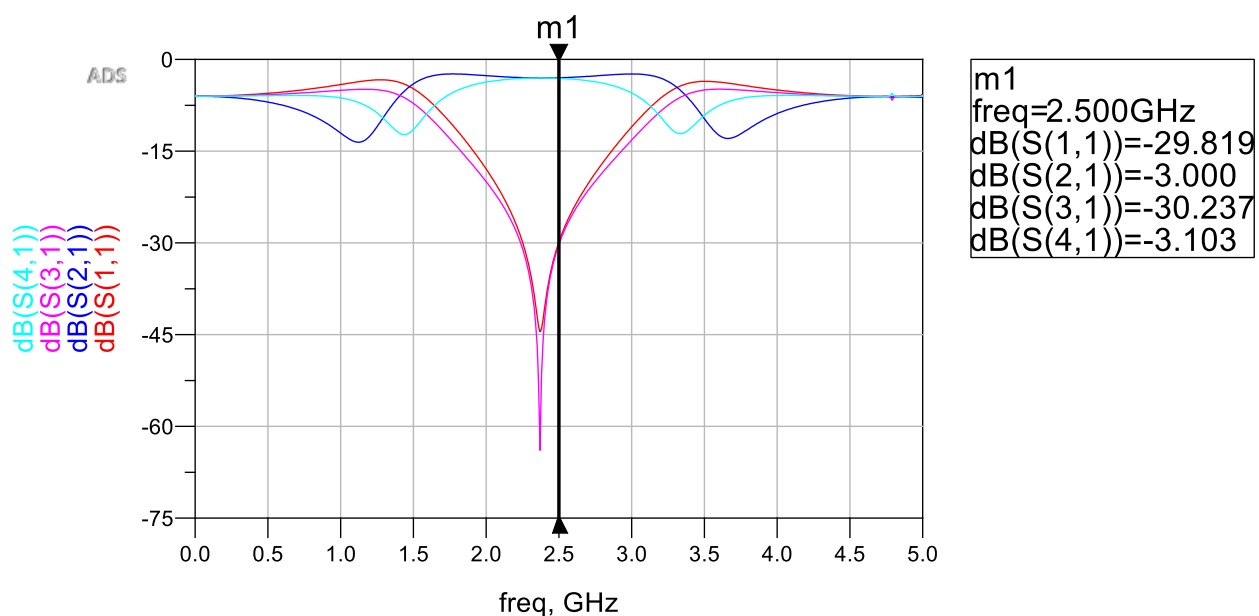
При расположении компонентов можно перемещать привязанную текстовую информацию по ПКМ – Move Component Text (F5), так, чтобы получать чистую и читаемую схему.



Т.к. данная схема довольно сложна и присутствуют взаимосвязанные участки, то лучше сразу после построения схемы по команде Layout – Generate/Update Layout проверить, что топологическое представление корректно (можно без сохранения топологии).



Запускаем моделирование. В области графиков строим амплитудные характеристики относительно порта 1.



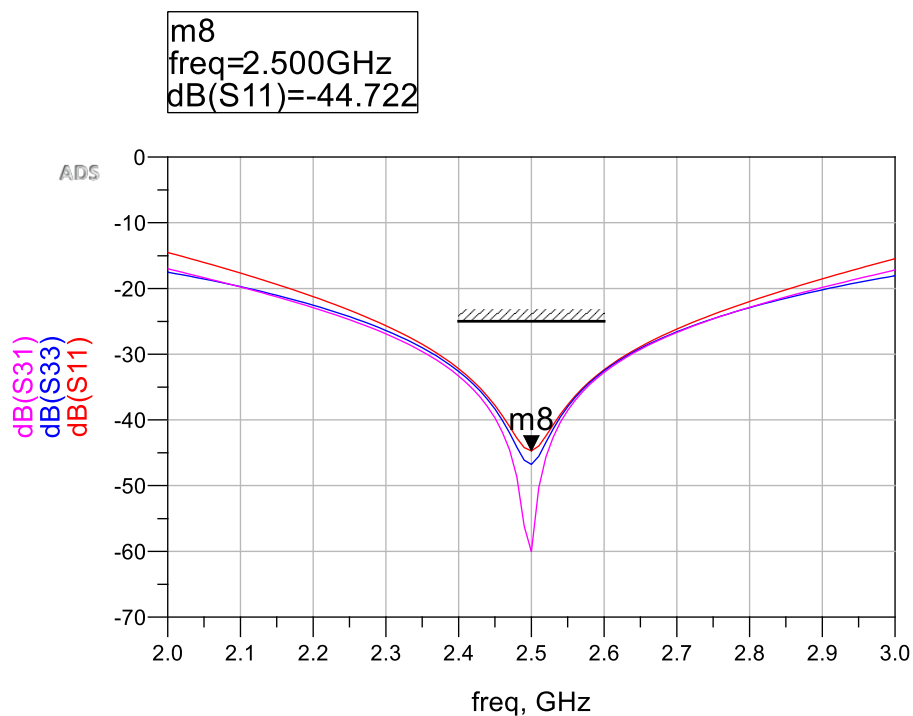
Результаты показывают, что рабочая частота устройства немного уплыла вниз. Связанно это с тем, что были добавлены тройники и их компенсирующие участки. Электрические длины дуг оказались больше, чем нужно.

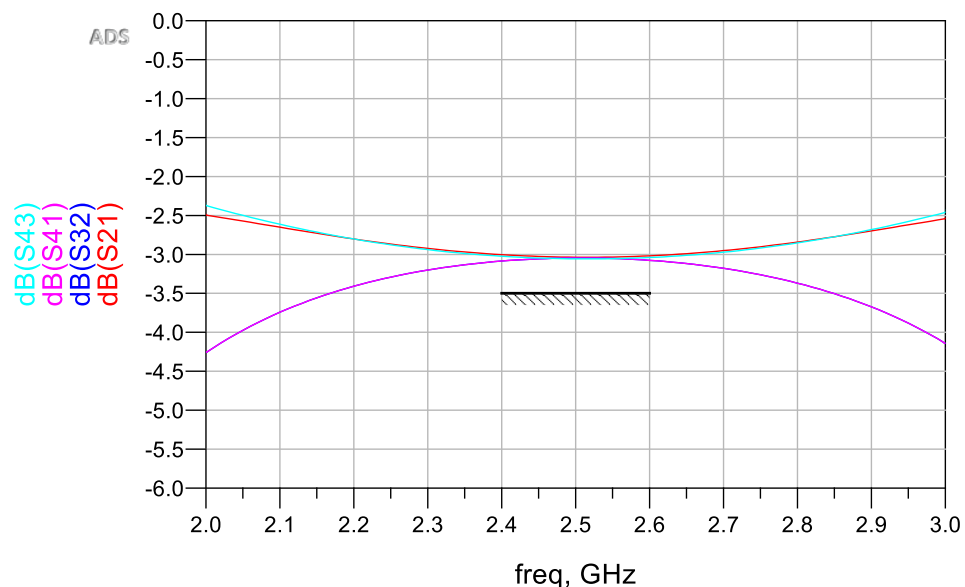
С помощью инструмента Tune или Optimization настроим кольцевой направленный ответвитель на 2,5 ГГц. Дополнительно настроим его так, чтобы он работал в некотором частотном диапазоне 2,4..2,6 ГГц. Наложим следующие ограничения:

- коэффициенты отражения dB(S11) и dB(S33) и развязка dB(S31) не должны превышать -25 дБ в данном частотном диапазоне;
- положение провалов коэффициентов отражения dB(S11) и dB(S33) и развязки dB(S31) должны быть как можно более к 2,5 ГГц;
- рабочее затухание dB(S21) и dB(S32) и переходные ослабления dB(S41) и dB(S43) не должны опускаться меньше $-3,5$ дБ;
- на графиках dB(S21toS23) и dB(S41toS43) не должны отличаться более чем на 0,5 дБ в рабочей полосе;
- на графиках phase(S21toS23) и phase(S41toS43) разница фаз не должны отличаться от 180° более чем на 5° в рабочей полосе;

Имеет смысл работать с переменной Rad с шагом 0,05 мм, уходить от номинального значения стоит не более, чем на 20%. Шириной W71 можно поиграться для возможного расширения полосы за счет уменьшения развязки на центральной частоте. Перекос амплитудных характеристик можно подправить с помощью Ang14 и Ang23, но не более, чем на пару градусов от 60° .

В примере подобранные значения Rad = 16,75 мм.



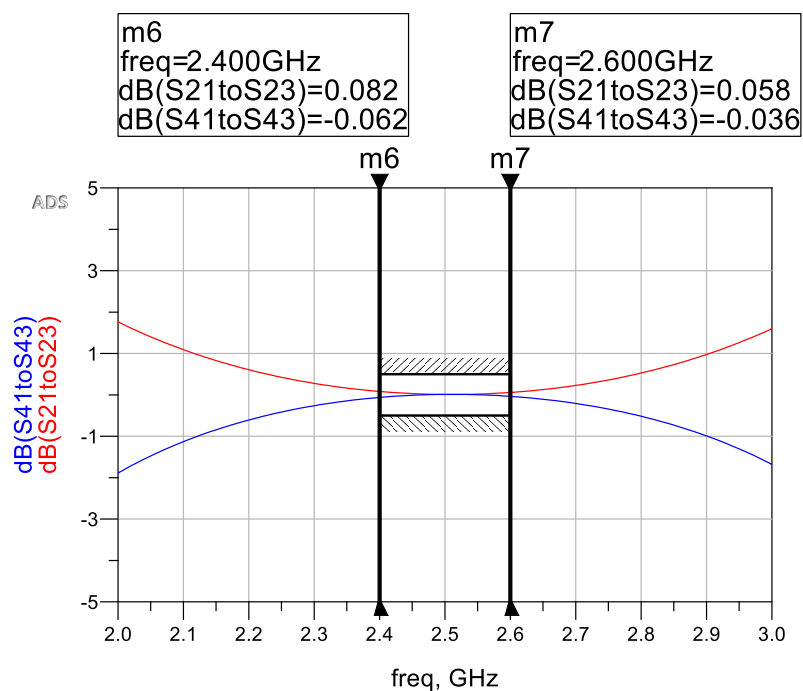


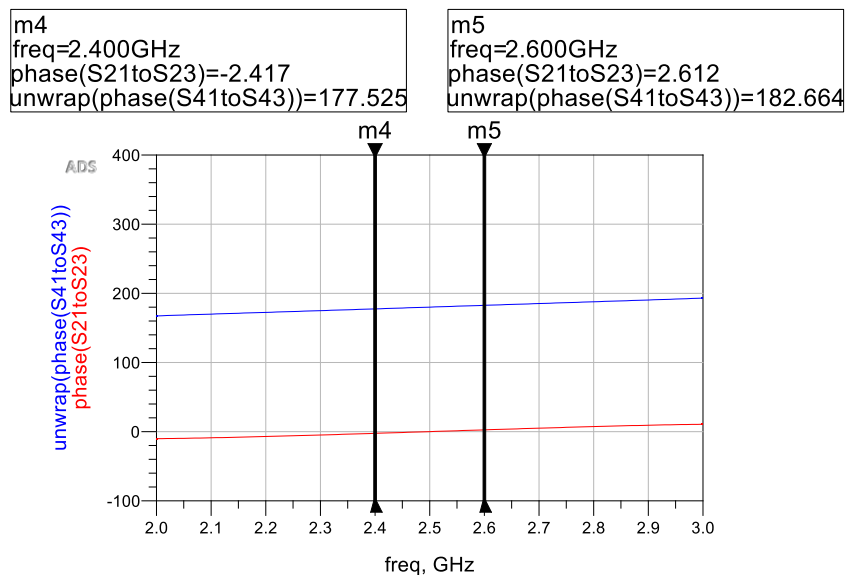
Проанализируем теперь подстроенные результаты.

Как и было запланировано, центральная частота 2,5 ГГц. Амплитудные и частотные характеристики в полосе 2,4..2,6 ГГц соответствуют ожидаемым.

Также проверим симметричность работы кольцевого направленного ответвителя как суммарно-разностного устройства (анализ S21toS23 и S41toS43). Выведем на прямоугольные графики амплитуду в дБ и фазу этих соотношений и поставим маркеры по краям заданного частотного диапазона

$$\text{Eqn } S21\text{to}S23 = S21/S23 \quad \text{Eqn } S41\text{to}S43 = S41/S43$$





Видно, что фазовое соотношение между сохраняется в пределах $\sim 1^\circ$, а амплитудное порядка 0,1 дБ.

Модель на топологическом уровне

Lab1 Следующий этап – сгенерировать топологию на основе схемного представления. Для параметризации топологии надо будет создать двухуровневую схему:

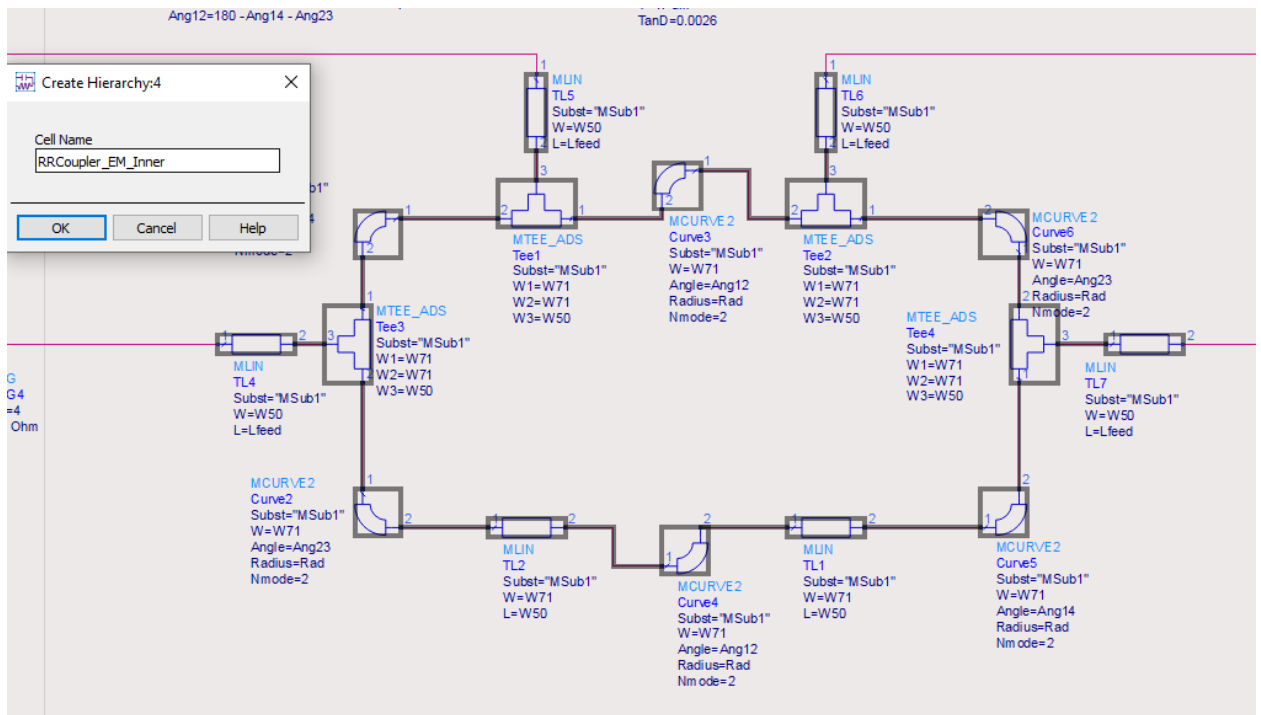
- схема верхнего уровня RRCoupler_EM_Top, в которой будет контроллер S-параметров, терминаторы и все измерительные выражения.

- схема нижнего уровня RRCoupler_EM_Inner, только с микрополосками (MCURVE2, MLIN и MTEE_ADS), подключённая наверх через пины.

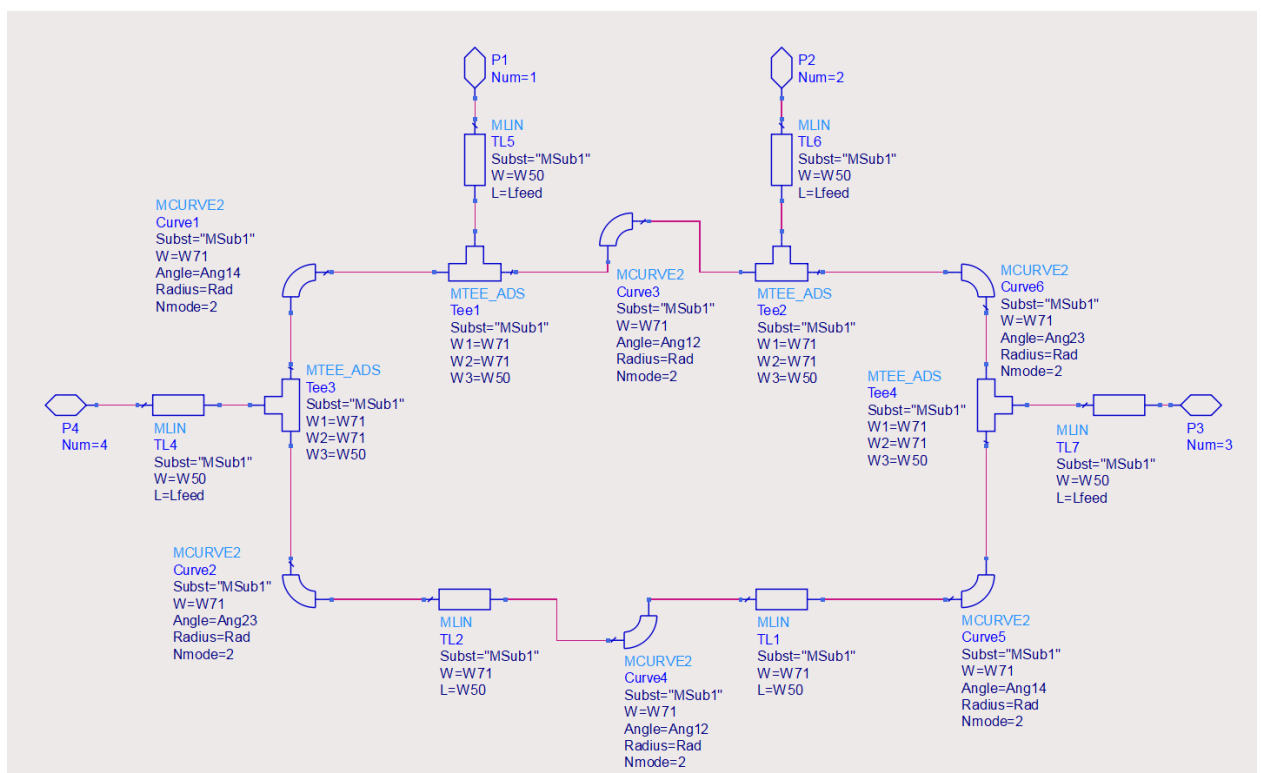
Схему нижнего уровня RRCoupler_EM_Inner надо будет сконвертировать в топологию; сделать всю ячейку RRCoupler_EM_Inner параметризированной и настроить параметры EM_моделирования (emSetup).

Далее кратко показаны основные картинки до начала моделирования

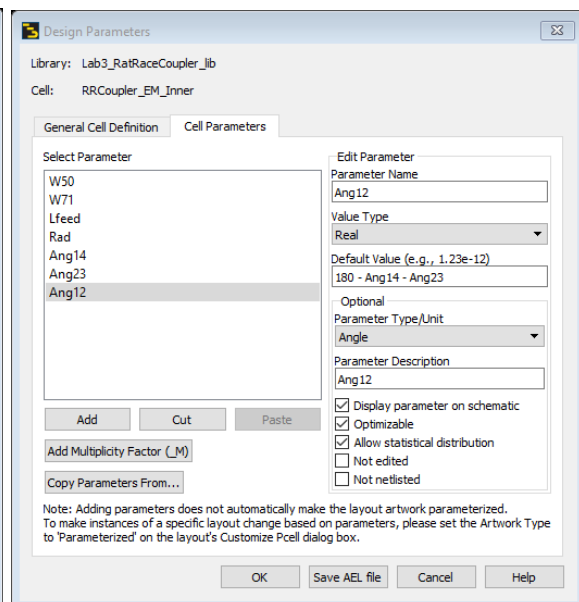
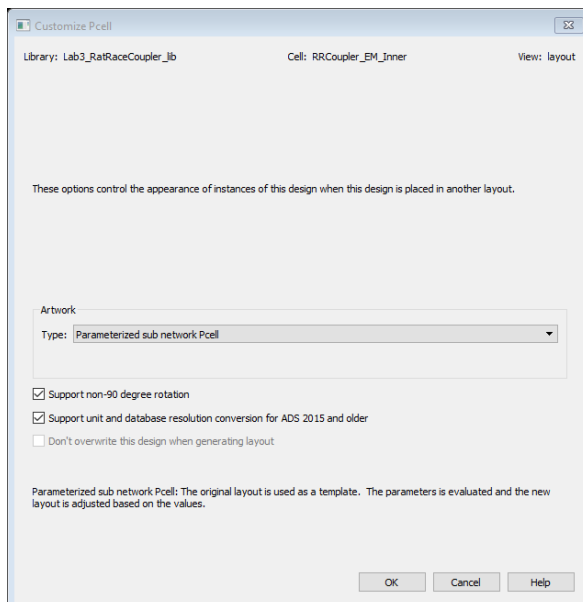
- создание иерархии



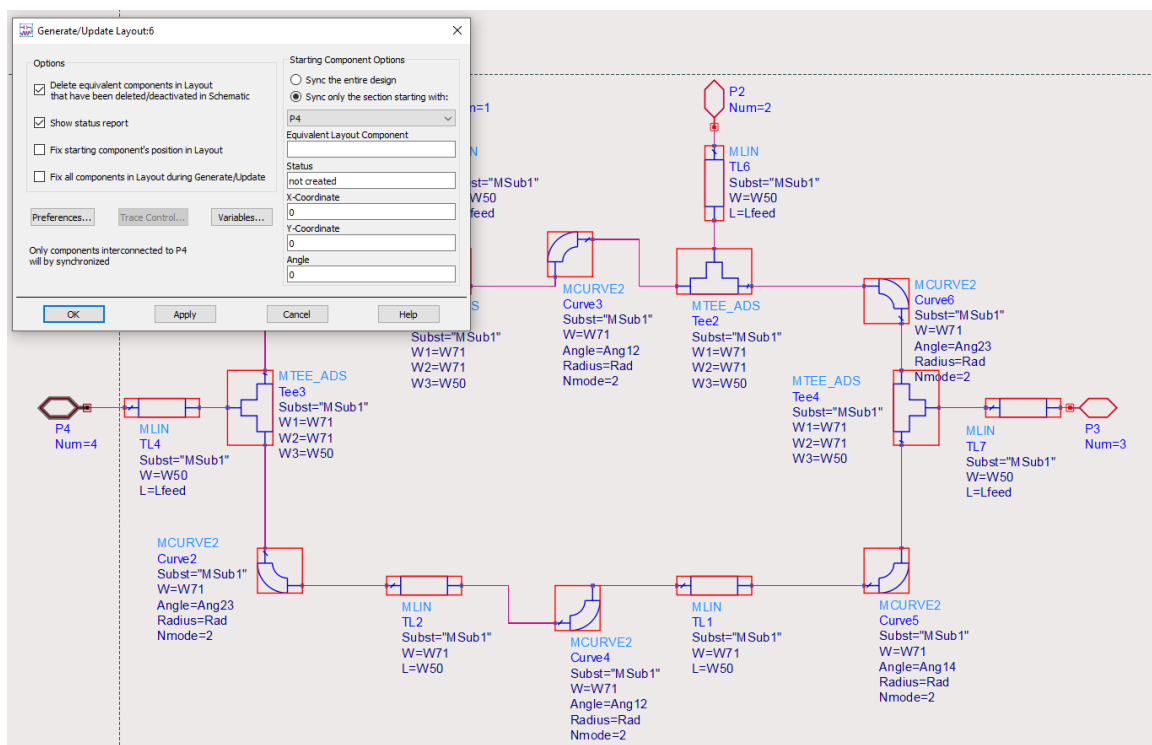
Автоматическое создание иерархий может выставить порядок пинов не в том порядке, как нам удобно. В примере съехала нумерация пинов на один. Нужно эти пины переместить в нужные места (P4 - P1 – P2 - P3 по кольцу).



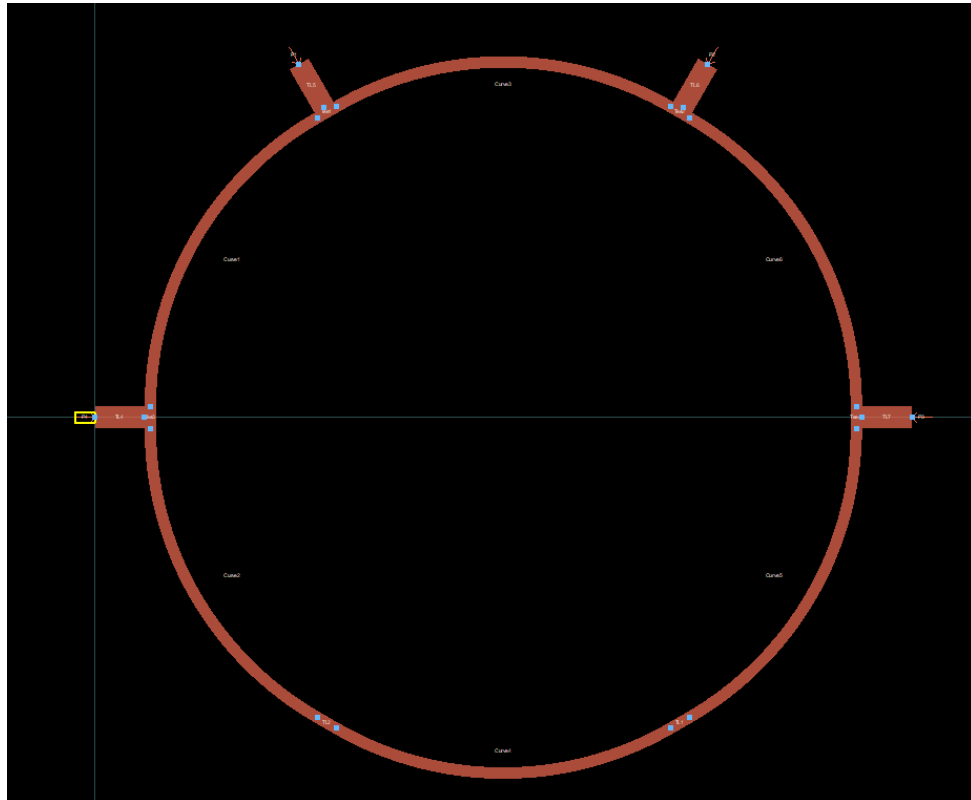
- параметризация ячейки RRCoupler_EM_Inner (для угловых размеров Ang14, Ang23 и Ang12 нужно выставить угловой тип)





Далее нужно провести генерацию топологии подсхемы RRCoupler_EM_Inner по команде Layout – Generate/Update Layout. Автоматическая генерация выбирает нижний левый компонент из схемы за исходный и строит топологию относительно него. Для сохранения визуальной чистоты сгенерированной топологии можно принудительно выбрать какой-то компонент исходным и строить топологию относительно него. Например, удобно выбрать пин P4 исходной точкой генерации. Для этого выбираем режим генерации Sync only the section starting with, в выпадающем списке выбираем пин P4 и устанавливаем ему положение (0, 0) смотрящим вправо (Angle = 0).




Дополнительно в сгенерированной топологии можно по команде Schematic – Fix Component Position зафиксировать положение пина P4. При последующих обновлениях топологии пин P4 будет иметь фиксированное положение, и остальная топология всегда будет строиться относительно него. Зафиксированные в топологии компоненты отмечаются желтым прямоугольником.



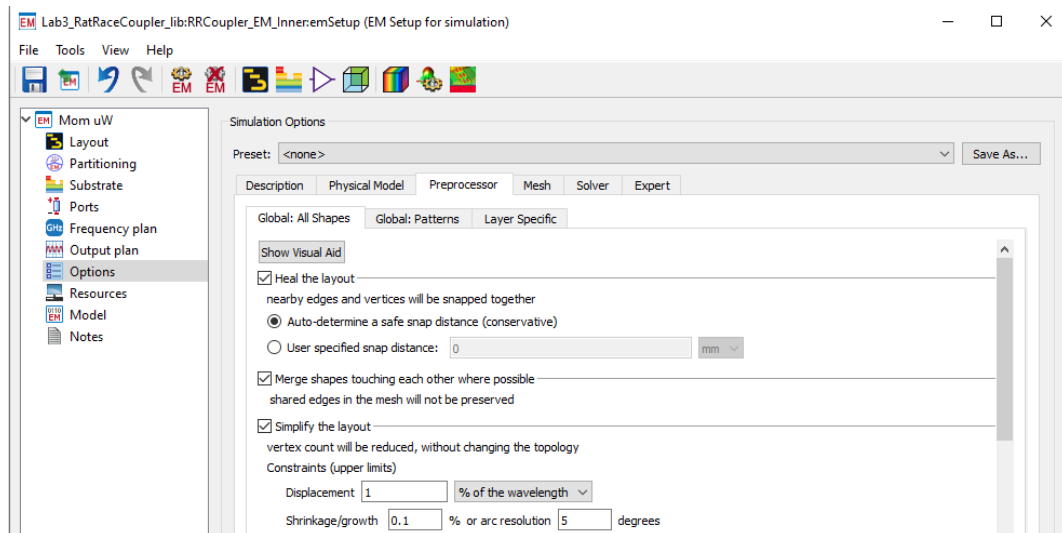
Lab1 Далее надо настроить emSetup  подсхемы RRCoupler_EM_Inner. Задать следующие настройки:

 Mom uW - метод моделирования Momentum Microwave, режим EM Simulation/Model.

 Substrate - убедиться, что привязана правильная подложка

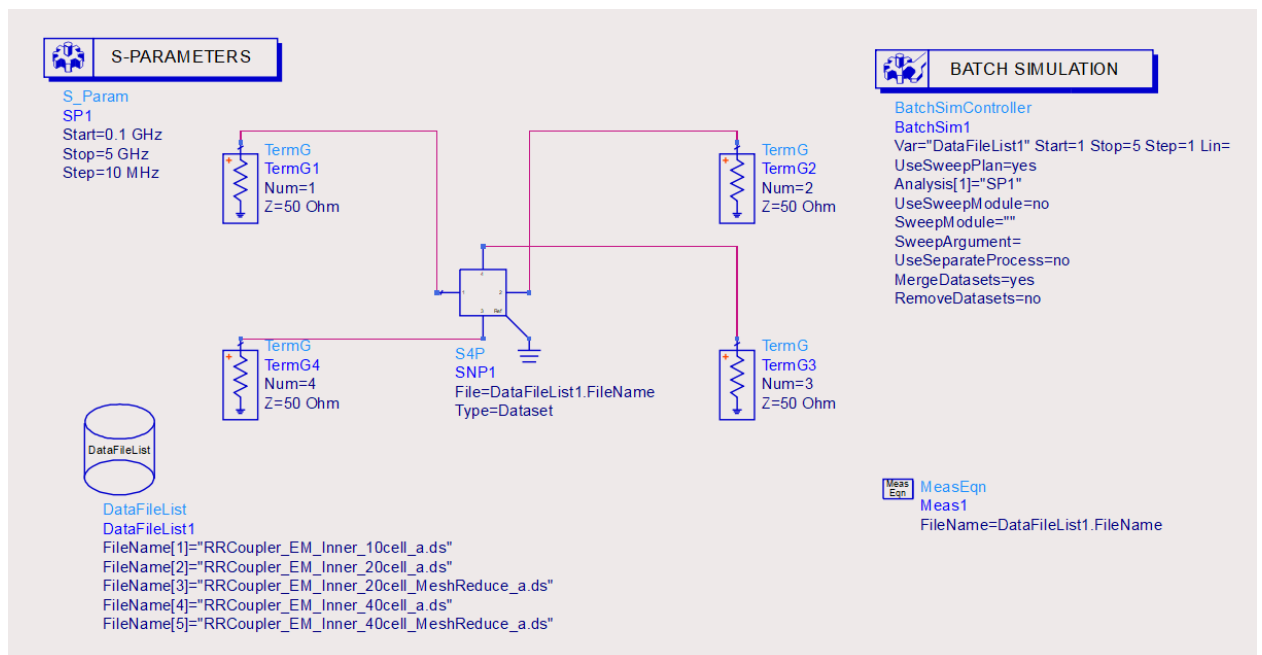
 Frequency plan - частотный план адаптивный от 0 до 5 ГГц, плюс точка 2,5 ГГц

Lab1 Далее необходимо определиться с плотностью сетки. С учетом того, что в топологии присутствуют дуги, необходимо корректно задать точность аппроксимации дуг. В настройках Options – Global: All Shapes группа Simplify the layout установить arc resolution = 5 degrees (автоматически пересчитается Shrinkage/growth).



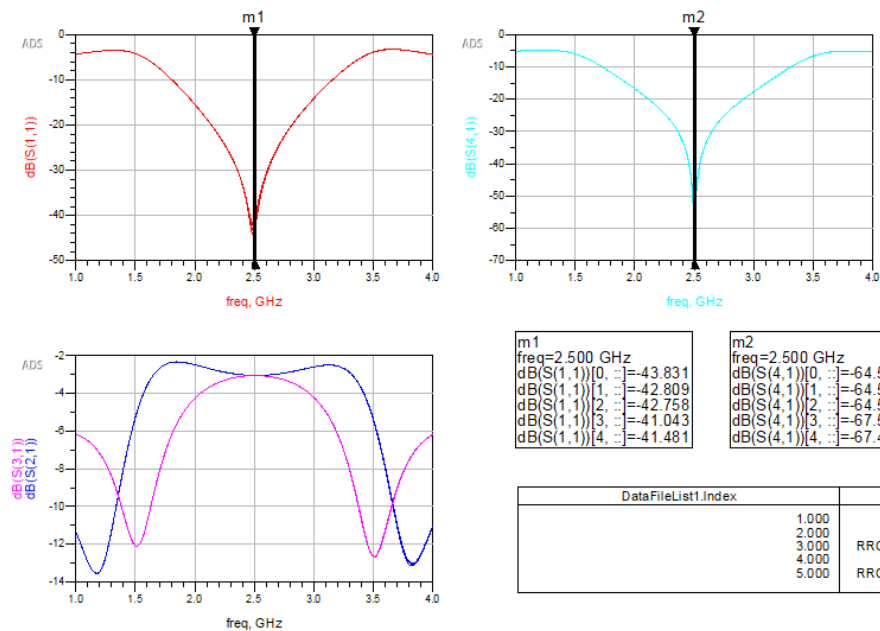
Далее выбирается необходимая плотность сетки. Изменяя параметры сетки и с сохранением в датасет с пользовательским суффиксом вида «_10cell», наберем данных на плотность сетки 10, 20 и 40 ячеек/длина волны (Options – Mesh – Cell/Wavelength) без и с упрощением сетки (Options – Mesh – Mesh reduction).

Датасеты загружены в схему RRCoupler_Mesh. Здесь для сравнения датасетов использован блок S4P и порты выставлены аналогично всей работе. Также, чтобы в области графиков удобно ориентироваться в том, какой номер индекса какому файлу соответствует, добавлено измерительное выражение MeasEqn, которое в датасет передает имя подгружаемого файла.



По результатам подбора сетки видно, что на S31 и S21 особой разницы по плотности сетки нет, а вот по S11 и S41 некоторое влияние есть. Исходя из значений на графиках остановимся на сетке 40 ячеек/длина волны с

упрощением сетки. При определении имени текущего файла данных помним, что в блоке DataFileList индексация идет с 1, а в массивах в результате с 0.



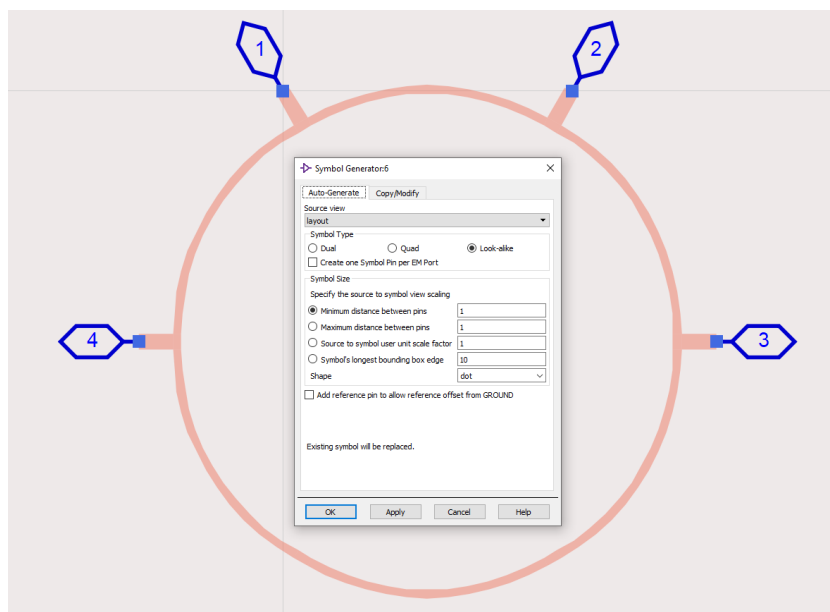
После определения параметров сетки можно донстраивать emSetup.


Output plan - отключено автоматическое отображение результатов и включено сохранение токов для всех расчетных частот.

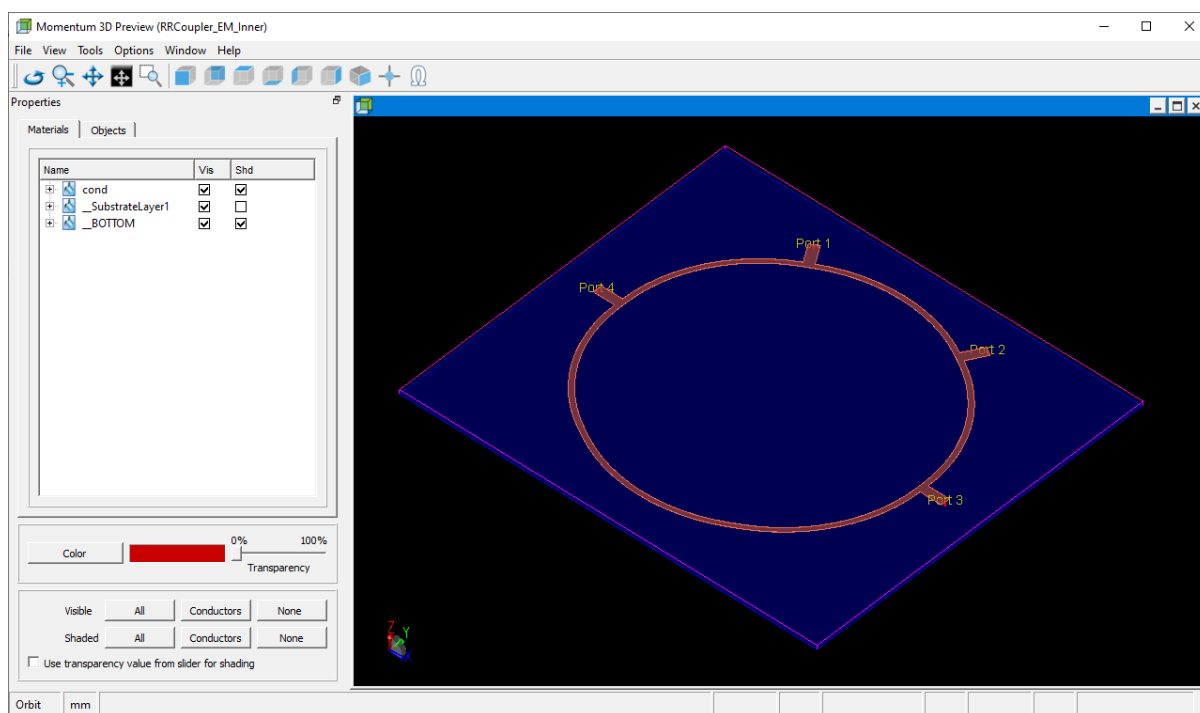
Options - Mesh с точностью 40 ячеек/длина волны, включено автоматическое создание краевой сетки и разрешено упрощение сетки


Model - включено создание и сохранение emModel

По команде Tools – Open Symbol Editor сгенерирован символ, аналогичный топологии.



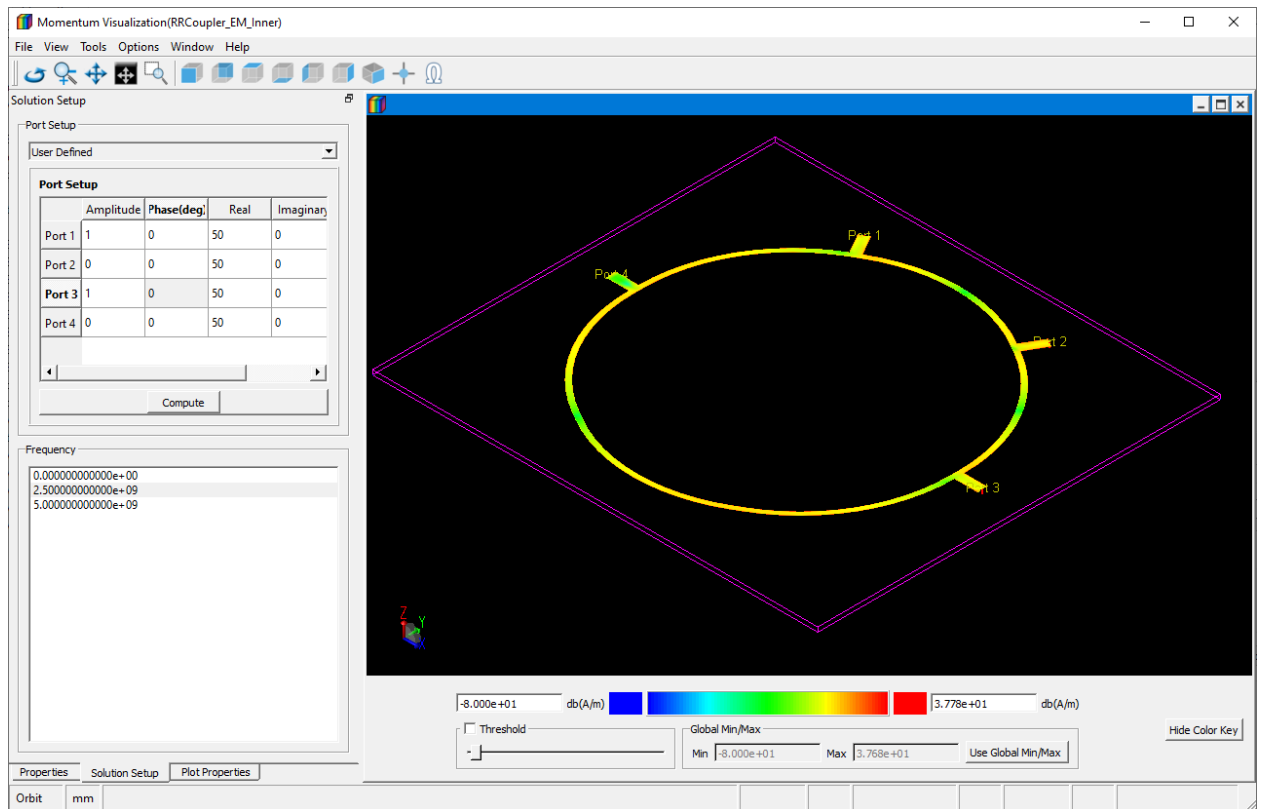
Перед запуском расчета можно по команде Tools - 3D EM Preview  вызвать отдельное окно, в котором будет показано, как будет считаться модель.



Один раз посчитаем топологию по запуску из текущего emSetup (Generate:S-Parameters). Т.к. в текущей топологии нет переходных отверстий, то посчитается она быстро. После расчета можно по команде Tools – Visualization  открыть окно визуализации результатов. Параметры отображения объектов в нем аналогичны окну 3D EM Preview. Для настройки отображения результатов (поверхностных токов), нужно выполнить две настройки. На вкладке Solution Setup выбрать порт (или комбинацию портов)

в списке Port Setup, относительно которого отображать результат и частоту отображения (список Frequency). Список частот соответствует тем частотам, для которых сохранялись поверхностные токи.

Выберем комбинированное отображение относительно портов 1 и 3 (список Port Setup = User Defined и амплитуды на портах по 1) на частоте 2,5 ГГц. На вкладке Plot Properties включим логарифмический масштаб (галка dB Scale) и включим анимацию поверхностных токов.



Видно, что на выходы 2 и 4 сигналы приходят с задержкой в 180° по отношению друг к другу. Это видно по формированию зеленых максимумов при разных значениях ползунка Phase.

Полученные данные сохранены в emModel в составе ячейки RRCoupler_EM_Inner.

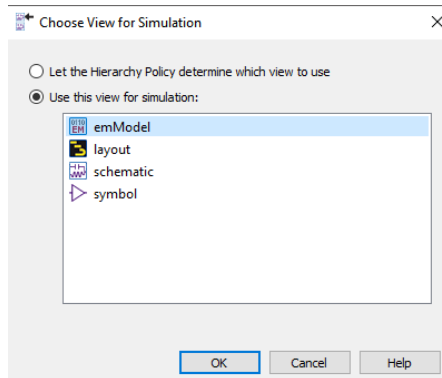
Теперь можно работать со схемой верхнего уровня RRCoupler_EM_Top. Приведем ее к следующему виду:

Lab1 - отключим MSub1, т.к. в ЕМ-анализе подложка берется из файла subst.

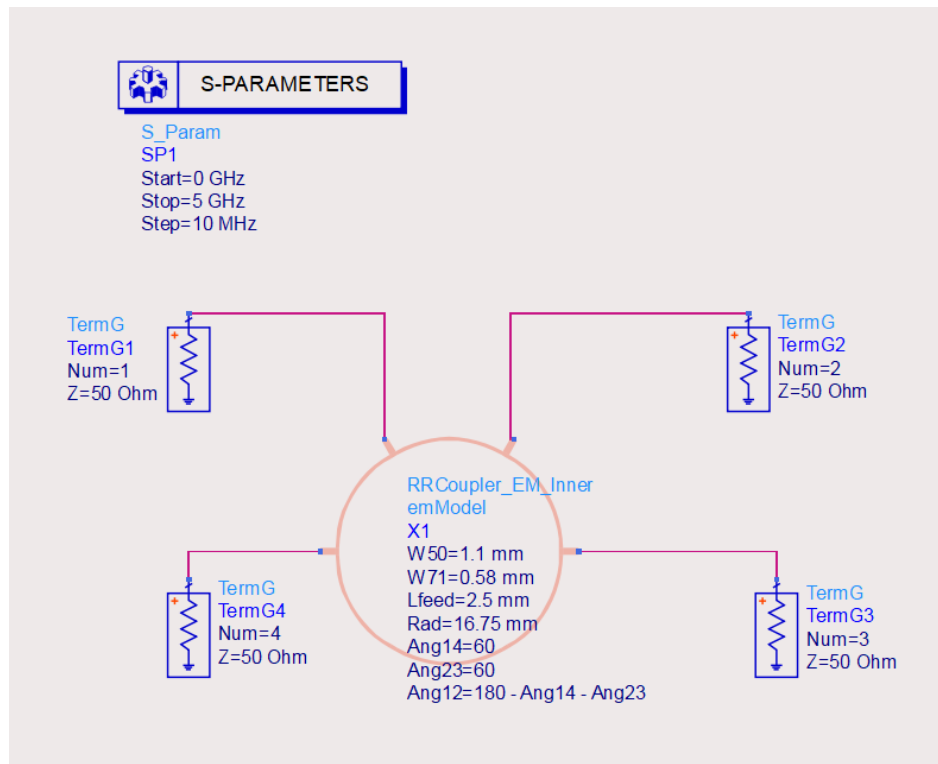
- отключим блок переменных VAR, т.к. переменные в топологию передаются через переменные ячейки.

- проконтролируем положение терминаторов, чтобы можно было сравнивать результаты с предыдущими схемами.

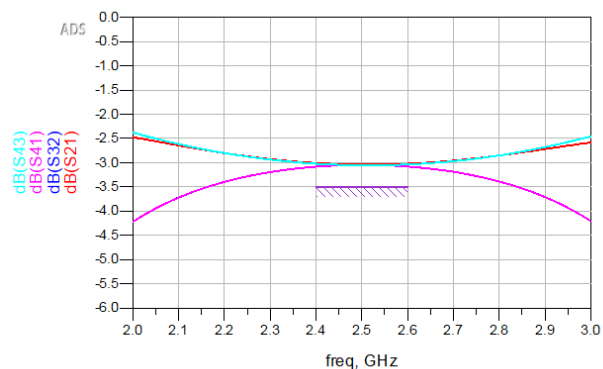
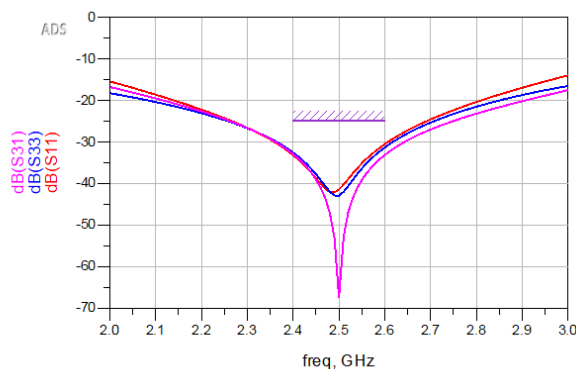
- у подсхемы топологии RRCoupler_EM_Inner по ПКМ – Component – Choose View for Simulation установим, что результаты надо брать из emModel.



Общий вид схемы RRCoupler_EM_Top получится следующий



Запускаем расчет. Характеристики по сравнению со схемотехническим анализом практически не изменились.



При необходимости можно провести настройку.

Формирователь суммарно-разностного сигнала

Кольцевой направленный ответвитель часто используется для создания суммарно-разностного сигнала, в том числе для схем смесителей. Промоделируем спроектированную ранее схему в нескольких типовых режимах (схема RRCoupler_Hybrid180).

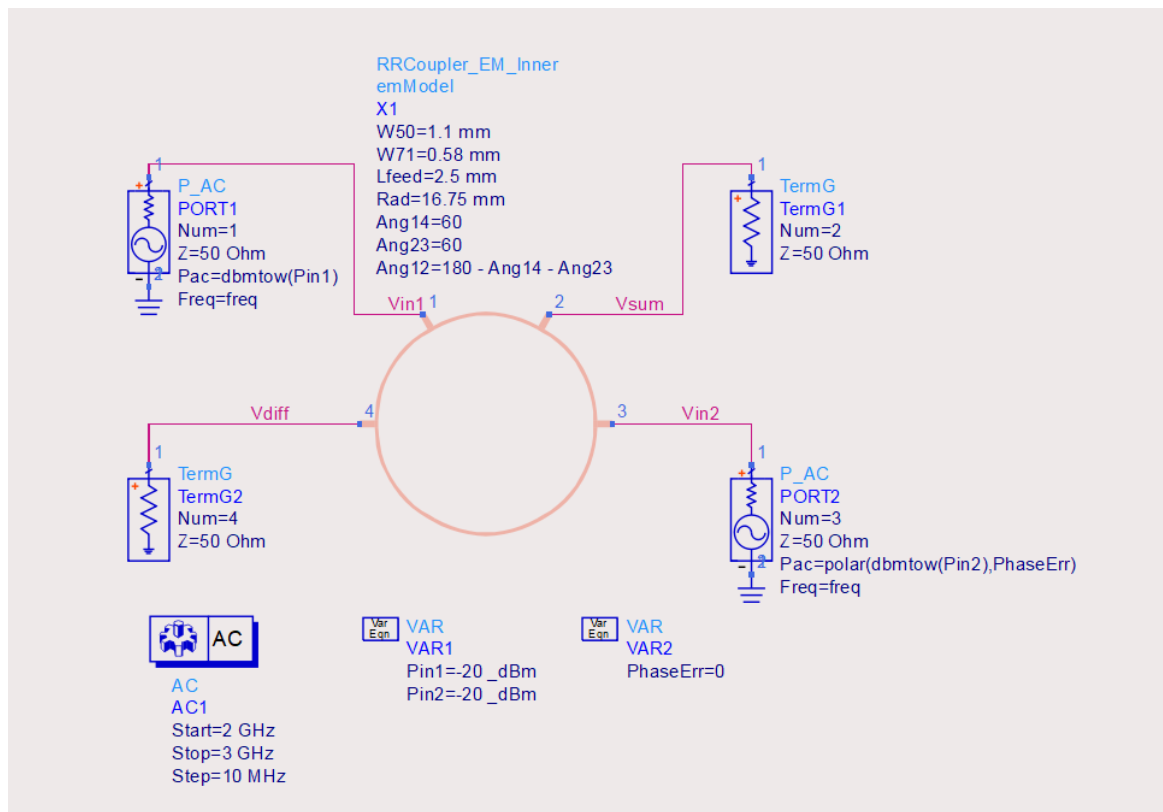
Для моделирования будем использовать результаты ЕМ-моделирования для настроенного кольцевого направленного ответвителя.

На входы Vin1 и Vin2 будем подавать сигналы. Снимать суммарный будем со выхода Vsum, разностный с выхода Vdiff.

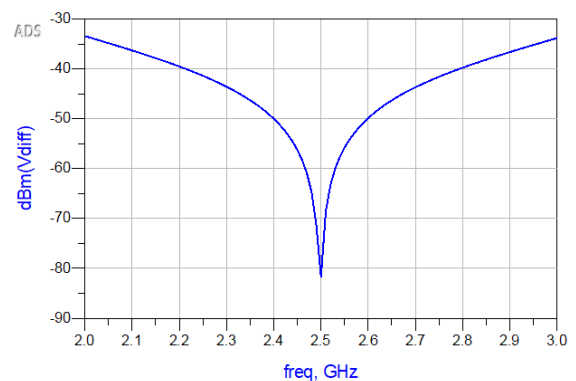
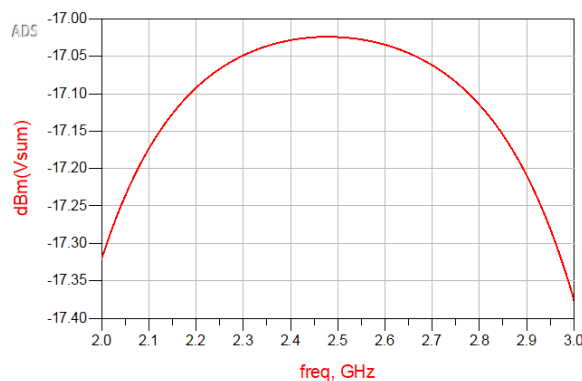
Сначала подадим на входы одинаковый синфазный сигнал. Т.к. кольцевой направленный ответвитель – устройство пассивное и линейное – то удобным методом моделирования будет АС (Small Signal Simulation). Диапазон частот, в котором посмотрим поведение – будет от 2 до 3 ГГц.

Уровни входных сигналов Pin1 и Pin2 зададим через переменные. По умолчанию обе будут равны –20 дБм. Также, для возможности исследовать влияние разбаланса фаз входных сигналов, добавим переменную PhaseErr, которую будем учитывать при указании сигнала для входа Vin2.

Схема перед запуском должна выглядеть приблизительно, как показано иже.

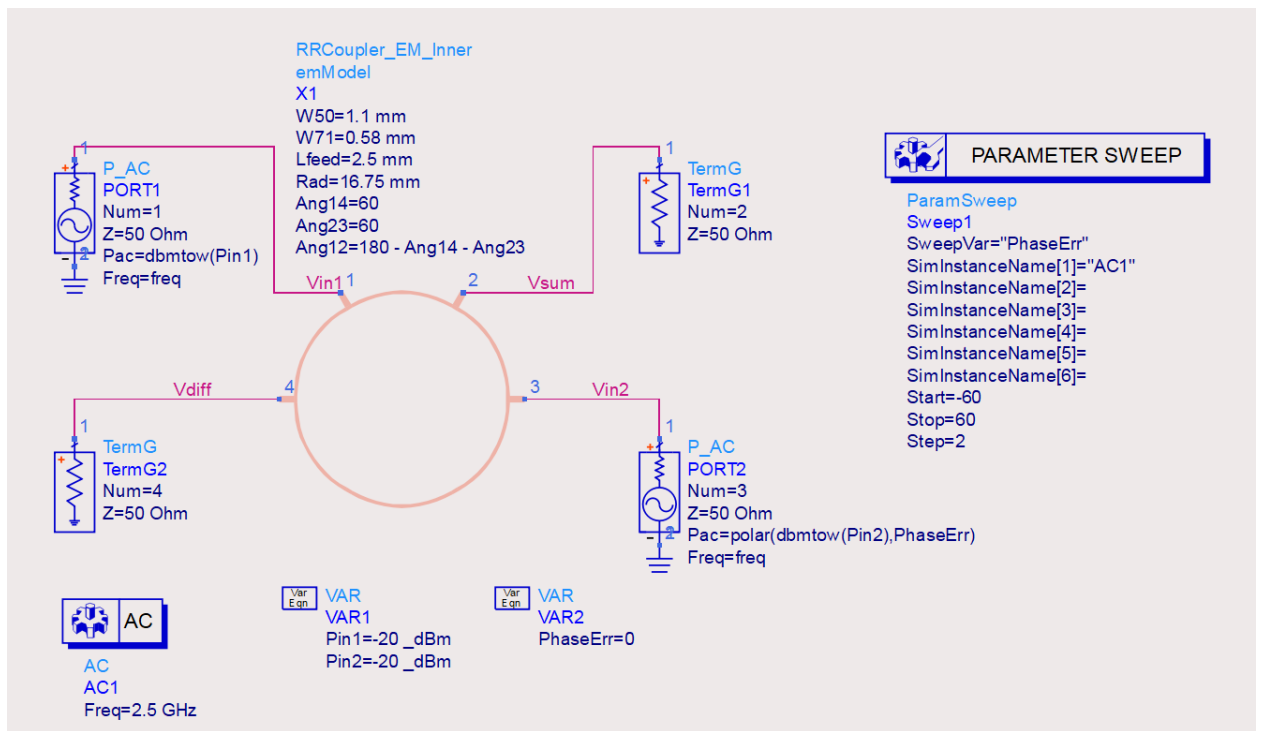


В результатах выведем мощности сигналов на выходах Vsum и Vdiff.

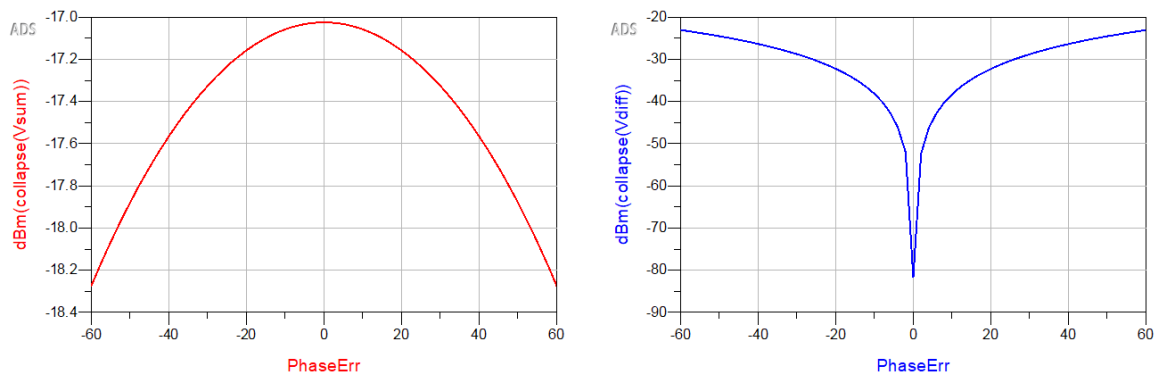


Хорошо видно, что выходной синфазный сигнал не сильно портится при уходе от рабочей частоты (2,5 ГГц). А вот на разностный влияние ухода от рабочей частоты гораздо сильнее.

Далее проверим, как будет влиять разбаланс фаз входных сигналов на центральной частоте. В контроллере АС установим расчет только на центральной частоте. А разбаланс фаз PhaseErr просвицаем в диапазоне от -60° до 60° с шагом 2° .

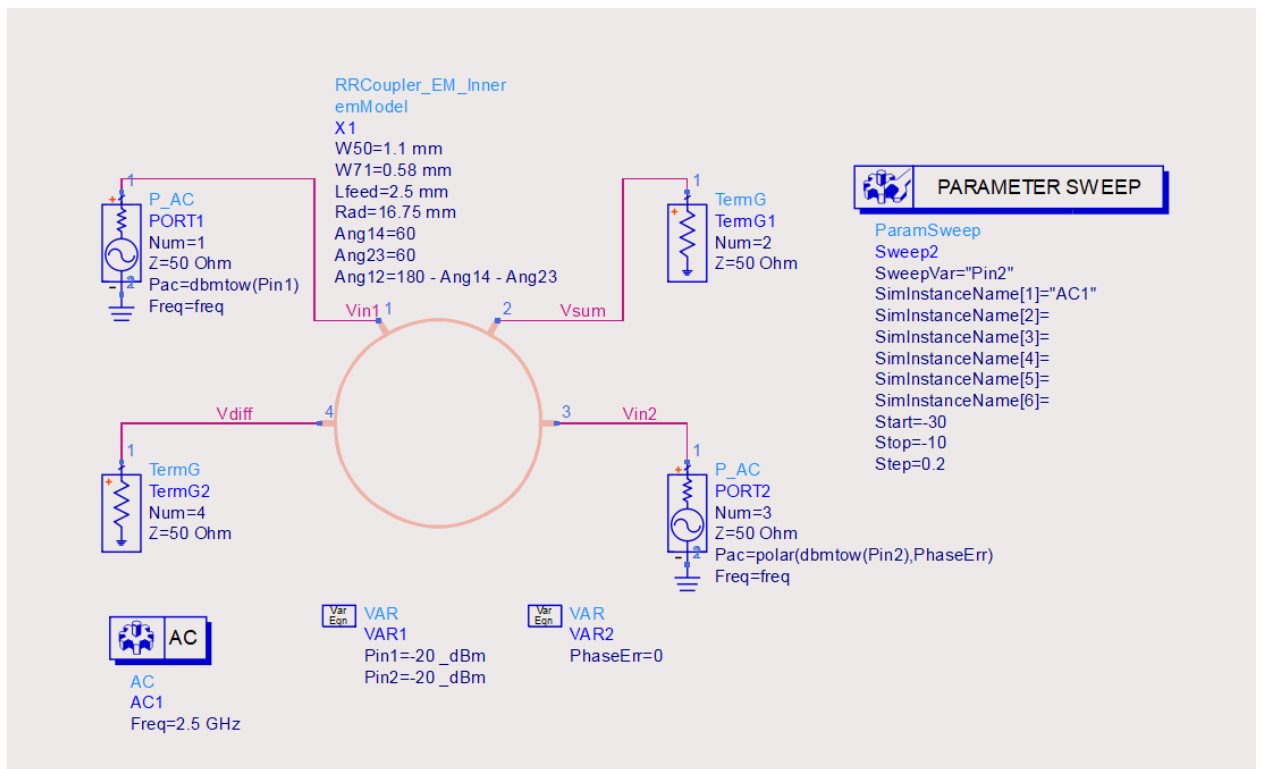


Т.к. свип по PhaseErr наложен поверх свипа по частоте freq, то результаты будут многомерными. При этом размерность независимой переменной freq равна 1, т.к. расчет проводился на одной частоте. В этом случае можно данные в графиках обернуть в функцию collapse(), которая убирает размерность независимой переменной с единственным значением.

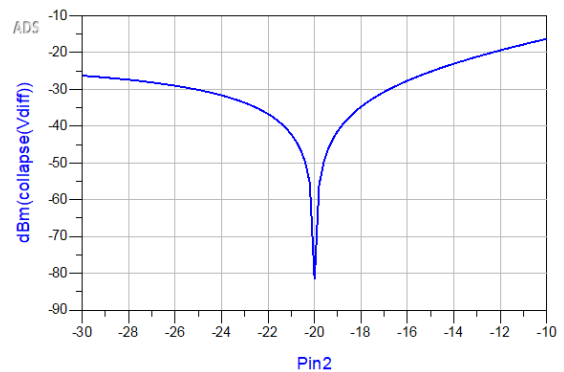
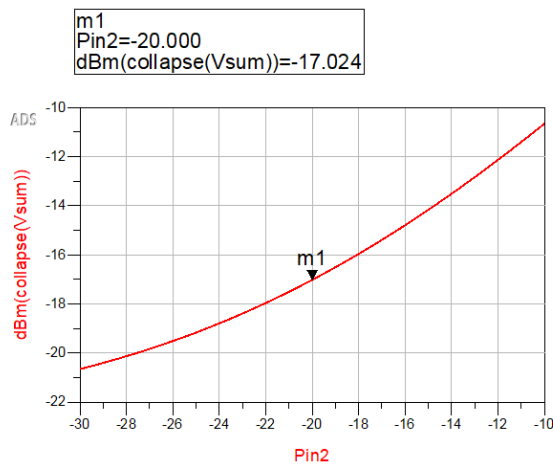


Полученные графики зависимостей выходных сигналов V_{sum} и V_{diff} очень похожи на полученные ранее при уходе от центральной частоты. Попробуйте объяснить этот факт.

Окончательно просвищаем мощность V_{in2} в диапазоне $-30..-10$ дБм, ± 10 дБ от номинального. Разбаланс фаз уберем.



Формулы для графиков останутся прежними. Если поставить маркер точно на точку, когда Vin2 такой же, как Vin1, то мощность по выходу VSum будет ровно ожидаемая суммарная (+3 дБ). В других точках суммарный сигнал определяется более мощным из Vin1 и Vin2. В разностном графике также будет глубокий провал точно при равенстве входных мощностей.



Задание на выполнение

В соответствии с вариантом рассчитать и спроектировать кольцевой направленный ответвитель на заданную частоту (F_c) и ВЧ-подложку. Провести ее настройку и исследование на схемном и топологическом уровнях.

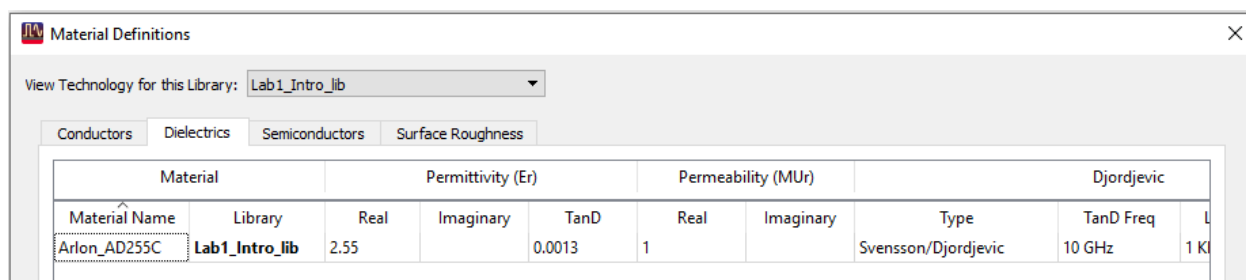
Варианты заданий приведены в таблице 1.

При выполнении ориентироваться на методику выполнения.

Таблица 1. Варианты заданий

№ Варианта		1	2	3	4	5
Центральная частота F_c , ГГц		2,2	3,0	3,8	4,6	5,4
Параметры подложки	Именование материала	FR-4	FR-4	RO4360	RO4360	RO4350B
	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r , ед.	4,5	4,5	6,15	6,15	3,66
	Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan D$, ед.	0,01	0,01	0,0038	0,0038	0,004
	Толщина диэлектрика h , мм	0,71	0,51	0,61	0,406	0,508
	Толщина металлизации t , мкм	17	35	35	17	17
№ Варианта		6	7	8	9	10
Центральная частота F_c , ГГц		6,2	7,0	7,8	8,6	9,4
Параметры подложки	Именование материала	RO4350B	RO4003C	RO4003C	RO3003	RO3003
	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r , ед.	3,66	3,55	3,55	3,0	3,0
	Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan D$, ед.	0,004	0,0026	0,0026	0,0013	0,0013
	Толщина диэлектрика h , мм	0,338	0,305	0,203	0,25	0,13
	Толщина металлизации t , мкм	17	17	35	35	17

Если материала в базе материалов ADS нет, его надо будет самостоятельно определить по кнопке Add Dielectric.



Каждый крупный этап рекомендовано делать в отдельных ячейках (схемах), т.к. при выполнении работы возможно придется возвращаться к предыдущим этапам.

Этапы выполнения:

1. Кольцевой направленный ответвитель на идеальных линиях передачи (ячейка RRCoupler_Ideal).

1.1. Составить схему для моделирования в режиме S-параметров согласующей цепи на идеальных линиях передачи.

- Компоненты брать из палитры TLines-Ideal.
- Диапазон частот моделирования брать от 0 Гц до удвоенной частоты F_c .

1.2. Промоделировать в режиме S-параметров.

- Показать, что кольцевой направленный ответвитель цепь выполняет поставленную на него задачу.
- Результаты контролировать только на центральной частоте F_c .
- Построить графики амплитудных и фазовых соотношений
- Создать теоретическую матрицу S-параметров на центральной частоте и сравнить результаты.

2. Кольцевой направленный ответвитель в микрополосковом исполнении на схемном уровне (ячейка RRCoupler_MLIN_Sch).

2.1. Создать схему кольцевого направленного ответвителя в микрополосковом исполнении на основании результатов, полученных в п.1.

- Для расчета геометрических размеров микрополосков использовать инструмент LineCalc.

- Компоненты брать из палитры TLines-Microstrip.

- Параметры подложки брать из таблицы 1.

- Дополнительно добавить 50 Омные участки длиной около 2-2,5 ширины 50 Ом-ной линии со стороны портов 50 Ом.

2.2. Провести моделирование в режиме S-параметров.

- Диапазон частот моделирования брать от 0 Гц до удвоенной частоты F_c .

- Результаты контролировать в диапазоне частот $F_c \pm 5\%$.

- Считать, что кольцевой направленный ответвитель выполняет свою задачу, если:

- а) Коэффициенты отражения S_{11} и S_{33} в рабочей полосе менее -25 дБ;

- б) Развязка S_{31} в рабочей полосе менее -25 дБ;

- в) Рабочие затухания и переходные ослабления S_{21} , S_{32} , S_{41} и S_{43} в рабочей полосе менее, чем $3,5$ дБ;

- г) Центральная частота, на которую настроен кольцевой направленный ответвитель близка к F_c (контролировать по положению провала на S_{11} , S_{33} и S_{31}).

2.3. Если кольцевой направленный ответвитель не проходит по требованиям, с помощью инструментов Tune или Optimization настроить его.

2.4. Оценить стабильность работы кольцевого направленного ответвителя как суммарно-разностного устройства (S_{21}/S_{23} и S_{41}/S_{43}) по амплитуде и по фазе.

3. Кольцевой направленный ответвитель в микрополосковом исполнении на топологическом уровне (ячейка верхнего уровня RRCoupler_EM_Top и подсхема RRCoupler_EM_Inner).

3.1. Создать параметризованную топологию кольцевого направленного ответвителя в микрополосковом исполнении с использованием результатов п.2.

- Создать определение подложки tech.subst в соответствии с методикой. Параметры брать из таблицы 1.

- Для параметризации топологии создать двухуровневую схему в соответствии с методикой.

- На уровень внутренней ячейки вынести все параметры, использованные в топологии. Численные значения параметров задавать в соответствии с результатами п.2.

3.2. Провести ЕМ-моделирование топологии.

- Метод моделирования брать Momentum Microwave.

- Результаты хранить с использованием emModel.

- Если расчет идет долго, то верхнюю границу диапазона частот моделирования можно сократить $F_c + 20\%$.

- Сравнить результаты с результатами п.2.

- Результаты контролировать в диапазоне частот $F_c \pm 5\%$.

- Считать, что кольцевой направленный ответвитель выполняет свою задачу, если выполняются требования, если:

- а) Коэффициенты отражения S_{11} и S_{33} в рабочей полосе менее -20 дБ;

- б) Развязка S_{31} в рабочей полосе менее -20 дБ;

- в) Рабочие затухания и переходные ослабления S_{21} , S_{32} , S_{41} и S_{43} в рабочей полосе менее, чем $3,5$ дБ;

- г) Центральная частота, на которую настроен кольцевой направленный ответвитель близка к F_c (контролировать по положению провала на S_{11} , S_{33} и S_{31}).

3.3. Если кольцевой направленный ответвитель не проходит по требованиям, с помощью инструментов Tune или Optimization настроить его.

4. Формирование суммарно-разностного сигнала с помощью кольцевого направленного ответвителя (ячейка RRCoupler_Hybrid180).

4.1. Подготовить схему для формирования суммарно-разностного сигнала.

- Моделирование вести в режиме AC.

- для подачи сигналов использовать источники P_AC.

- мощности входных сигналов Pin1 и Pin2, а также разбаланс фаз PhaseErr задать переменными.

- для кольцевых направленных ответвителей использовать настроенную emModel (RRCoupler_EM_Inner).

4.2. Провести исследование формирования суммарно-разностного сигнала при отстройке от рабочей полосы при одинаковых амплитудах и фазах входных сигналов Vin1 и Vin2.

- зафиксировать одинаковыми мощности входных сигналов Pin1 и Pin2, также убрать разбаланс фаз PhaseErr = 0.

- частотный диапазон моделирования указать порядка $\pm 1..3$ ГГц от центральной частоты;

- вывести графики зависимости выходных сигналов Vsum и Vdiff от частоты входных сигналов.

4.3. Провести исследование формирования суммарно-разностного сигнала на рабочей частоте и при одинаковых амплитудах, но при наличии фазового разбаланса входных сигналов Vin1 и Vin2.

- установить в контроллере AC режим расчета на одной частоте, равной центральной рабочей;

- с помощью дополнительного блока ParaSweep провести перебор разбаланса фаз PhaseErr в диапазоне $\pm 60^\circ$ с шагом не более 2° .

- вывести графики зависимости выходных сигналов Vsum и Vdiff от разбаланса фаз и объяснить схожесть кривых с результатов п.4.2.

4.4. Провести исследование формирования суммарно-разностного сигнала на рабочей частоте и при одинаковых фазах входных, но при наличии амплитудного разбаланса входных сигналов Vin1 и Vin2.

- в блоке ParaSweep провести перебор разбаланса амплитуд через измерение амплитуды Pin2 в диапазоне ± 10 дБ от номинального.

- вывести графики зависимости выходных сигналов Vsum и Vdiff от разбаланса амплитуд.

Требования к отчёту

Отчет о выполненной лабораторной работе 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 лабораторной 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.

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 лабораторной работы и подготовки отчета, отчет и архив проекта надо выложить в ОРИОКС в домашнее задание в дисциплину, привязав к контрольному мероприятию ЗЛР (Защита лабораторных работ). Именование отчета и архива проекта должно давать возможность точно понять, к какой теме лабораторной работы они относятся (Например, AFU_Lab_RRCoupler вместо непонятного Lab3 или Workspace3).

Задание на самостоятельную работу

1) Подготовка к лабораторному занятию

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо продумать шаблон отчета, при необходимости внести краткие теоретические сведения, продумать и наметить количество, вид и расположение таблиц и графиков с измеренными данными. Для получения допуска необходимо подробно изучить теоретический материал.

2) С использованием навыков, полученных в лабораторной работе, выполнить соответствующий этап курсового проекта.

Контрольные вопросы

1. Какая размерность матрицы S -параметров кольцевого направленного ответвителя? Какие есть особенности у этой матрицы?
2. Что такое рабочее затухание кольцевого направленного ответвителя? Как она определяется из матрицы S -параметров?
3. Что такое переходное ослабление кольцевого направленного ответвителя? Как она определяется из матрицы S -параметров?
4. Что такое развязка (изоляция) кольцевого направленного ответвителя? Как она определяется из матрицы S -параметров?
5. Что такое направленность кольцевого направленного ответвителя? Как она определяется из матрицы S -параметров?
6. Как с помощью кольцевого направленного ответвителя можно сформировать суммарно-разностный сигнал? Какие требования при этом нужно наложить на кольцевой направленный ответвитель?
7. В какой части диаграммы Смита на графике S_{11} должна находиться точка, близкая к рабочей частоте кольцевого направленного ответвителя? Нумерация портов соответствует используемой в работе.
8. Пусть у вас рассчитаны физические размеры микрополосковой линии (электрическая длина 90° , волновое сопротивление 71 Ом) на выбранной подложке на рабочей частоте. Покажите, как нужно рассчитывать геометрические размеры дуг в проектируемом гибридном кольцевом направленном ответвителе.
9. Какие электрические длины должны быть у участков в гибридном кольцевом направленном ответвителе?
10. Какие волновые сопротивления должны быть у участков в гибридном кольцевом направленном ответвителе?
11. Как с помощью кольцевого направленного ответвителя сформировать суммарно-разностный сигнал?
12. Почему выходные сигналы при формировании суммарно-разностного сигнала имеют схожий характер при отстройке по частоте и разбалансе фаз?

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.
2. Microwave Engineering, 4th Edition, David M. Pozar, 2011, ISBN 978-0470631553.

Перечень ресурсов сети «Интернет»

3. 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>
4. База знаний Образовательного центра Keysight EEsof EDA Knowledge Center, доступен после свободной регистрации, <http://edadocs.software.keysight.com/display/support/Knowledge+Center>
5. Тематический раздел «Rf & Microwave Design» форума electronix.ru, доступен после свободной регистрации, <https://electronix.ru/forum/index.php?showforum=63>
6. Интернет-энциклопедия разработчиков СВЧ-аппаратуры «Microwaves101» <https://www.microwaves101.com>

Каналы Youtube с видеоуроками по Keysight Advanced Design System

7. Канал youtube образовательного центра Keysight EEsof EDA <https://www.youtube.com/user/KeysightEESOF>
8. Канал youtube Anurag Bhargava образовательного центра <https://www.youtube.com/user/BhargavaAnurag>
9. Канал youtube Keysight EEsof EDA Field <https://www.youtube.com/c/EEsofAETips>

Разработчик:

Ст. преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.