

Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению лабораторной работы

**«Синтез и анализ микрополосковых устройств
распределения СВЧ мощности»**

по дисциплине

«Основы автоматизации проектирования РЭА СВЧ»

для студентов дневной и заочной форм обучения

специальности 7.090.701 - Радиотехника

Севастополь

2003

УДК 621.317.08(075.8)

Методические указания по выполнению лабораторной работы «Синтез и анализ микрополосковых устройств распределения СВЧ мощности». /Сост. В.В. Вертегел. - Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. - 19 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам в изучении автоматизации проектирования устройств распределения СВЧ мощности с помощью пакета Microwave Office 2002. Излагаются основные теоретические сведения об устройствах распределения мощности, программа и методика исследований, контрольные вопросы, требования к содержанию отчета.

Методические указания предназначены для студентов дневной и заочной форм обучения по специальности 7.090.701 - Радиотехника в рамках дисциплины «Основы автоматизации проектирования РЭА СВЧ».

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники
№ ____ от _____ 2003 г.

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний

Рецензент: В. Г. Слезкин, канд. техн. наук, доцент

Содержание

1. Цель работы	4
2. Теоретические сведения	4
3. Программа и методика исследований	9
4. Содержание отчета	12
5. Контрольные вопросы	12
Библиография	12
Приложение 1. Схема Т-разветвления микрополосковой линии	13
Приложение 2. Схема кольцевого делителя мощности.....	14
Приложение 3. Схема четырехканального делителя мощности	15
Приложение 4. Схема кольцевого гибридного моста	16
Приложение 5. Параметры используемых в работе топологических элементов	17
Приложение 6. Синтаксис и математические функции Microwave Office 2002	19

1. Цель работы

Целью лабораторной работы является ознакомление с принципами автоматизированного проектирования микрораспределителей СВЧ мощности с помощью программы Microwave Office 2002.

2. Теоретические сведения

В системах связи и навигации, многоканальных антенных системах, измерительной технике широко применяются СВЧ устройства распределения мощности: делители и сумматоры мощности. На их основе строятся многоканальные системы распределения мощности, а также другие функциональные СВЧ устройства: смесители, электроуправляемые аттенуаторы, коммутаторы, дискретные фазовращатели, усилители мощности и пр.

Делителем мощности называют устройство, предназначенное для разделения (распределения) мощности, поступающей от одного источника между двумя или несколькими каналами.

Сумматор - устройство, которое выполняет обратную задачу - сложение мощностей, поступающих из двух или нескольких каналов, на общей нагрузке. Поскольку сумматор выполняет функцию, обратную делителю, то делителями и сумматорами в большинстве случаев являются устройства с идентичными конструкциями (топологиями).

Простейшим является делитель мощности на два канала. В СВЧ системах широкое распространение получили многоканальные делители, которые, как правило, строятся на основе двухканальных делителей мощности.

Основные параметры, с помощью которых можно оценивать и сравнивать делители:

- **коэффициент стоячей волны (КСВ)**

$$КСВ = \frac{1 + |S_{ii}|}{1 - |S_{ii}|},$$

где S_{ii} - комплексный коэффициент отражения i -го плеча делителя;

- **модуль коэффициента передачи** из плеча j в плечо i , в децибелах:

$$L_{ij} = 20 \lg |S_{ij}|^{-1},$$

где S_{ij} - комплексный коэффициент передачи из плеча j в плечо i .

Если индексы j, i относятся к выходным плечам делителя, то L_{ij} называют **развязкой** между плечами i, j ;

- **аргумент коэффициента передачи** (фаза коэффициента передачи)

$$\varphi_{ij} = \arg S_{ij} = \arctg \frac{\operatorname{Im} S_{ij}}{\operatorname{Re} S_{ij}}.$$

Так как длина канала делителя может быть значительной, то для оценки фазочастотной характеристики (ФЧХ) делителя можно пользоваться параметром, определенным как разность между аргументом коэффициента передачи канала делителя и аргументом коэффициента передачи линии, длина которой равна длине канала делителя,

$$\Delta\varphi = \varphi_{ij} - \varphi_{\text{линии}};$$

- **неравномерность амплитуды коэффициента передачи** в полосе частот

$$\Delta L = 20 \lg \frac{|S_{ij}|_{\min}}{|S_{ij}|_{\max}},$$

где $|S_{ij}|_{\min}, |S_{ij}|_{\max}$ - минимальное и максимальное значения амплитуды коэффициента передачи в диапазоне частот;

- **коэффициент деления по напряжению**

$$K_{\partial U} = \frac{|S_{12}|}{|S_{13}|};$$

- **коэффициент деления по мощности** $K_{\partial P} = K_{\partial U}^2$;
- **распределение мощности между каналами** многоканальной СРМ;
- **линейность ФЧХ коэффициента передачи** канала делителя.

Для количественной оценки линейности ФЧХ используют параметр $\Delta\Psi$, показывающий абсолютное отклонение ФЧХ от линейной.

При проектировании микросхемного устройства к делителю предъявляют следующие требования: функциональ-

ное назначение (например, в качестве балансного моста, ответвление части мощности или деление в требуемом отношении, суммирование, распределение мощности между излучателями антенной решетки); полоса частот, в которой сохраняются заданные количественные значения KCB_i , L_{ij} , Φ_{ij} , $\Delta\Phi$, ΔL , $\Delta\Psi$, $K_{\partial P}$; амплитудно- и фазочастотные характеристики (постоянство разности фаз между выходными каналами, ограничения на разбросы амплитуд и фаз между выходными каналами, допустимые изменения амплитудно- и фазочастотных характеристик коэффициентов передачи каналов при механических и климатических воздействиях); мощность, передаваемая по делителю; конструктивные характеристики (расположение входов и выходов, минимальные габаритные размеры и т. д.); количество выходных каналов; распределение мощности между выходными каналами; специальные требования.

Делители (сумматоры) СВЧ мощности могут быть **ненаправленными** и **направленными**. Основное отличие направленных делителей (сумматоров) мощности от ненаправленных заключается в существенно большей развязке между каналами.

Наиболее распространенными в полосковом исполнении являются делители мощности в виде Т- или Y- разветвлений симметричных полосковых и микрополосковых линий, кольцевых делителей мощности (КДМ), кольцевых и шлейфных мостов, ответвителей на связанных линиях.

Параллельное разветвление линий передач. Простейшим двухканальным делителем мощности является Т-разветвление полосковой линии (рис. 1). Разветвление содержит три линии. Поскольку векторы напряженности электрического поля в основной (1) и разветвленных (2, 3) линиях имеют одно и то же направление, а магнитное поле делится между ветвями, то такое соединение называют параллельным.

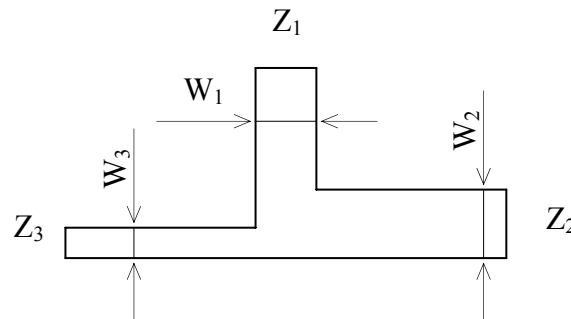


Рисунок 1.- Т-разветвление полосковой линии

Коэффициенты матрицы рассеяния разветвления линий передачи определяются соотношениями

$$\left. \begin{aligned} S_{kk} &= \left(2 - Z_k \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i} \right) \left(Z_k \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i} \right)^{-1} e^{-2\beta_k l_k}; \\ S_{km} &= 2 \sqrt{\frac{Z_k}{Z_m}} \left(Z_k \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i} \right)^{-1} e^{-(\beta_k l_k + \beta_m l_m)}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где n - количество линий передач в разветвлении; Z_i - волновое сопротивление i -й линии; l_i - геометрическая длина i -й линии; β_i - постоянная распространения i -й линии.

Из соотношений (1) для двухканального разветвления (рис. 1.) коэффициенты деления определяются соотношениями

$$K_{\partial U} = \frac{|S_{12}|}{|S_{13}|} = \sqrt{\frac{Z_3}{Z_2}}, \quad K_{\partial P} = \frac{|S_{12}|^2}{|S_{13}|^2} = \frac{Z_3}{Z_2}, \quad (2)$$

а условие идеального согласования k -го плеча этого делителя мощности определяются следующей формулой

$$S_{kk} = 0 = 2 - Z_k \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right). \quad (3)$$

Из формулы (3) вытекают следующие свойства двухканального разветвления линии: идеального согласования можно достигнуть только в одном плече; идеальная развязка между выходными каналами недостижима.

На практике часто применяются делители мощности с коэффициентом деления $K_{\partial P}=1$ и волновыми сопротивлениями всех плеч, равными волновому сопротивлению основной линии Z_0 . В этом случае одновременное согласование всех трех плеч приводит к развязке между какими либо плечами. Однако со стороны одного или двух плеч такие тройники могут быть согласованы с помощью ступенчатых согласующих трансформаторов (рис. 2).

Выбирая закон изменения волнового сопротивления трансформатора, можно обеспечить требуемую частотную характеристику делителя. Наибольшее применение нашли чебышевская и максимально-плоская характеристики.

Расчет такого тройника включает расчет регулярной линии и ступенчатого трансформатора. В простейшем случае используют одноступенчатый трансформатор с волновым сопротивлением $Z_{01} = Z_0 / \sqrt{2}$. Для компенсации паразитных емкостей в месте сочленения линий можно использовать клинообразный вырез, глубина которого подбирается экспериментально.

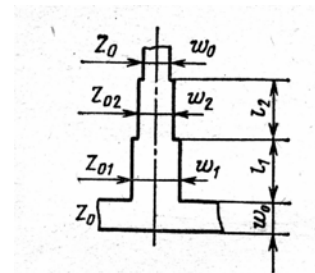


Рисунок 2.- Тройник полосковой линии с двухступенчатым согласующим трансформатором.

Кольцевой делитель мощности

Кольцевым делителем мощности (КДМ) называется устройство, предназначенное для деления мощности подводимых сигналов на две части (два канала) и обеспечивающее развязку между каналами. Кольцевые делители могут быть реализованы на полосковых и микрополосковых линиях передачи; различные топологические варианты делителей показаны на рис. 3.

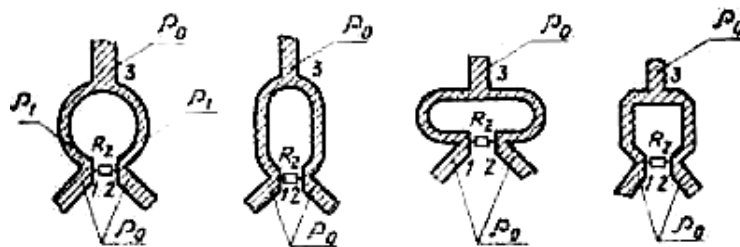
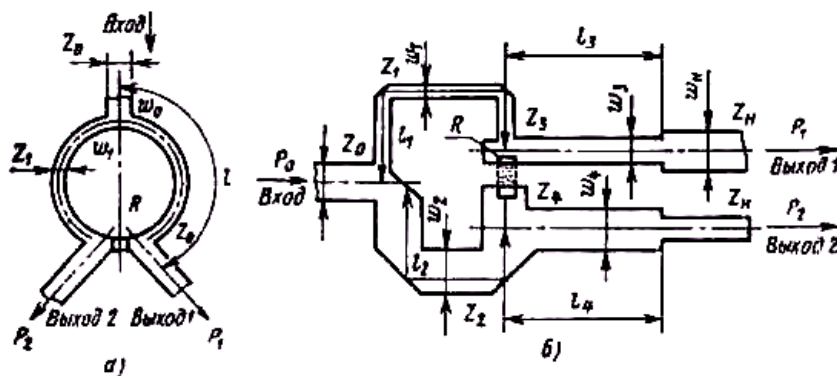


Рисунок 3.- Топологические варианты центральных проводников кольцевых делителей мощности на полосковых линиях.

Широкое применение в микрополосковой технике нашли направленные кольцевые делители мощности с различными коэффициентами деления (рис.4).



При соответствующем выборе волновых сопротивлений четвертьволновых отрезков делителя (сумматора) можно обеспечить заданное деление мощности (или соответствующее сложение заданных мощностей).

Идеальное согласования всех трех плеч кольцевого делителя с равным делением мощности ($S_{11} = S_{22} = S_{33} = 0$) и идеальная развязка между вторым и третьим плечами ($L_{23} = \infty$) имеет место в том случае, если

$$Z_1 = \sqrt{2}Z_0, \quad R = 2Z_0. \quad (4)$$

Развязывающее сопротивление R выполняется либо в виде тонкопленочного резистора, либо в виде сосредоточенного безкорпусного (SMD) резистора необходимой мощности. Длина полукольца выбирается равной

$$l = \lambda_{cp.} / 4 \sqrt{\epsilon_{эф.}}. \quad (5)$$

где $\lambda_{cp.} = c/f_{cp.}$ - длина волны в свободном пространстве на средней частоте заданного диапазона,

$\epsilon_{эф.}$ - эффективная диэлектрическая проницаемость подложки.

Кольцевой делитель (сумматор) мощности обеспечивает хорошую развязку между выходными (входными) плечами, хорошее согласование всех плеч, малые потери энергии в широкой полосе частот и обладает небольшими линейными размерами. Типовые параметры делителя следующие: в полосе частот $f_{max}/f_{min} = 1.4$, $KCB \leq 1.22$, развязка выходных плеч более 20 дБ.

Кольцевые делители могут быть изготовлены и для неравного деления мощности, $P_1/P_2 = K_{\partial P} = K_{\partial U}^2 \neq 1$. В одном из таких делителей (рис. 5, б) длины полуколец остаются равными четверти длины волны в линии, а их волновые сопротивления соответственно равны

$$Z_1 = \sqrt{K_{\partial U}(K_{\partial U}^2 + 1)} \cdot Z_0, \quad Z_2 = \sqrt{(K_{\partial U}^2 + 1)/K_{\partial U}^3} \cdot Z_0. \quad (6)$$

В выходных плечах располагают четвертьволновые согласующие трансформаторы с волновыми сопротивлениями

$$Z_3 = \sqrt{K_{\partial U}Z_0Z_n}, \quad Z_4 = \sqrt{Z_0Z_n/K_{\partial U}}, \quad (7)$$

где Z_n - сопротивление нагрузки выходного канала плеча делителя.

Развязывающее сопротивление определяется по формуле

$$R = Z_0(K_{\partial U}^2 + 1)/K_{\partial U}. \quad (8)$$

Для такого типа делителей мощности коэффициент деления $K_{\partial P}$ должен быть не более четырех. При большем соотношении мощностей делитель трудно согласовать с входными линиями.

Выше при описании работы КДМ предполагалось, что резистор R является «точечным». На практике длина участка включения резистора конечна и иногда бывает соизмерима с длиной волны в линии передачи. В этом случае необходимо учитывать набег фазы на резисторе R , значение которого определяется физическими параметрами самого резистора и параметрами подложки. На практике дополнительный набег фазы на резисторе компенсируют путем увеличения длины кольцевого участка делителя.

Мостовые схемы

Из мостовых схем в микрополосковой технике наибольшее распространение получили гибридные кольца и шлейфные мосты. На их основе строятся балансные СВЧ смесители, схемы сложения и деления мощностей.

Гибридный кольцевой мост (рис. 5) состоит из линии, свернутой в кольцо с волновыми сопротивлениями Z_1 и Z_2 . В точках 1 ... 4 в кольцевой мост включены линии с волновыми сопротивлениями Z_0 . Эти линии являются входами и выходами моста. Расстояние между входами равно $\lambda_{л0}/4$ и $3\lambda_{л0}/4$ ($\lambda_{л0}$ - длина волны в кольцевой линии на центральной частоте).

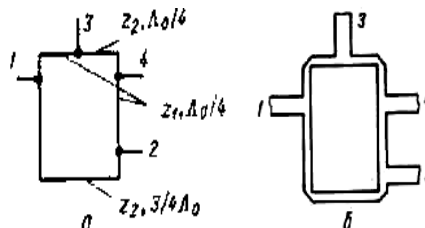


Рисунок 5.- Схема (а) и топология токоведущего проводника (б) кольцевого гибридного моста

Кольцевой мост работает следующим образом. При возбуждении моста с любого из плеч по кольцевой линии распространяются две электромагнитные волны навстречу друг другу. Сечения, где электромагнитные волны синфазны или противофазны, соответствуют местам подключения входных (выходных) линий. Таким образом, при возбуждении моста с плеча 1 сигналы поступают в плечи 2 и 3 и сдвинуты друг относительно друга на 180° , в плечо 4 сигнал не поступает. При возбуждении моста с плеча 2 сигналы поступают в плечи 1 и 4 и сдвинуты друг относительно друга на 180° , в плечо 3 сигнал не поступает. При возбуждении моста с плеча 3 в плечи 1 и 4 поступают синфазные сигналы, в плечо 2 сигнал не поступает. При возбуждении моста с плеча 4 в плечи 2 и 3 поступают синфазные сигналы, в плечо 1 сигнал не поступает. Естественно, что такое распространение возбуждающего сигнала возможно при соответствующем выборе волновых сопротивлений кольцевой цепи и только для центральной частоты, на которой обеспечиваются указанные разности фаз выходных сигналов.

Условие идеального согласования всех плеч кольцевого моста для центральной частоты

$$1 - \left(\frac{Z_0}{Z_1} \right)^2 - \left(\frac{Z_0}{Z_2} \right)^2 = 0. \quad (9)$$

При выполнении условия (9) справедливы следующие соотношения

$$\left. \begin{aligned} S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} &= 0; \\ S_{12} = S_{21} = -S_{34} = -S_{43} &= j Z_0 / Z_1; \\ S_{13} = S_{31} = S_{24} = S_{42} &= -j Z_0 / Z_2. \end{aligned} \right\}$$

Модули комплексных коэффициентов передачи из плеча 2 в плечо 1 и из плеча 3 в плечо 1 находятся соответственно по формулам

$$|S_{12}| = \frac{Z_0}{Z_1}, \quad |S_{13}| = \frac{Z_0}{Z_2}. \quad (10)$$

При заданном коэффициенте деления по напряжению $K_{\partial U} = \frac{|S_{12}|}{|S_{13}|} = \frac{Z_2}{Z_1}$ могут быть найдены волновые сопротивления кольцевых линий

$$Z_1 = \sqrt{K_{\partial U}^2 + 1} \cdot Z_0, \quad Z_2 = \frac{\sqrt{K_{\partial U}^2 + 1}}{K_{\partial U}} \cdot Z_0. \quad (11)$$

Многоканальные делители мощности.

Алгоритм расчета многоканальных делителей мощности

Многоканальные делители, или системы распределения мощности (СРМ), выполняют на основе разветвлений линий передачи либо состоят из двухканальных элементов деления. СРМ бывают параллельного (рис. 6, а), последовательного (рис. 6, б) и смешанного (рис. 6, в) типов.

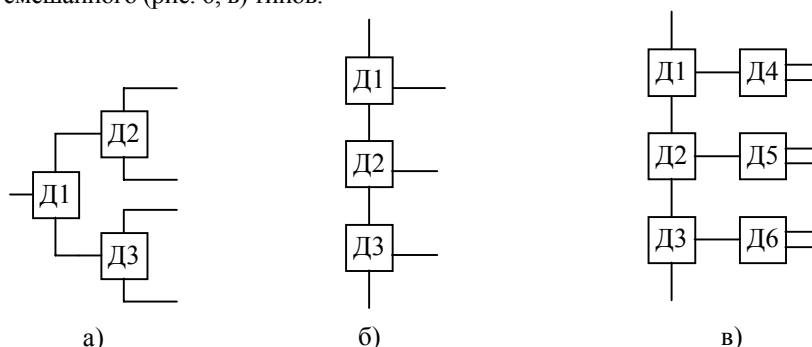


Рисунок 6.- Структурные схемы СРМ параллельного (а), последовательного (б), смешанного (в) типов

При проектировании многоканальных делителей выполняют следующие этапы. По заданному количеству выходных каналов выбирают схемы всех вариантов делителя. При этом определяют расположение каждого двухканального элемента деления и линий передач, объединяющих двухканальные элементы в многоканальный делитель. По заданному закону распределения мощности между выходными каналами определяют мощность на каждом из выходов многоканального делителя. По мощности на выходах многоканального делителя вычисляют пара-

метры двухканальных элементов деления, по которым можно судить о возможности использования двухканального элемента в многоканальном делителе. Одним из таких параметров является коэффициент деления. По коэффициенту деления выбирают двухканальные элементы. Рассчитывают частотные характеристики, электрические параметры и геометрические размеры всех вариантов многоканального делителя. С учетом технико-экономических требований выбирают оптимальный вариант делителя.

3. Программа и методика исследований

Задание № 1. Синтезировать и исследовать делитель мощности в виде Т-разветвления микрополосковой линии, параметры которого определяются вариантом, выбранным в соответствии с двумя последними цифрами номера зачетной книжки (таблицы 1, 2).

Таблица 1

Параметр	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Средняя частота диапазона (ГГц)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Полоса частот % относительно средней	20	40	30	30	20	40	30	40	30	20
Коэффициент деления мощности $K_{др}$	2	2,5	2,1	2,4	1,5	1,1	1,8	2	1,3	1,4
Волновое сопротивление 1 плеча делителя Z_l (Ом)	30	25	20	30	45	50	30	20	40	25

Параметры диэлектрической подложки выбираются в соответствии с таблицей 2 по **предпоследней** цифре номера зачетной книжки.

Таблица 2

Параметр	Предпоследняя цифра номера зачетной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Относительная диэлектрическая проницаемость ε	9.8	3.78	11.9	12.9	12.4	16	12.9	2,16	9.8	3.78
Тангенс угла потерь	0,0005	0,0001	0,001	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,001	0,0005	0,0001
Толщина подложки Н (мм)	0,5	0,25	0,5	1,5	1	2	0,75	0,5	1	0,5
Толщина металла Т (мм)	0,005	0,0005	0,002	0,001	0,001	0,005	0,005	0,0005	0,002	0,001
Тип металла	медь	золото	алюминий	серебро	серебро	медь	медь	золото	алюминий	медь

Для синтеза и анализа Т-разветвления микрополосковой линии требуется:

- 1) По формулам (2), (3) рассчитать значения волновых сопротивлений второго и третьего плеч Т-разветвления микрополосковой линии при условии, что проектируемый делитель идеально согласован со стороны первого плеча.
- 2) Используя подпрограмму Txline по заданному волновому сопротивлению первого плеча и рассчитанным волновым сопротивлениям второго и третьего плеч рассчитать ширину печатных проводников. Длину каждого плеча принять равной четверти длины волны в линии на центральной частоте.
- 3) Создать в среде Microwave Office проект, а в нём схему Т-разветвления микрополосковой линии. Образец схемы Т-разветвления приведен в приложении 1. *Обратите внимание на то, что волновые сопротивления портов должны быть равны волновым сопротивлениям линий, к которым они подключены. Параметры топологических элементов схемы должны соответствовать рассчитанным, а параметры отображаемой на схеме подложки - заданным в таблице 2.*
- 4) Получить частотные зависимости параметров S_{ii} портов на одном графике, где i - номер плеча разветвления.
- 5) Получить частотную зависимость коэффициента деления мощности. Для этого необходимо создать выходное уравнение коэффициента деления, после чего в диалоге отображения результата измерения на графике указать в качестве источника данных это уравнение.
- 6) Провести подстройку параметров разветвления (W_1 , W_2 и W_3) для получения заданного коэффициента деления и минимума S_{11} на центральной частоте.
- 7) Получить двухмерное и трехмерное отображение топологии синтезированного Т-разветвления.
- 8) Сохранить проект для последующего оформления отчета по лабораторной работе.

Задание № 2. Синтезировать и исследовать кольцевой делитель мощности, параметры которого выбираются в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3

Параметр	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Средняя частота диапазона (ГГц)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Полоса частот % относительно средней	20	40	30	30	20	40	30	40	30	20
Коэффициент деления мощности $K_{\partial P}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Волновые сопротивления входного и выходных плеч делителя Z_0 (Ом)	50	45	30	35	50	45	40	35	50	40
Поверхностное сопротивление тонкопленочного резистора (TFR) RS (Ом/квадрат)	50	45	30	35	50	45	40	35	50	40

Для синтеза и анализа кольцевого делителя мощности требуется:

- 1) По формуле (4) рассчитать значение волнового сопротивления кольца делителя и значение сопротивления развязывающего резистора R .
- 2) Используя подпрограмму Txline по заданным волновым сопротивлениям входного и выходного плеч делителя и рассчитанному волновому сопротивлению кольца делителя рассчитать ширину печатных проводников. Суммарная длина каждого полукольца должна быть равной четверти длины волны в линии на центральной частоте. При длине полукольца $l < 10W_1$ рекомендуется увеличить его длину на $\lambda_{\lambda 0}$, где $\lambda_{\lambda 0}$ - длина волны в линии на центральной частоте.
- 3) Создать проект, а в нём схему кольцевого делителя мощности. Образец схемы КДМ приведен в приложении 2. Результаты расчета параметров печатных проводников, а также исходные данные для его синтеза и анализа КДМ необходимо отражать на схеме в параметрах соответствующих топологических элементов (см. приложение 5) и параметрах подложки. Установить в опциях проекта заданный для анализа диапазон частот и шаг частот, обеспечивающий измерения не менее чем в ста точках диапазона.
- 4) Провести анализ характеристик КДМ. Для этого в проекте создать выходные уравнения, позволяющие определить КСВН входа и выходов, модули и аргументы коэффициентов передачи, неравномерность коэффициентов передачи в полосе частот, развязку выходов. Синтаксис и встроенные функции для создания выходных уравнений приведен в приложении 6. Полученные уравнения использовать как источники данных для графиков, на которые вывести частотные зависимости параметров КДМ.
- 5) Построить частотные зависимости КСВ входа и выходов делителя, зависимости модулей и аргументов коэффициентов передач каждого плеча, а также развязки выходов делителя в заданном диапазоне частот. Определить неравномерность модулей коэффициентов передачи в заданном диапазоне частот.
- 6) Провести подстройку длины полоски кольца делителя (см. схему приложения 2) для получения минимальных КСВ входа и выходов, а также максимальной развязки выходов на центральной частоте.
- 7) Получить двухмерное и трехмерное отображение топологии синтезированного КДМ.
- 8) Сохранить проект для последующего оформления отчета по лабораторной работе.

Задание № 3. На основе КДМ, синтезированного в задании № 2, разработать четырёхканальный делитель мощности, структуру которого построить по схеме параллельного типа (см. рис. 6, а).

Для синтеза и анализа четырехканального делителя мощности требуется:

- 1) Создать в том же проекте схему четырехканального кольцевого делителя мощности. Для этого целесообразно использовать схему двухканального КДМ как подцепь. Соединить выходы первой подцепи при помощи линий передачи MTRACE равной длины ($l = \lambda_{\lambda 0}/4$) шириной W_0 с входами второй и третьей подцепи, как показано на схеме четырехканального КДМ в приложении 3.
- 2) Провести анализ параметров четырехканального делителя мощности. Для этого необходимо создать выходные уравнения соответствующих параметров аналогично уравнениям п. 4 задания 2. При создании уравнений и инициализации их как источников данных графиков необходимо обратить внимание на то, чтобы источником данных уравнений являлись S параметры схемы четырехканального КДМ.
- 3) Получить частотные зависимости КСВ входа и выходов делителя, зависимости модулей коэффициентов передач каждого плеча, а также развязки выходов делителя в заданном диапазоне частот.
- 4) Получить двухмерное и трехмерное отображение топологии синтезированного делителя мощности.
- 5) Сохранить проект для последующего оформления отчета по лабораторной работе.

Задание № 4. Синтезировать и исследовать гибридный кольцевой мост, параметры которого определяются вариантом, выбранным в соответствии с двумя последними цифрами номера зачетной книжки (таблицы 4, 5).

Таблица 4

Параметр	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Средняя частота диапазона (ГГц)	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Полоса частот в % относительно средней	20	30	20	30	20	40	30	40	30	40
Волновые сопротивления входных и выходных плеч моста Z_0 (Ом)	20	25	30	35	40	45	50	35	50	40
Коэффициент деления напряжения K_{OU}	1,2	1,5	1,8	1,4	1,7	2	1,1	1,5	1,6	2

Параметры диэлектрической подложки выбираются в соответствии с таблицей 5 по **предпоследней** цифре номера зачетной книжки.

Таблица 5

Параметр	Предпоследняя цифра номера зачетной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Относительная диэлектрическая проницаемость ε	9.8	3.78	11.9	12.9	12.4	16	12.9	2,16	9.8	3.78
Тангенс угла потерь	0,0005	0,0001	0,001	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,001	0,0005	0,0001
Толщина подложки Н (мм)	0,5	0,25	0,5	1,5	1	2	0,75	0,5	1	0,5
Толщина металла Т (мм)	0,005	0,0005	0,002	0,001	0,001	0,005	0,005	0,0005	0,002	0,001
Тип металла	медь	золото	алюминий	серебро	серебро	медь	медь	золото	алюминий	медь

Для синтеза и анализа кольцевого гибридного моста требуется:

- 1) По формуле (11) рассчитать значения волновых сопротивлений Z_1 и Z_2 кольцевого гибридного моста, обеспечивающих требуемый коэффициент деления напряжения.
- 2) Используя подпрограмму Txlinc по заданным волновым сопротивлениям входных и выходных плеч моста Z_0 , а также по рассчитанным в предыдущем пункте волновым сопротивлениям кольца Z_1 и Z_2 , определить ширину печатных проводников w_0 , w_1 , w_2 . Определить соответствующие длины четверть-волновых участков кольца Len_{01} и Len_{02} (см. рис.5а и приложение 4).
- 3) Создать проект, а в нём схему кольцевого гибридного моста. Образец схемы моста приведен в приложении 4. Результаты расчета параметров печатных проводников w_0 , w_1 , w_2 , Len_{01} , Len_{02} , а также параметры используемых топологических элементов целесообразно задать в виде переменных и уравнений непосредственно на схеме моста, как показано в приложении 4. Для построения замкнутой формы кольца рекомендуется принять равными Len_{01} и Len_{02} , причем за величину их длины необходимо выбрать меньшую из них. Установить в опциях проекта заданный диапазон частот и шаг частот, обеспечивающий измерения не менее чем в ста точках диапазона.
- 4) Провести анализ характеристик кольцевого гибридного моста. Для этого в проекте создать выходные уравнения, позволяющие определить КСВН входов и выходов, модули и аргументы коэффициентов передачи, неравномерность коэффициентов передачи в полосе частот, развязку выходов, коэффициент деления напряжения. Синтаксис и встроенные функции для создания выходных уравнений приведен в приложении 6. Полученные уравнения необходимо использовать как источники данных графиков, на которые вывести частотные зависимости параметров моста.
- 5) Построить частотные зависимости КСВ входа и выходов моста, зависимости модулей и аргументов коэффициентов передач каждого плеча, также развязки выходов, коэффициента деления напряжения в заданном диапазоне частот. Определить неравномерность модулей коэффициентов передачи.
- 6) Получить двухмерное и трехмерное отображение топологии синтезированного моста.
- 7) Сохранить проект для последующего оформления отчета по лабораторной работе.

4. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- формулы и результаты расчета параметров проектируемых устройств;
- графики частотных зависимостей параметров синтезированных делителей мощности;
- топологии проектируемых устройств в двухмерном представлении;
- выводы по результатам работы.

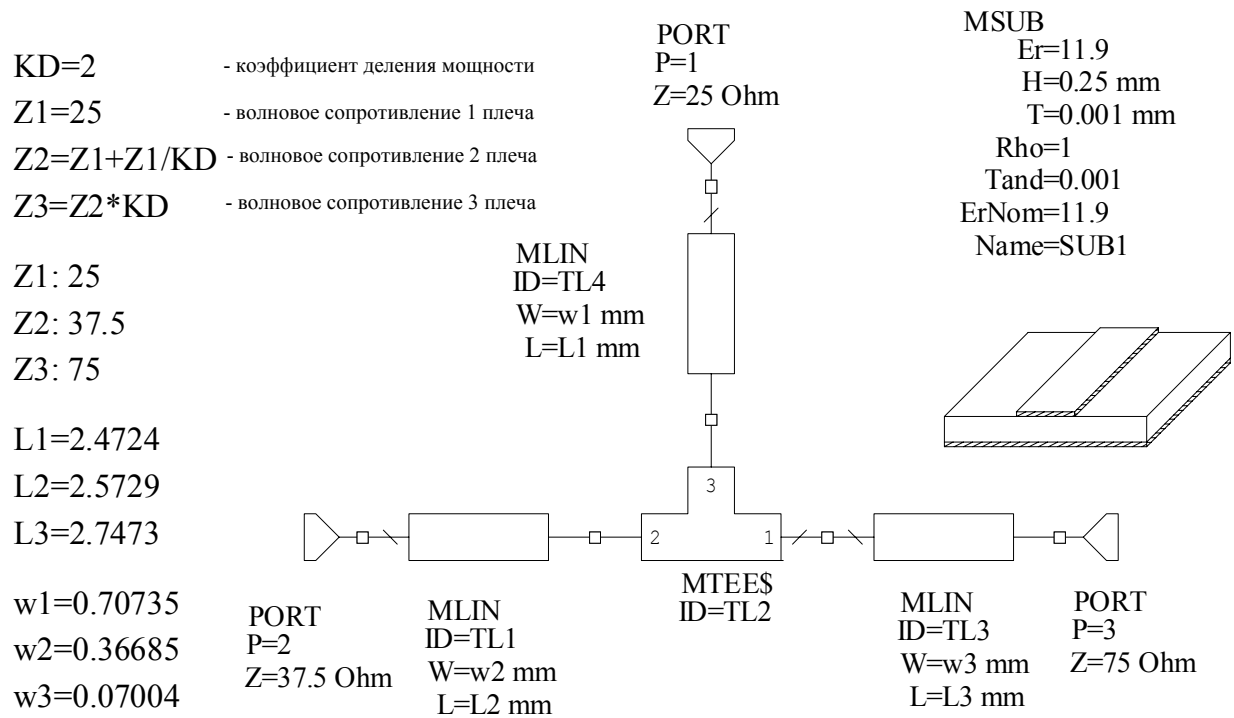
5. Контрольные вопросы

1. Основные определения, область применения устройств распределения СВЧ мощности.
2. Параметры устройств распределения мощности.
3. Параметры полосковых линий передачи.
4. Топология, принцип работы, параметры разветвления полосковой линии.
5. Топология, принцип работы, параметры кольцевого делителя мощности.
6. Принцип работы кольцевого гибридного моста.
7. Возможности программы Microwave Office 2002.
8. Назначение пунктов главного меню Microwave Office 2002.
9. Параметры микрополосовых топологических элементов программы Microwave Office 2002.
10. Каким образом можно автоматически генерировать топологию полосковых элементов в Microwave Office 2002.
11. Что такое выходное уравнение, как оно создаётся и как используется для построения графиков?
12. Основные расчетные величины линейного и нелинейного моделирования Microwave Office 2002.

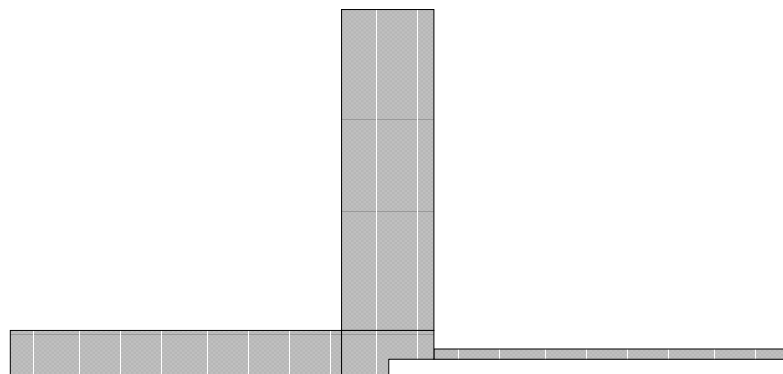
Библиография

1. Микроэлектронные устройства СВЧ/ Н.Т. Бова, Ю.Г. Ефремов и др. К.: Техника, 1984.- 184 с.
2. Нефёдов Е.И., Фиалковский А.Т. Полосковые линии передачи (Электродинамические основы автоматизированного проектирования интегральных схем СВЧ).- 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1980 312 с.
3. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях.- М.: Советское радио, 1972.- 232 с
4. Справочник по элементам полосковой техники/ Под ред. А.Л. Фельдштейна.- М.: Связь, 1979.- 336 с.
5. [http:// www. mwoffice. com/](http://www.mwoffice.com/)

Приложение 1. Схема Т-разветвления микрополосковой линии

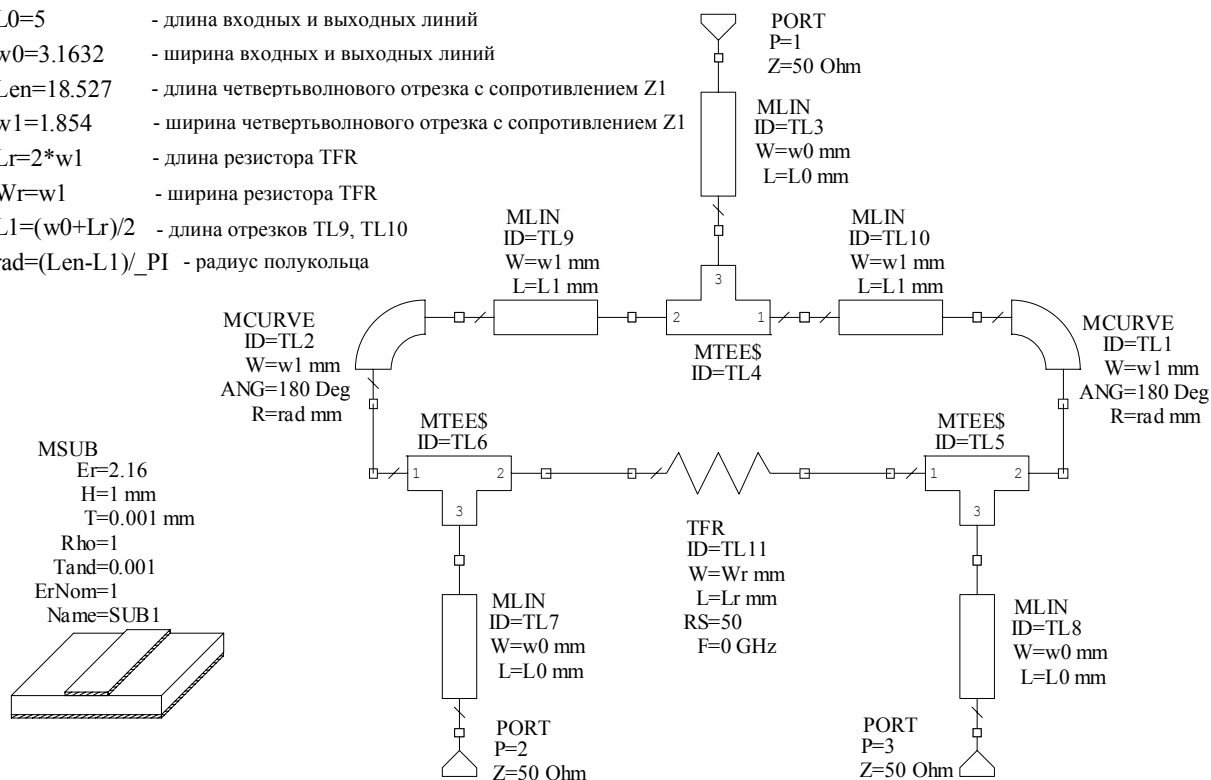


Топология Т-разветвления микрополосковой линии

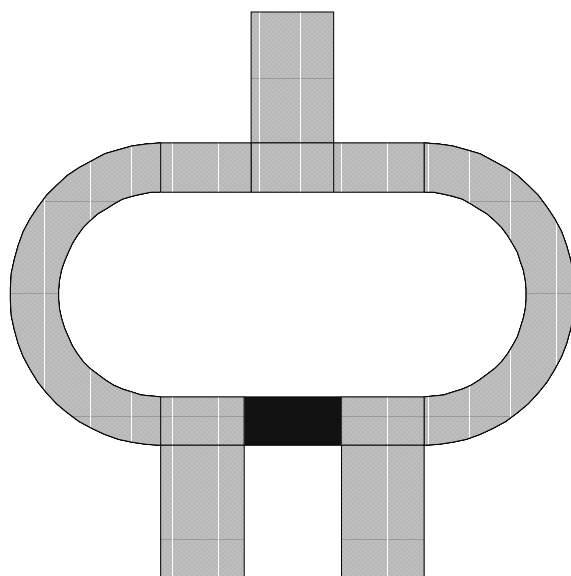


Приложение 2. Схема кольцевого делителя мощности

$L0=5$ - длина входных и выходных линий
 $w0=3.1632$ - ширина входных и выходных линий
 $Len=18.527$ - длина четвертьволнового отрезка с сопротивлением $Z1$
 $w1=1.854$ - ширина четвертьволнового отрезка с сопротивлением $Z1$
 $Lr=2*w1$ - длина резистора TFR
 $Wr=w1$ - ширина резистора TFR
 $L1=(w0+Lr)/2$ - длина отрезков TL9, TL10
 $rad=(Len-L1)/\pi$ - радиус полукольца



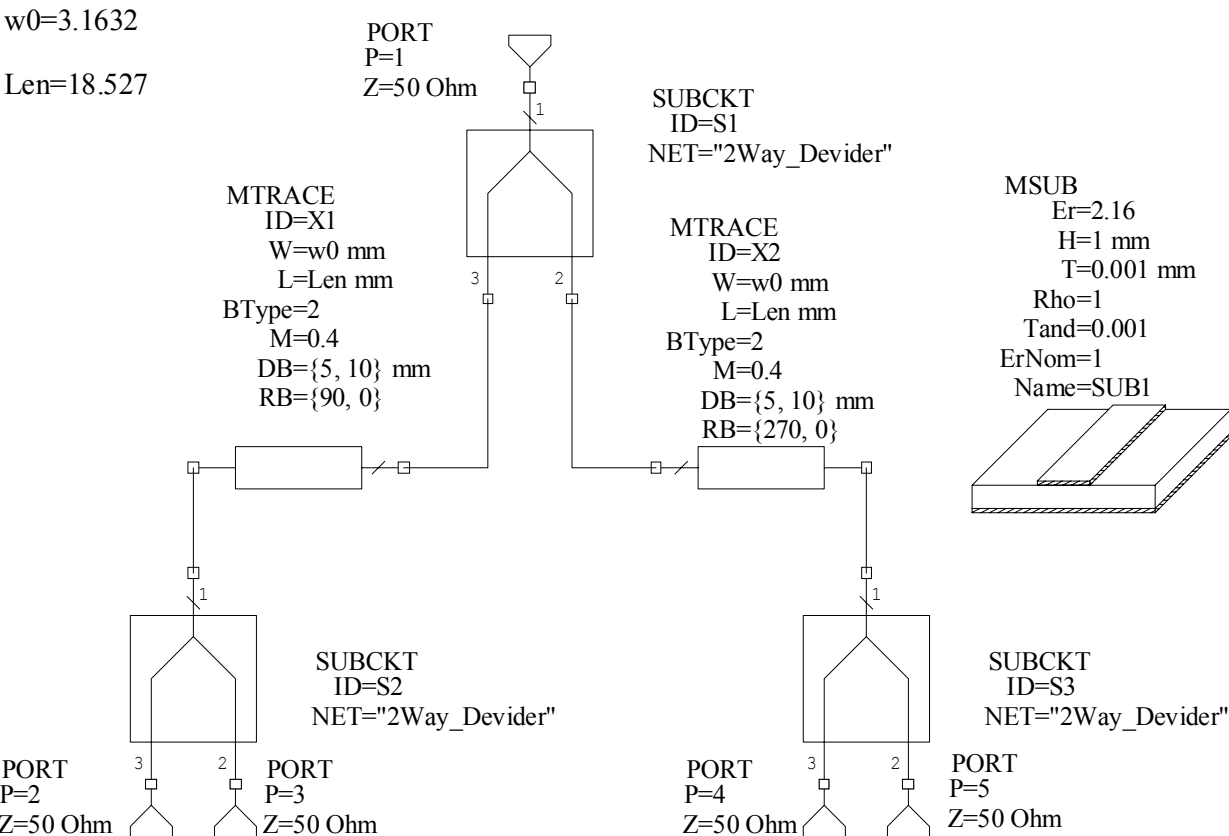
Топология кольцевого делителя мощности



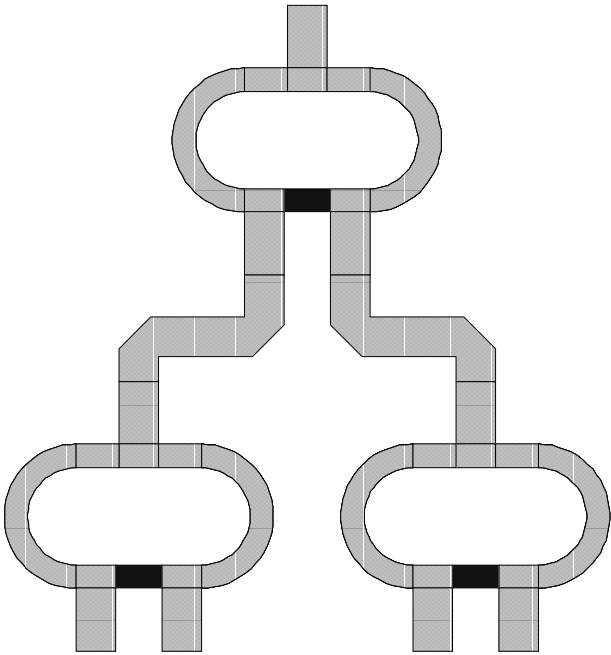
Приложение 3. Схема четырехканального делителя мощности

$$w_0=3.1632$$

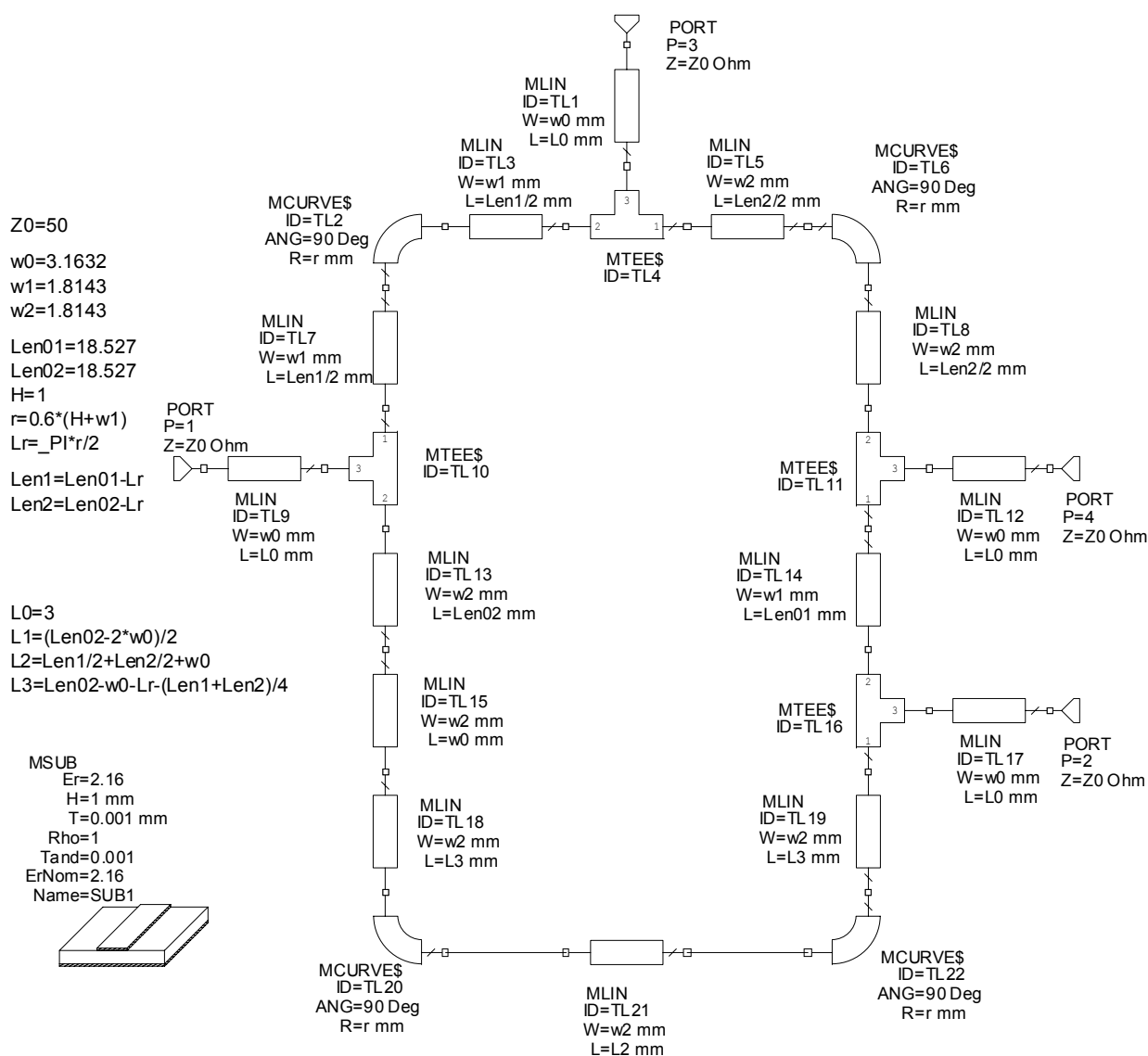
$$Len=18.527$$



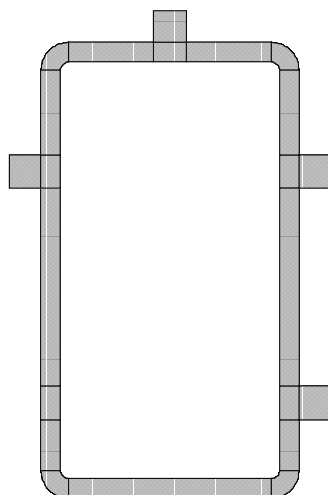
Топология четырехканального делителя мощности



Приложение 4. Схема кольцевого гибридного моста

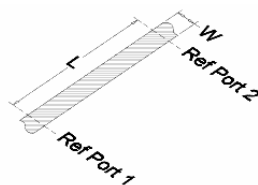
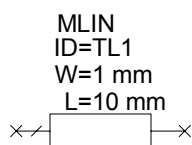


Топология кольцевого гибридного моста



Приложение 5. Параметры используемых в работе топологических элементов

MLIN: элемент полосковой линии

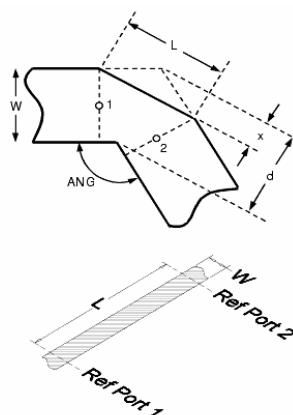


Параметры:

W- ширина проводника;

L - длина проводника.

MTRACE: элемент полосковой линии, который может прокладываться путем изгиба (поворота) линии



Параметры:

W- ширина проводника;

L - длина проводника;

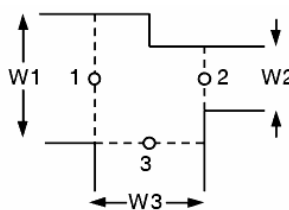
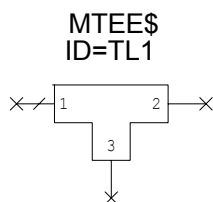
BType- тип изгиба: (1) - нескошенный угол, (2)- скошенный под углом, (3) -оптимально скошенный;

M (0...1) - тип скоса;

DB - массив положений изгибов в единицах длины относительно начальной точки (например, {1, 5, 10});

RB - массив углов в градусах под которыми изгибается линия относительно первоначального направления (например, {90, 180, 270}).

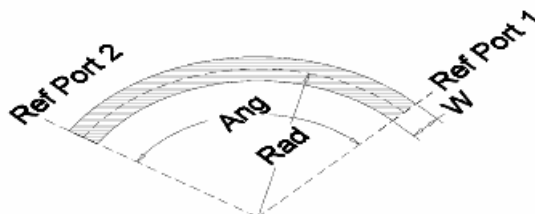
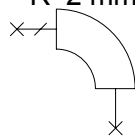
MTEES: T-разветвление полосковой линии



Символ \$ в названии элемента обозначает, что ширина каждого плеча разветвления W1, W2, W3 принимает значение ширины присоединенного к плечу другого топологического элемента (MLIN, MTRACE).

MCURVE\$: плавный поворот полосковой линии.

MCURVE\$
ID=TL1
ANG=90 Deg
R=2 mm



Параметры:

ANG - угол поворота в градусах;

R - радиус поворота.

Символ \$ в названии элемента обозначает, что ширина проводника W принимает значение наибольшей ширины присоединенных к нему элементов.

TFR: (Thin Film Resistor) тонкопленочный резистор.

TFR
ID=TL1
W=1 mm
L=10 mm
RS=50
F=0 GHz



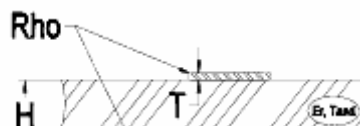
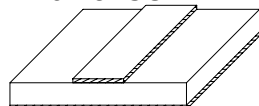
Параметры: W - ширина резистора; L - длина резистора; RS - удельное сопротивление квадрата пленки (Ом/квadrat). F - частота для масштабирования удельного сопротивления.

Например, для получения резистора сопротивлением 100 Ом при RS = 50 Ом необходимо выбрать геометрические размеры резистора в форме прямоугольника с соотношением сторон 1 : 2 (W = 1 mm, L = 2 mm).

Для большинства случаев частота F очень большая (сотни гигагерц), в этом случае установка F = 0 является приемлемой.

MSUB: тип подложки микрополосковой линии.

MSUB
Er=3.38
H=1 mm
T=0.05 mm
Rho=1
Tand=0
ErNom=3.38
Name=SUB1



Параметры: Er - относительная диэлектрическая проницаемость подложки;

H - толщина подложки;

T - толщина металлической пленки;

Rho - удельное сопротивление металла, нормализованного к удельному сопротивлению золота;

Tand - тангенс угла потерь диэлектрика;

ErNom - номинальная диэлектрическая проницаемость подложки относительно проницаемости свободного пространства. Используется только электромагнитными моделями элементов. Значение ErNom $\approx$ Er.

Приложение 6. Синтаксис и математические функции Microwave Office 2002

Знаки операций:

- + сложение;
- вычитание;
- * умножение;
- / деление;
- ^ возведение в степень.

Глобальные константы:

- _PI - π (3.14159...);
- i, j = $\sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Основные встроенные функции

Функция	Описание
sin(x)	синус x, где x в радианах
cos(x)	косинус x, где x в радианах
tan(x)	тангенс x, где x в радианах
sinh(x)	гиперболический синус x, где x в радианах
cosh(x)	гиперболический косинус x, где x в радианах
tanh(x)	гиперболический тангенс x, где x в радианах
arcsin(x)	арксинус x, с результатом в радианах
arccos(x)	арккосинус x, с результатом в радианах
arctan(x)	арктангенс x, с результатом в радианах
exp(x)	e в степени x
log(x)	натуральный логарифм x
log10(x)	десятичный логарифм x
sqrt(x)	квадратный корень из x

Функции над комплексными числами:

Функция	Описание
real(z)	Возвращает действительную часть комплексного числа.
imag(z)	Возвращает мнимую часть комплексного числа.
abs(z)	Возвращает модуль комплексного числа.
angle(z)	Возвращает аргумент комплексного числа.
conj(z)	Возвращает комплексно сопряженное число.