

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Факультет «Высшей школы электроники и компьютерных
наук» Кафедра «Конструирование и производство
радиоаппаратуры»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

_____ Е.В. Гильманов
_____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ Н.И. Войтович
_____ 2017 г.

Исследование и разработка диаграммообразующих трактов пассивных ФАР
метрового диапазона в виде объёмных интегральных модулей СВЧ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ-11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы

Начальник КБ-38

АО «ЧРЗ «Полет»

_____ Г.А. Тимофеева
_____ 2017 г.

Автор работы

Студент группы КЭ-273

_____ И.М. Бигильдин
_____ 2017 г.

Нормоконтролёр

Инженер 2 категории

_____ Н.В. Дударев
_____ 2017 г.

Челябинск 2017

АННОТАЦИЯ

Бигильдин И. М. Исследование и разработка диаграммообразующих трактов пассивных ФАР метрового диапазона в виде объёмных интегральных модулей СВЧ. – Челябинск: ЮУрГУ, ВШЭКН, 2017, 84 с., 62 ил., библиогр. список – 17 наим., 5 прил., 6 листов чертежей ф. А3; 6 листов чертежей ф. А4.

В выпускной квалификационной работе проведено исследование и разработка пассивных объёмных интегральных модулей СВЧ, а именно пассивных диаграммообразующих трактов фазированных антенных решеток метрового диапазона. Целью данной работы являлась разработка делителя мощности для антенной решетки курсового радиомаяка системы посадки СП-2010. В ходе работы над проектом была рассчитана схема делителя КРМ, спроектированы направленные ответвители на основе диалектических материалов фирмы Rogers, разработаны и смоделированы многослойные платы основных узлов делителя мощности КРМ. Таким образом, в рамках ВКР было проведено исследование возможности применения многослойных плат в разработке объёмных интегральных модулей СВЧ и с помощью них были достигнуты минимальные массогабаритные характеристики. Представлены сборочные чертежи многослойных плат делителя мощности КРМ. Для автоматизации процесса проектирования были использованы программные пакеты: CST Microwave Studio, MATLAB, КОМПАС.

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ			
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата				
Разраб.	Бигильдин				Исследование и разработка диаграммообразующих трактов пассивных ФАР метрового диапазона в виде объёмных интегральных модулей СВЧ	Лит.	Лист	Листов
Пров.	Тимофеева							
Н.Контр.	Дударев					ЮУрГУ Кафедра КиПР		
Утв.	Войтович							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 ВЫБОРА НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ	8
2 ДЕЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ ДВУХЧАСТОТНОГО КРМ	12
2.1 Анализ технического задания.....	15
2.2 Обзор литературы по делителю мощности КРМ.....	18
2.3 Постановка задачи для разработки	20
3 ИССЛЕДОВАНИЯ ДН АНТЕННЫ КРМ ПОЛУЧЕННОЙ РАНЕЕ.....	22
3.1 Расчет диаграмм направленности антенны КРМ	23
3.2 Расчет РГМ и СГМ антенны КРМ.....	25
3.3 Выводы	29
4 ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР СХЕМЫ ДЕЛИТЕЛЯ КРМ.....	30
4.1 Схема делителя мощности КРМ СП-90.....	31
4.2 Делитель мощности КРМ СП-2010 в предыдущем образце	33
4.3 Создание схемы нового делителя мощности КРМ.....	37
5 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ДЕЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ КРМ В ВИДЕ ОБЪЕМНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО МОДУЛЯ СВЧ	47
5.1 Объемная интегральная технология	47
5.2 Разработка направленного ответвителя.....	48
5.3 Разработка многослойных плат делителя мощности	56
5.4 Расчет модели делителя КРМ в CST Microwave Studio	71
6 ОБОБЩЕНИЕ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	80
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	81
ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	83
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	84

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена исследованию и разработке пассивных объёмных интегральных модулей СВЧ, а именно пассивных диаграммобразующих трактов фазированных антенных решеток метрового диапазона.

В последние годы к устройствам СВЧ предъявляются жесткие требования по снижению стоимости, повышению надежности и упрощения настройки и регулировки.

Один из путей достижения этого является миниатюризация и микроминиатюризация элементов и узлов СВЧ. Последние 60 лет широко применяются различные полосковые линии передачи (симметричная, микрополосковая, компланарная и др.). Также было разработано большое количество функциональных элементов СВЧ техники (ответвители, фильтры, резонаторы, фазовращатели, Pin-диоды). Все это вместе создает широкую элементарную базу современной СВЧ электроники.

Основу любой системы машинного проектирования составляет расчет электродинамических параметров базовых элементов или, иными словами нахождение полной матрицы рассеяния каждого базового элемента. От того, насколько точно известна матрица рассеяния, зависит конечный итог сквозного проектирования – параметров всего устройства в целом и документация на него. Это тем более важно, когда общее число элементов в современном устройстве все более возрастает.

Также широкое развитие матричной теории описания СВЧ цепей, позволило, досконально изучить и создать модели практически каждого функционального СВЧ элемента.

Это позволило максимально формализовать процесс проектирования, и с появлением ЭВМ создать специализированные САПР для автоматизированного проектирования СВЧ устройств.

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		7

1 ВЫБОРА НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

На современном этапе задача синтеза устройства СВЧ состоит из трех основных этапов:

Первый этап — это выбор необходимых элементов, характеристики которых заранее известны или имеется возможность предопределить их приближенно (методами электродинамики, численно или экспериментально).

Второй этап — это соединение элементов в схему в соответствии с требуемыми параметрами. Сложное соединение таких элементов рассчитывается с помощью матричного аппарата теории цепей. Предполагается, что матрицы этих элементов остаются неизменными при любом их сложном соединении.

Третий этап – оптимизация. Данный этап необходим далеко не всегда, но он позволяет значительно, улучшить выходные характеристики устройства.

Рассмотрим, как это выглядит на практике. Сначала разработчик на основе анализа технического задания, составляет функциональную (если она не предложена в ТЗ), а затем структурную схему устройства с помощью матричного аппарата теории цепей. На основании подобранных или сгруппированных по этой схеме базовых элементов и функциональных узлов выбирается тип линии передачи и её диэлектрическую основу.

Это выбор делается исходя из электродинамических, конструктивных, технологических и экономических соображений. Так как некоторые элементы устройства можно реализовать, используя только линии передачи – элементы с распределенными параметрами, например, ответвитель можно создать на основе печатного монтажа по планарной технологии на микрополосковой линии. Но такие решения предъявляют к линии передачи жесткие «физические» требования, что не всегда реализуемо. Например, для создания того же ответвителя с сильной связью более 6дБ, требует использования симметричной линии. Это далеко не всегда удобно, когда, например, на плате присутствует большое количество навесного монтажа. Или данное решение может не

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		8

удовлетворять массогабаритным требованиям. Так, фазосдвигающая четвертьволновая линия в метровом диапазоне частот, выполненная на стеклотекстолите толщиной 1,5 мм с учетом всех конструкторских требований на взаимное влияние, может занимать площадь до $\sim 300 \text{ см}^2$.

Некоторые элементы нельзя реализовать только линиями передач, такие как резисторы, конденсаторы и индуктивности большого номинала, узлы с применением ферритов, поглотители и др. Эти элементы называют элементами с сосредоточенными параметрами. Но, как указывалось выше, использование данных элементов ограничивается лишь некоторыми линиями передач, чаще всего это микрополосковая.

СВЧ технике используется большое разнообразие линий передачи. К ним относят коаксиальные, полосковые, микрополосковые, щелевые, компланарные линии. Помимо этого, существует еще большее количество их модификаций: балансная и небалансная симметричная линия, подвешенная и перевернутая микрополосковая линии, экранированная и не экранированная компланарная линии. Также традиционные линии в виде прямоугольных или круглых волноводов, которые в данной работе не будут рассматриваться.

После определения структурной схемы устройства, выбора оптимальных базовых и вспомогательных элементов, разработчик рассчитывает необходимые их параметры и характеристики. В особенности, узлы и элементы с распределёнными параметрами требуют численного электромагнитного моделирования для определения их матриц рассеяния. Также моделируются отдельные неоднородности на линиях передачи, которые могут повлиять на характеристики устройства (поворот линии передачи, отверстия, разветвления и др.).

При грамотном проектировании, после расчёта отдельных элементов и их соединении, и при отсутствии сильного взаимного влияния устройство будет удовлетворять предъявленным требованиям.

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		9

Это позволило, имея определенный набор готовых решений, строить различные по сложности и назначению устройства. Эти решения стандартизованы и унифицированы, и они широко представлены на рынке. Таким образом, при данном подходе имеются следующие преимущества: универсальность, простота, ремонтпригодность. Так же есть определенные недостатки:

Во-первых, будучи загнанным в определённые рамки унификации и стандартизации, разработчик порой не может реализовать наиболее оптимальные характеристики устройства, так ему приходится подстраиваться под имеющийся ассортимент решений. А данный ассортимент может быть ограничен в виду экономической, политической и иной ситуации. Выходом в этом случае может оказаться использование собственных решений, но реализация их может быть неудовлетворительной, в плане настройки, регулировки, массы и габаритов.

Во-вторых, при данном подходе, часто полезный объем устройства попросту теряется под коммутацию, различные соединители, проводники и кабели. К тому же они вносят дополнительные потери мощности.

В-третьих, слишком большая и сложная комплектация деталей и материалов устройства нередко на реальном производстве вызывает запутанность, повышает трудоёмкость изготовления, и соответственно и стоимость изделия.

Одним из вариантов концепции дальнейшего развития является переход к интегральной технологии.

Интегральная технология заключается в том, чтобы отказаться от дискретизации на отдельные конструктивные узлы, а наоборот объединить их в один и свести к минимуму использование дискретного навесного монтажа и сборочных операций. Это означает более широкое использования схем с распределёнными параметрами, более грамотная компоновка элементов и их коммутация.

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		10

Данный подход, никак не отменяет весь предыдущий опыт разработки. Он лишь является один из логических продолжений развития систем машинного проектирования. Так как в последние годы благодаря бурному развитию вычислительной техники, появилась возможность создание полной электродинамической модели. Это позволяет произвести численный электродинамический расчет всего устройства, не разбивая его на отдельные компоненты. Таким образом, если раньше устройство делилось на отдельные узлы на этапе расчета и это разделение нередко сохранялось и в конструктивном исполнении, то сейчас это стало не обязательным. Теперь стало возможным произвести полное сквозное моделирование всего устройства в целом.

Это открывает некоторые возможности, например, если раньше СВЧ полосковая плата практически всегда была одноэтажной, то теперь появилась возможность расчета многослойных СВЧ плат. В данной работе эта идея будет рассмотрена. В качестве объекта исследования выберем разработку делителя мощности для антенной решетки на 17 излучателей. Целью данной работы будет является разработка делителя мощности для антенной решетки курсового радиомаяка системы посадки ISL СП-2010.

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		11

2 ДЕЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ ДВУХЧАСТОТНОГО КРМ

Курсо-глиссадная система (в английской терминологии — Instrument Landing System, ILS) – состоит из двух комплексов – наземного и бортового. Наземная часть комплекса состоит из двух радиомаяков: курсового (КРМ) и глиссадного (ГРМ). Каждый радиомаяк формирует пару непрерывных направленных радиосигналов, определённым образом ориентированных относительно земной поверхности.

Курсовой маяк, который обеспечивает наведение самолета в горизонтальной плоскости - по курсу. Глиссадный маяк, обеспечивающий наведение в вертикальной плоскости - по глиссаде. Курсовой и глиссадный маяки устанавливаются возле взлётно-посадочной (ВПП). Первый в противоположном торце ВПП, по осевой линии, глиссадный, сбоку от ВПП на удалении (по оси ВПП) точки приземления от порога ВПП.

Ниже на рис. 1 представлена схема расположения компонентов КГС на взлётно-посадочной полосе.

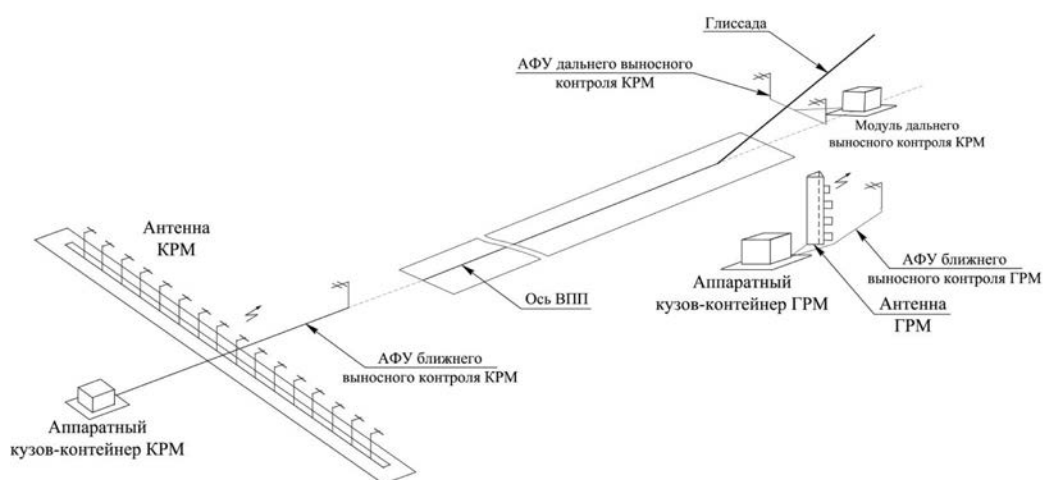


Рисунок 1 - Схема расположения КГС на ВПП

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ

Лист

12

Одним из важнейших компонентов КГС является курсовой радиомаяк. Курсовой радиомаяк (КРМ) представляет собой наземное радиотехническое устройство, излучающее в пространство радиосигналы, содержащие информацию для управления воздушным судном относительно посадочного курса при выполнении захода на посадку до высоты принятия решения.

Антенна КРМ (рис. 2) устанавливается на продолжении осевой линии ВПП на расстоянии 425 - 1200 м от ближнего торца ВПП со стороны противоположной направлению захода на посадку, боковое смещение антенны КРМ от продолжения осевой линии ВПП не допускается.



Рисунок 2 – Антенна КРМ

Обычно антенна КРМ выполняется в виде антенной решетки. Это необходимо для получения требуемой диаграммы направленности (ДН), что требует особого амплитудно-фазового распределения (АФР) сигналов питающих антенную решетку КРМ.

В данной работе будут рассмотрены вопросы разработки делителя мощности для антенной решетки курсового радиомаяка системы посадки ILS СП-2010 в виде объемного интегрального модуля. Данный делитель предназначен для распределения сигналов НБЧ и БЧ «широкого» и «узкого» каналов по излучателям антенной решетки двухчастотного КРМ в определенные амплитудно-фазовые распределения. Они будут формировать четыре диаграммы направленности антенны КРМ – БЧУК, БЧШК, НБЧУК и НБЧШК. Делитель будет представлять собой многослойную интегральную структуру, целиком выполненный на симметричной полосковой линии.

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		14

2.1 Анализ технического задания

Тема данной работы звучит как «Исследование и разработка диаграммообразующих трактов пассивных ФАР метрового диапазона в виде объёмных интегральных модулей СВЧ». В качестве объекта исследования взять делитель мощности двухчастотного курсового радиомаяка.

Целью данной диссертации является разработка делителя мощности для антенной решетки курсового радиомаяка системы посадки ISL СП-2010 в виде объёмного интегрального модуля.

Антенна КРМ СП-2010 представляет собой линейную антенную решетку из 17 излучателей. Она формирует четыре диаграммы направленности антенны КРМ – БЧ УК, БЧ ШК, НБЧ УК и НБЧ ШК. Данные ДН формируются за счет соответствующих четырех независимых АФР, формирующихся делителем КРМ.

Таким образом, делитель КРМ должен представлять собой многополюсник СВЧ, имеющий 4 входа и 17 выходов. Выходы, через ВЧ кабели, присоединяются непосредственно к излучателям антенной решетки КРМ. АФР с каждого входа делителя представлено в таблице 1.

Делитель КРМ должен иметь следующие технические параметры:

- Делитель КРМ представляет собой многополюсник СВЧ, имеющий 4 входа и 17 выходов. С каждого входа формируется соответствующее амплитудно-фазовое распределение (АФР) на 17 выходах. Выходное распределение сигналов должно соответствовать данным таблицы 1. Выбрать вход для создания опорного сигнала.
- Диапазон рабочих частот 108-112 МГц.
- КСВН по всем входам делителя не более 1,3
- Относительный допуск на амплитудное распределение по выходам делителя для сигналов: БЧ УК не более 5%, для сигналов НБЧ УК, БЧ ШК и НБЧ ШК не более 10%.

- Относительная фазовая ошибка на выходах делителя не более ± 5 градусов для сигналов БЧ УК и не более ± 10 градусов для сигналов Вход НБЧ УК, БЧ ШК и НБЧ ШК.

- По стойкости, прочности и устойчивости к воздействию механических и климатических факторов должен соответствовать группе 1.1 ГОСТ РВ 20.39.304-98 климатического исполнения "О".

- Входная мощность со входов НБЧ УК и НБЧ УК не более 10 Вт, со входов БЧ УК и БЧ ШК не более 1 Вт.

- Делитель мощности выполнить в виде СВЧ единого модуля с выходными разъёмами типа СР-50-165 ФВ ВРО.364.007 ТУ и входными СР-50-727ФВ ВРО.364.049ТУ.

Данное устройство должно представлять собой единый интегральный СВЧ модуль в виде многослойной структуры симметричных полосковых плат. Соединение между слоями должно осуществляться с помощью переходным металлизированных отверстий и перемычек, электрический контакт между которыми должен осуществляться давлением плат между собой. Использование навесного монтажа следует свести к минимуму. Постараться полностью исключить настройку и регулировку.

Таблица 1 – Требуемое амплитудно-фазовое распределение

№ входа	БЧ УК			НБЧ УЧ			БЧ ШК		НБЧ ШК	
	Ампл.	дБ	Фаза	Ампл.		Фаза	Ампл.	Фаза	Ампл.	Фаза
1	0,097	-20,26	90	0	-	-	0,007	-90	0	-
2	0,165	-15,65	90	0,017	-35,39	0	0,013	-90	0,004	180
3	0,301	-10,42	90	0,064	-23,88	0	0,023	-90	0,0148	180
4	0,333	-9,55	90	0,140	-17,08	0	0,026	-90	0,0324	180
5	0,344	-9,26	90	0,238	-12,47	0	0,027	-90	0,0549	180
6	0,306	-10,28	90	0,306	-10,28	0	0,024	-90	0,0706	180
7	0,211	-13,51	90	0,374	-8,54	0	0,016	-90	0,0862	180
8	0,077	-22,27	90	0,398	-8,00	0	0,705	90	0,0917	180
9	0		-	0,23	-12,76	0	0	-	0,9745	0
10	0,077	-22,27	-90	0,398	-8,00	0	0,705	-90	0,0917	180
11	0,211	-13,51	-90	0,374	-8,54	0	0,016	90	0,0862	180
12	0,306	-10,28	-90	0,306	-10,28	0	0,024	90	0,0706	180
13	0,344	-9,26	-90	0,238	-12,47	0	0,027	90	0,0549	180
14	0,333	-9,55	-90	0,140	-17,08	0	0,026	90	0,0324	180
15	0,301	-10,42	-90	0,064	-23,88	0	0,023	90	0,0148	180
16	0,165	-15,65	-90	0,017	-35,39	0	0,013	90	0,004	180
17	0,097	-20,26	-90	0	-	-	0,007	90	0	-

2.2 Обзор литературы по делителю мощности КРМ

Делитель мощности СВЧ энергии — это устройство, которое распределяет входную мощность в определённых соотношениях между выходными. Сумматоры обеспечивают сложение мощностей, поступающих на несколько входных каналов. В [1] обзорно освещены делители и сумматоры мощности. В данной книге указано, что делители мощности это, как правило, взаимные устройства, которые должны обеспечивать заданное амплитудное и фазовое распределение в выходных плечах. То есть, делители и сумматоры могут выполнять и деление, и суммирование мощности. Также делители и сумматоры должны иметь приемлемое согласование в полосе частот и необходимую развязку между каналами.

Автор приводит следующую классификацию делителей мощности по типу:

1. Делители последовательного типа.
2. Делители параллельного типа.
3. Кольцевые делители.
4. Делители на направленных ответвителях.

Делители на НО, в свою очередь, могут быть построены на разнообразных схемах деления: последовательная, параллельная и смешанная схема. В [2] рассмотрены метода матричного расчета делителей и сумматоров. Дан обзор многоступенчатых кольцевых делителей, кольцевых делителей на неоднородных линиях, бинарные делители и каскадные схемы деления на направленных ответвителях.

В данных книгах не рассмотрено применение интегральной технологии к разработке объёмных интегральных схем. Даны лишь общие сведения по расчеты делителей мощности. Единственными источниками, где затронуты вопросы проектирования объёмных интегральных схем СВЧ была [3] и [4]. В данных книгах предложены способы расчета интегральных схем, примеры

применения данной технологии. Но все это было рассмотрено в применении к сантиметровому и миллиметровому диапазону частот. На сегодняшний день, нет информации о применении объемной интегральной технологии в метровом диапазоне.

Также существует много литературы по расчету полосковых линий передачи и связанных линий, например, [5] или [6]. В обозначенной литературе представлены методики расчета направленных ответвителей с разнообразной связью (торцевая, лицевая). Вместе с этим, надо заметить, что существует определённый недостаток, заключающийся в практически полном отсутствии информации по расчёту направленных ответвителей с лицевой связью и смещением.

Особенно много полезной информации было почерпнуто из [7]. В данной статье рассмотрены конструкции двухсложных высокочастотных диаграммообразующих трактов фазированных антенных решеток, разработанных в виде гибридных интегральных СВЧ модулей.

2.3 Постановка задачи для разработки

Таким образом, можно выделить недостатки и преимущества делителей КРМ СП-90 и СП-2010. Делитель СП-90 имел большие потери, сложную методику регулировку и настройки. Данных недостатков практически лишен делитель мощности СП-2010. Но с другой стороны этого удалось добиться путем применения готовой номенклатуры покупных компонентов (направленные ответвители, кроссоверы и др.).

Следующим шагом развития должен стать делитель, в котором, во-первых, потребность регулировки станет еще меньше, во-вторых, будет минимизировано применение покупных компонентов.

Делитель должен быть разработан в виде интегрального модуля. В виду общей сложности задачи, модуль будет многослойный. Самым важным в данной работе, будет создание направленного ответвителя. Все ответвители будут выполнены как элементы с распределенными параметрами. Диэлектрическую основу надо выбрать так, чтобы на ней можно было реализовать все необходимые ответвители, и чтобы данная основа была доступна на коммерческом рынке.

Сложность делителя зависит от компоновки его функциональных узлов, а она в свою очередь определяется схемой деления мощности. Выбранная схема должна обеспечить максимальную простоту устройства и физическую реализуемость.

Также необходимо учесть технологические аспекты: как слои плат будут соединяться, какие максимальные размеры печатных плат возможно сделать, какая максимальная толщина многослойной СВЧ платы и прочее.

Перечислим задачи разработки, которые были рассмотрены:

- Исследование требуемых диаграмм направленности;
- Расчет оптимальной схемы делителя;

- Выбор типа полосковой линии и диэлектрической основы;
- Расчет направленных ответвителей;
- Компоновка ответвителей и плат.
- Настройка фазового распределения

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		21

3 ИССЛЕДОВАНИЯ ДН АНТЕННЫ КРМ ПОЛУЧЕННОЙ РАНЕЕ.

В техническом задании была предложено амплитудно-фазовое распределение (АФР) для делителя КРМ (табл. 2). Произведем расчет диаграмм направленности антенны КРМ, зон БЧ УК, БЧ ШК, НБЧ УК и НБЧ ШК. Данные для расчета были взяты из [8].

Таблица 2 – Исходное АФР

№ входа	БЧУК		НБЧУК		БЧШК		НБЧШК		Координата излучателя
	Ампл.	Фаза	Ампл.	Фаза	Ампл.	Фаза	Ампл.	Фаза	
1	0,097	90	0	-	0,0075	-90	0	-	18.8
2	0,165	90	0,017	0	0,0129	-90	0,004	180	16.1
3	0,301	90	0,064	0	0,0235	-90	0,01476	180	13.5
4	0,333	90	0,14	0	0,0257	-90	0,0324	180	11
5	0,344	90	0,238	0	0,0268	-90	0,0549	180	8.6
6	0,306	90	0,306	0	0,0239	-90	0,0706	180	6.2
7	0,211	90	0,374	0	0,0165	-90	0,08622	180	4
8	0,077	90	0,398	0	0,705	90	0,09168	180	1.8
9	0	-	0,23	0	0	-	0,9745	0	0
10	0,077	-90	0,398	0	0,705	-90	0,09168	180	-1.8
11	0,211	-90	0,374	0	0,0165	90	0,08622	180	-4
12	0,306	-90	0,306	0	0,0239	90	0,0706	180	-6.2
13	0,344	-90	0,238	0	0,0268	90	0,0549	180	-8.6
14	0,333	-90	0,14	0	0,0257	90	0,0324	180	-11
15	0,301	-90	0,064	0	0,0235	90	0,01476	180	-13.5
16	0,165	-90	0,017	0	0,0129	90	0,004	180	-16.1
17	0,097	-90	0	-	0,0075	90	0	-	-18.8

3.1 Расчет диаграмм направленности антенны КРМ

Расчёт диаграмм направленности (далее, ДН) каналов несущих и боковых частот. Для этой задачи воспользуемся расчетной формулой (1):

$$F_{НБЧ}(\varphi) = F_0(\varphi) \sum_{n=1}^{17} A_n e^{j(kd_n \sin(\varphi) + \psi_n)} \quad (1)$$

где $F_0(\varphi)$ – ДН одиночного излучателя;

A_n, ψ_n, d_n – амплитуда, фаза и координата излучателя;

Расчёт ДН каналов боковых частот. Для этой задачи воспользуемся расчетной формулой (2):

$$F_{БЧ}(\varphi) = F_0(\varphi) \sum_{n=1}^{17} 2A_n e^{j(kd_n \sin(\varphi) + \psi_n)} \quad (2)$$

Ниже представлены полученные ДН (рис 3, 4).

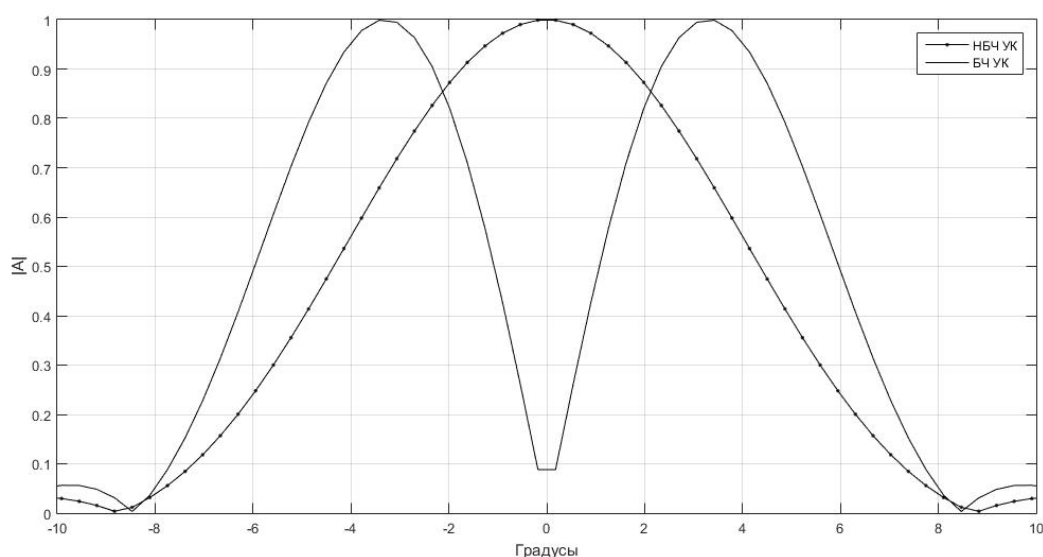


Рисунок 3 – Зона УК при совместной работе, в диапазоне $\pm 10^\circ$

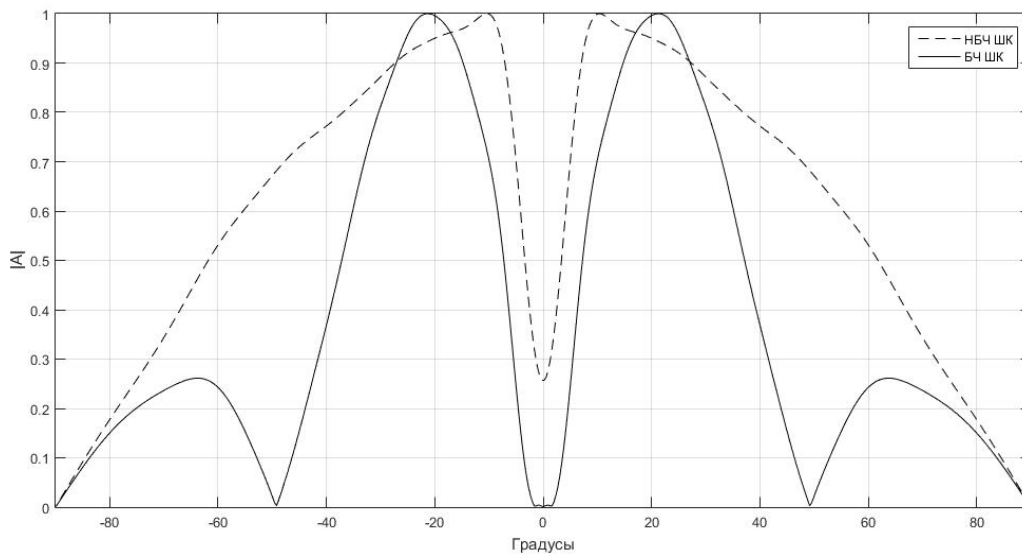


Рисунок 4 – Зона ШК при совместной работе, в диапазоне $\pm 90^\circ$

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ

3.2 Расчет РГМ и СГМ антенны КРМ

РГМ это главный информационный параметр. Рассчитаем его по приведённым ниже формулам (3).

$$РГМ_{у\kappa} = m \frac{|F_{н\text{б}ч\text{у}\kappa}(\varphi) - ja_{у\kappa}F_{б\text{ч}\text{у}\kappa}(\varphi)| - |F_{н\text{б}ч\text{у}\kappa}(\varphi) + ja_{у\kappa}F_{б\text{ч}\text{у}\kappa}(\varphi)|}{|F_{н\text{б}ч\text{у}\kappa}(\varphi)|} \quad (3)$$

где $m=0,2$;

$a_{у\kappa}=0,4447$;

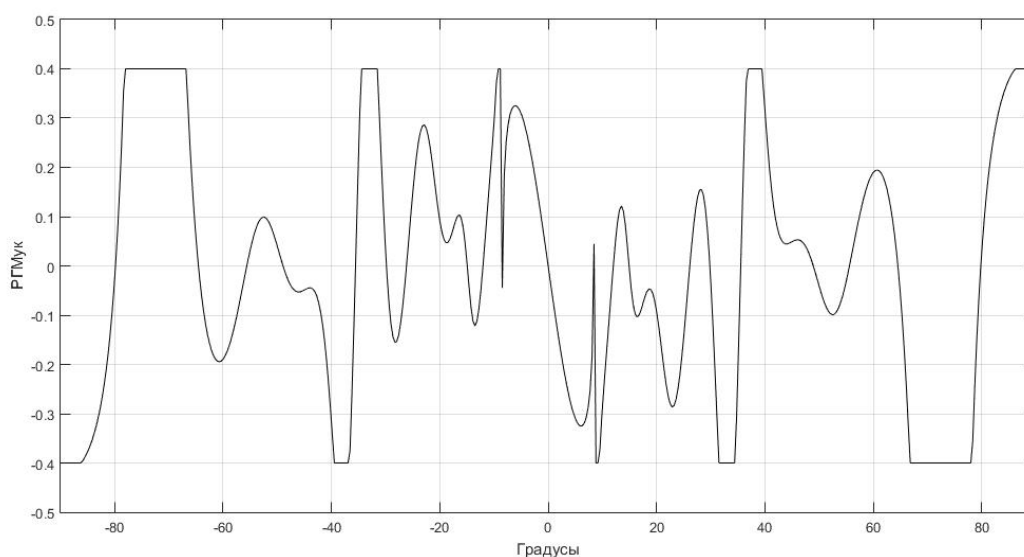


Рисунок 5 – РГМ_{уκ}

$$РГМ_{ш\kappa} = m \frac{|F_{н\text{б}ч\text{ш}\kappa}(\varphi) - a_{ш\kappa}F_{б\text{ч}\text{ш}\kappa}(\varphi)| - |F_{н\text{б}ч\text{ш}\kappa}(\varphi) + a_{ш\kappa}F_{б\text{ч}\text{ш}\kappa}(\varphi)|}{|F_{н\text{б}ч\text{ш}\kappa}(\varphi)|} \quad (4)$$

где $m=0,2$;

$a_{ш\kappa}=0,7$;

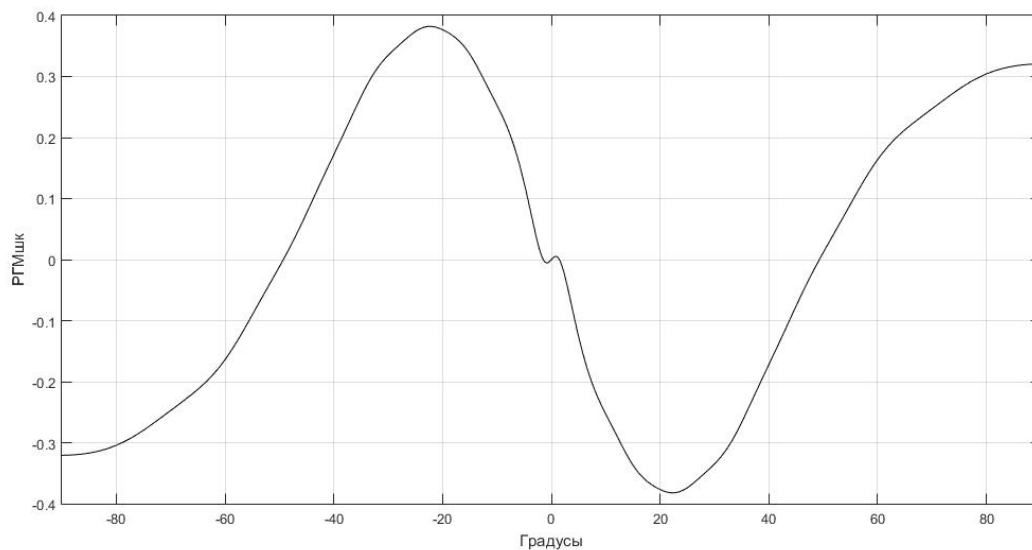


Рисунок 6 – $RGM_{ШК}$

$$RGM_{\Sigma} = \frac{RGM_{УК} + \alpha^2 RGM_{ШК}}{1 + \alpha^2} \quad (5)$$

где $\alpha = \frac{|F_{НБЧШК}(\varphi)|}{|F_{НБЧУК}(\varphi)|}$.

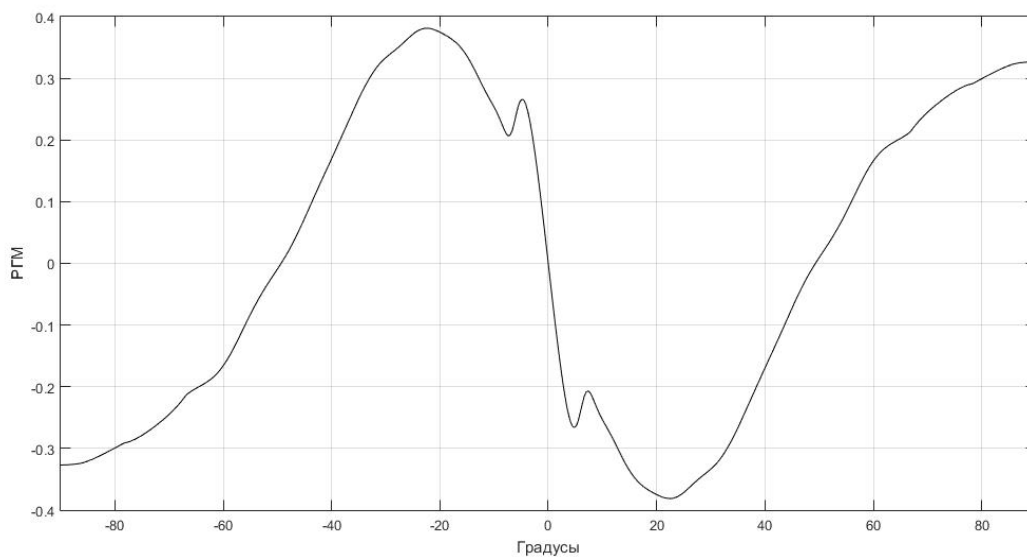


Рисунок 7 – RGM_{Σ}

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата
-----	------	-------------	---------	------

11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ

Проведем расчет СГМ. СГМ это контрольный параметр системы посадки. Используется для контроля работы радиомаяка.

$$\text{СГМ}_{\text{УК}} = m \frac{|F_{\text{НБЧУК}}(\varphi) - ja_{\text{УК}}F_{\text{БЧУК}}(\varphi)| + |F_{\text{НБЧУК}}(\varphi) + ja_{\text{УК}}F_{\text{БЧУК}}(\varphi)|}{|F_{\text{НБЧУК}}(\varphi)|} \quad (6)$$

где $m=0,2$;

$$a_{\text{УК}}=0,445;$$

$$\text{СГМ}_{\text{ШК}} = m \frac{|F_{\text{НБЧШК}}(\varphi) - a_{\text{ШК}}F_{\text{БЧШК}}(\varphi)| + |F_{\text{НБЧШК}}(\varphi) + a_{\text{ШК}}F_{\text{БЧШК}}(\varphi)|}{|F_{\text{НБЧШК}}(\varphi)|} \quad (7)$$

где $m=0,2$;

$$a_{\text{ШК}}=0,7;$$

$$\text{СГМ}_{\Sigma} = \frac{\text{СГМ}_{\text{УК}} + \alpha^2 \text{СГМ}_{\text{ШК}}}{1 + \alpha^2} \quad (8)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{|F_{\text{НБЧШК}}(\varphi)|}{|F_{\text{НБЧУК}}(\varphi)|}.$$

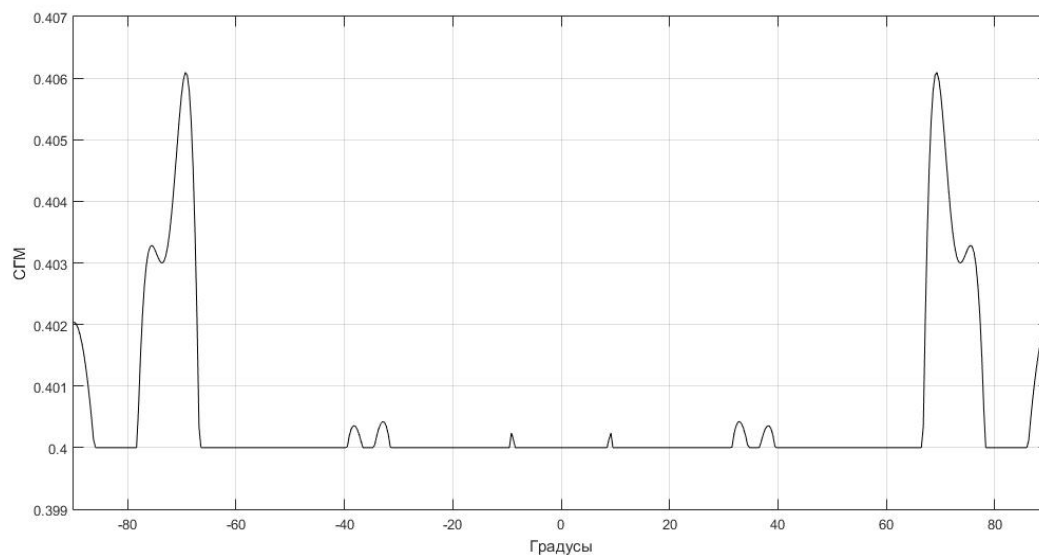


Рисунок 8 – СГМ, в диапазоне $\pm 90^\circ$

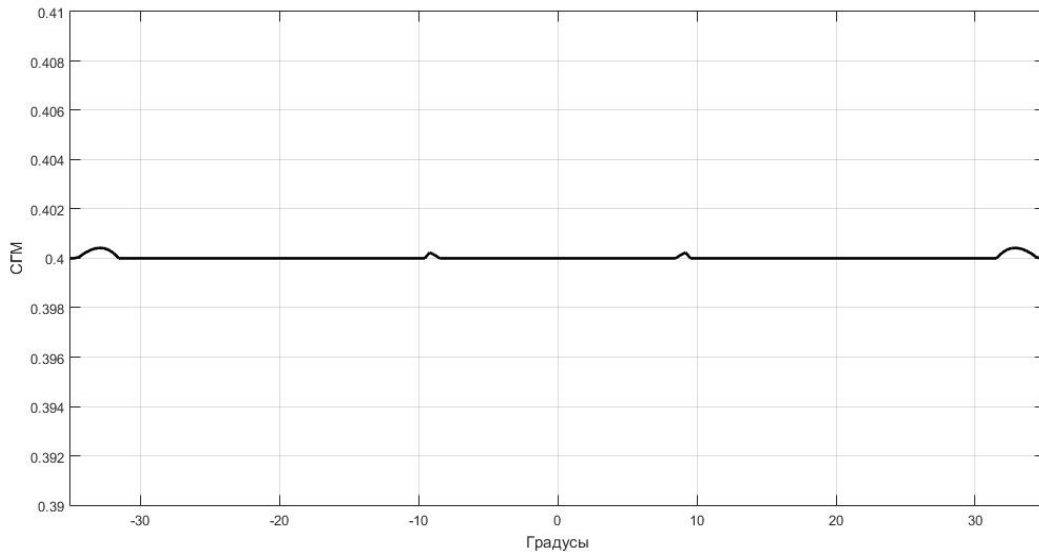


Рисунок 9 – СГМ, в диапазоне $\pm 35^\circ$

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ

Лист

28

3.3 Выводы

Таким образом, можно сделать вывод что если на выходе делителя мощности реализовать требуемое АФР, то антенна КРМ выполнит предъявляемые ей технические требования.

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		29

4 ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР СХЕМЫ ДЕЛИТЕЛЯ КРМ

В этом разделе будут рассмотрены схемы делителей КРМ СП-90 и СП-2010. Показаны их недостатки и преимущества.

Схема деления определяет к каком соотношения делится мощность в каждом элементе делителя. Также, в зависимости от использованного базового элемента, схема определяет приблизительное выходное фазовое распределение.

Для достижения минимальных габаритов требуется создать максимально простую схему деления, причем такую, чтобы последующая компоновка топологии была простой и была легкой в производстве и последующей настройке.

Применение объёмной интегральной технологии позволяет с большей пользой использовать объём СВЧ модуля, ввиду того что элементы делителя будут расположены в многослойной конструкции.

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		30

4.1 Схема делителя мощности КРМ СП-90

Делитель мощности КРМ СП-90 представляет собой многополюсник СВЧ с 4 входами и 17 выходами. Электрическая схема принципиальная делителя мощности представлена на рис. 10.

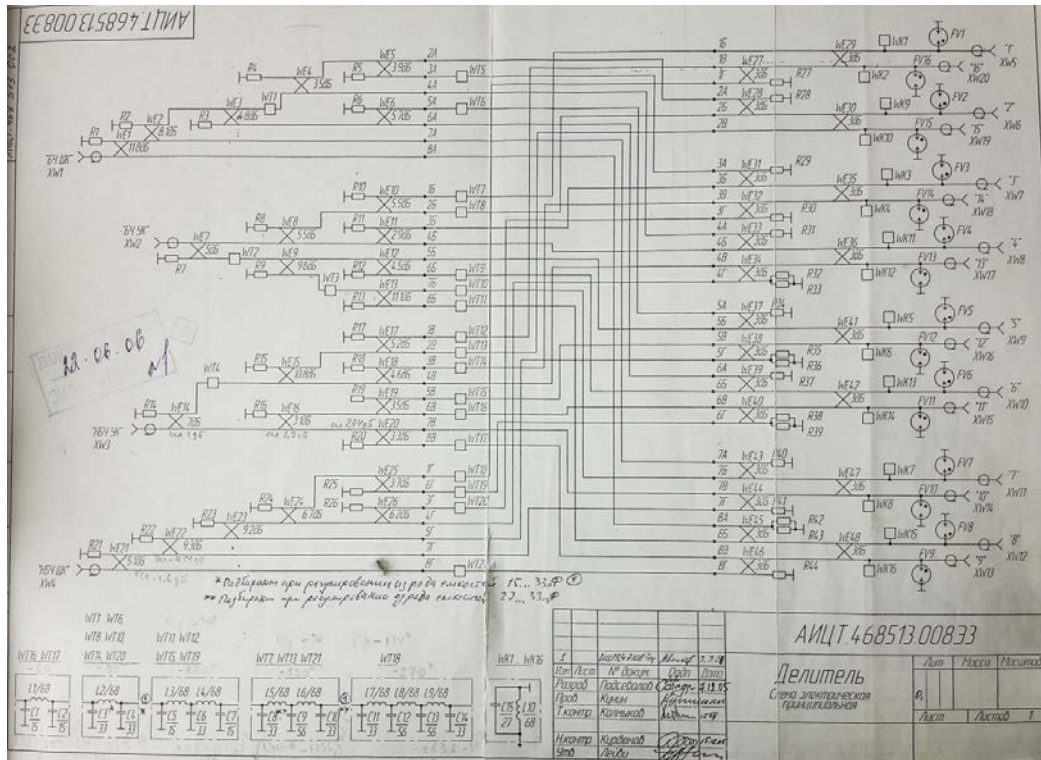


Рисунок 10 – Схема электрическая принципиальная делителя КРМ СП-90

Упрощённая структурная схема делителя представлена на рисунке 4. На ней видно, что каждое распределение формируется своим собственным делителем. Далее все это передается в сумматор, для суммирования. Причем происходит это с потерей половины мощности всех сигналов.

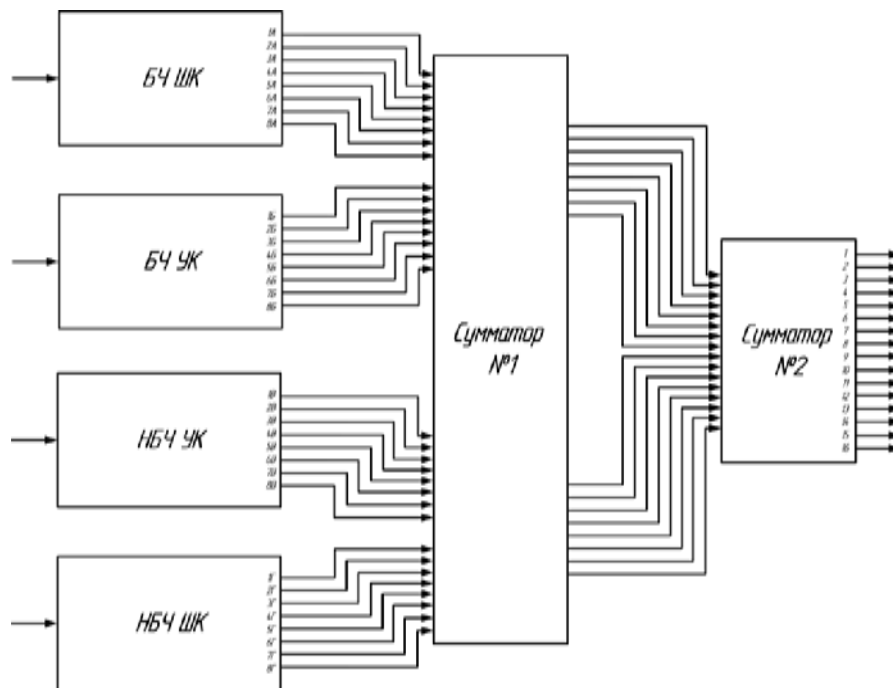


Рисунок 11 – Структурная схема делителя КРМ СП-90

Также в схеме имеется большое количество фазовращателей на дискретных компонентах, номиналы которых подбираются при регулировке.

4.2 Делитель мощности КРМ СП-2010 в предыдущем образце

Первый образец делителя КРМ был построен на основе использования зарубежных направленных ответвителей фирмы Anaren. Антенная КРМ системы посадки СП-2010 работает на частоте 110 МГц. Поэтому для специального амплитудно-фазового распределения требовались ответвители метрового диапазона рабочей частоты. А ассортименте фирмы Anaren на этот диапазон был представлен только 3-х децибельный ответвитель 1H0280-3.



Рисунок 12 – Ответвитель

Поэтому было принято решение использовать ответвители, у которых рабочий диапазон не совпадает нужным (табл. 3).

Таблица 3 – Выбранные ответвители фирмы Anaren

Наименование	Характеристики на частоте 110 МГц				Рабочий диапазон частот, МГц	Диапазон, в котором представлены S-параметры, МГц
	Рабочее затухание, дБ	Переходное затухание, дБ	Развязка, дБ	Обратные потери, дБ		
1H0280-3	-3,1	-3,3	-27,2	-31,8	90–180	90–180
11303-3	-0,6	-9,6	-32,8	-54,2	380–520	100–1000
XCC06A4-03S	-0,4	-11,2	-27,1	-25,2	410–860	100–6000
1F1304-3S	-0,36	-11,9	-26,9	-25,2	470–860	50–6000
11305-3S	-0,1	-17,8	-34,0	-31,7	1000–2000	50–6000
XC1900E-03	-0,05	-20,6	-34,2	-30,5	1700–2000	100–6000

Используя эти ответвители, была разработана следующая схема делителя КРМ.

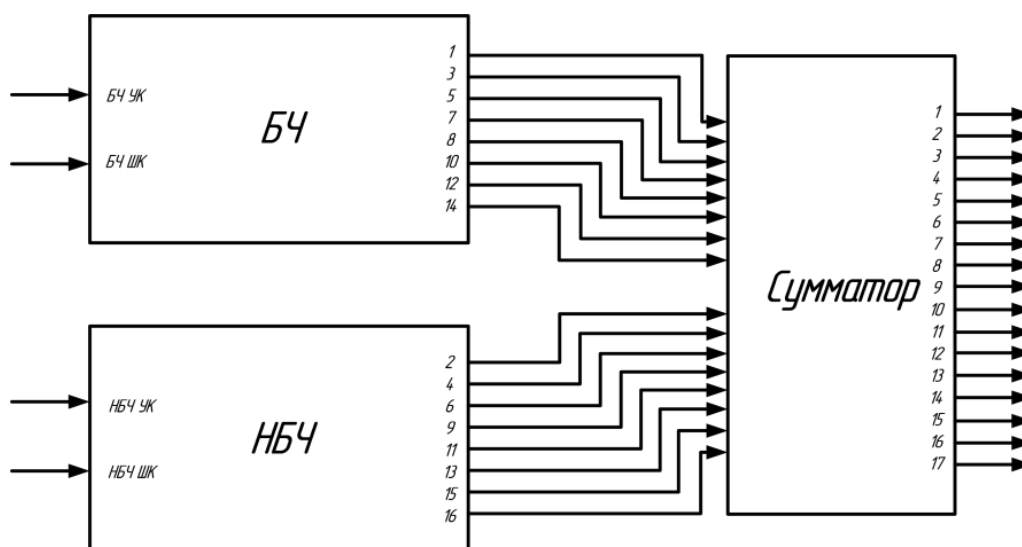


Рисунок 13 – Структурная схема разработанного делителя КРМ

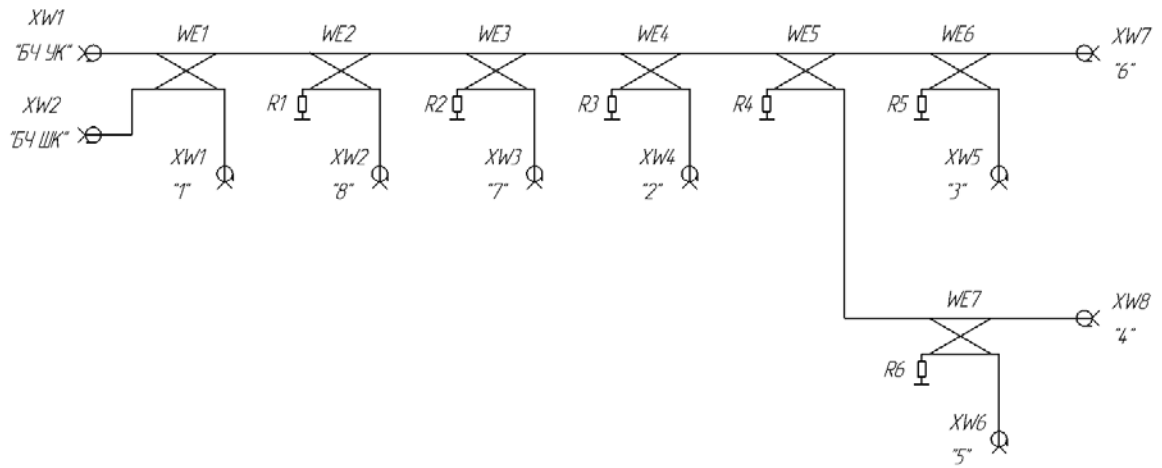


Рисунок 14 – Схема делителя БЧ

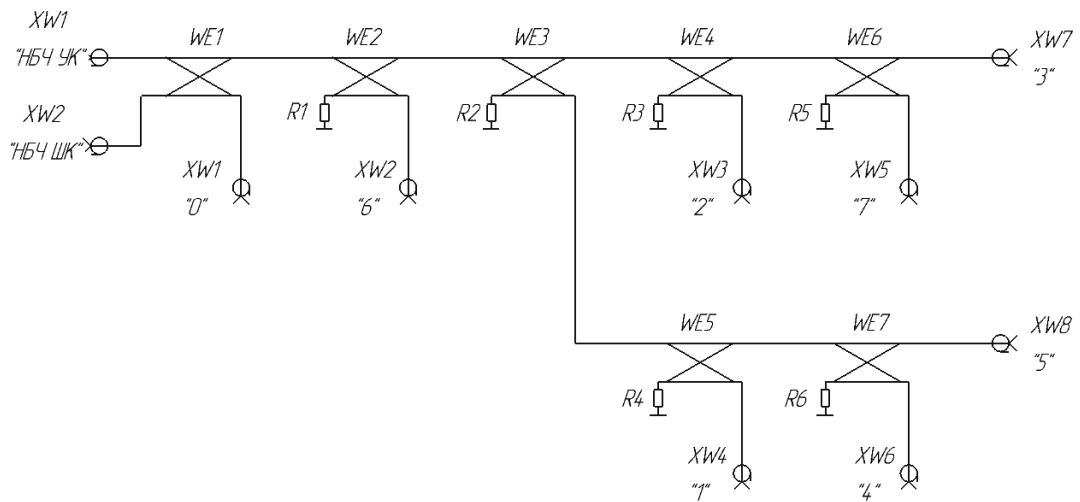


Рисунок 15 – Схема делителя НБЧ

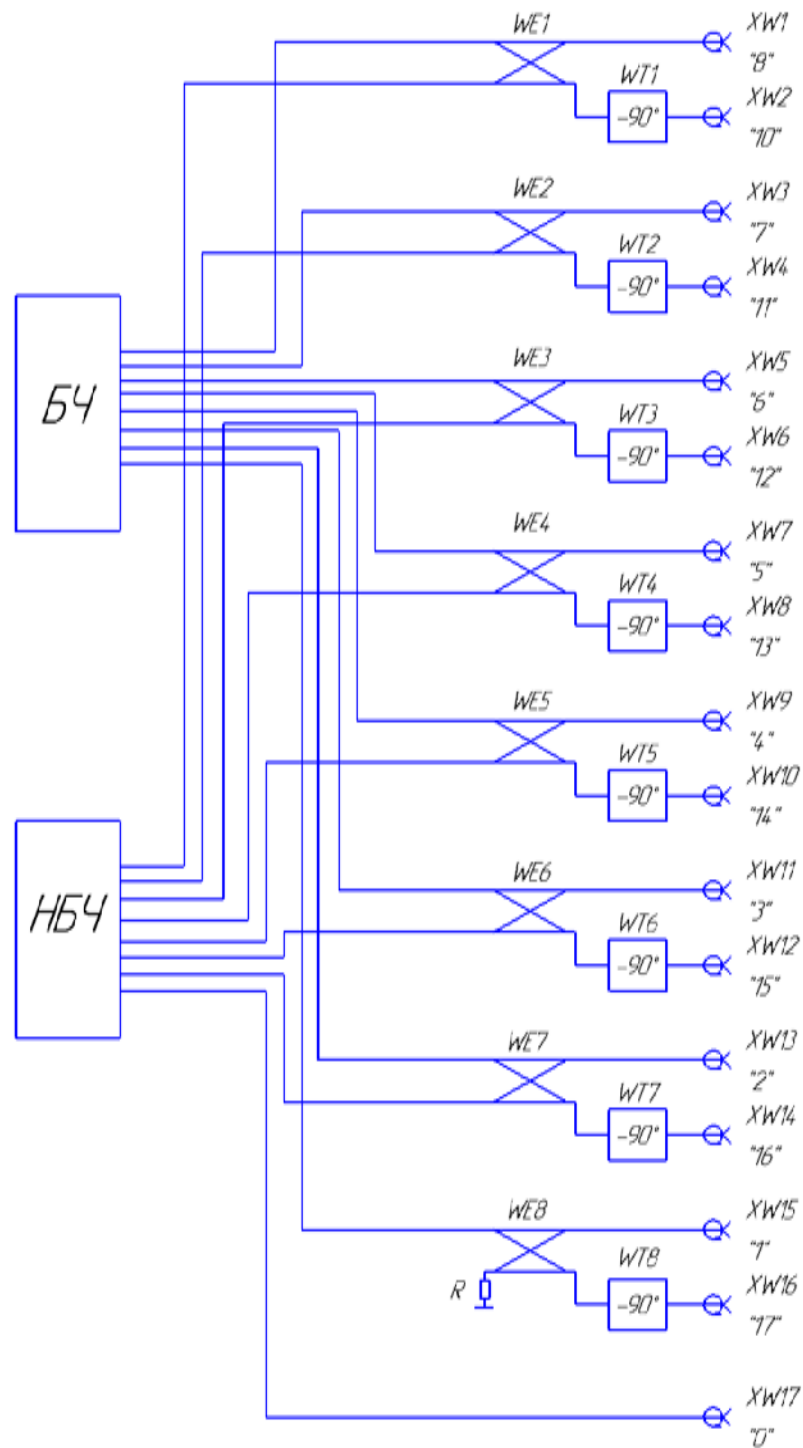


Рисунок 16 – Сумматор делителя КРМ

Очевидно, что в новой разработке было использовано гораздо меньше ответвителей. Также в сумматоре нет 50% потерь мощности.

4.3 Создание схемы нового делителя мощности КРМ

Направленные ответвители представляют собой направление взаимные симметричные восьмиполюсники. При возбуждении сигнала в одном из плеч такого восьмиполюсники, одно из трех его оставшихся плеч остаётся не возбужденным. При этом в два других плеча – основное и связанное, сигнал поступает, в зависимости от коэффициента связи между плечами. То есть происходит направленный отбор мощности из основного канала во вспомогательный.

Для характеристик свойств, направленных ответвителей используются следующие параметры.

Рабочее затухание, или выраженное в децибелах отношение мощностей на входе и выходе основного канала (9):

$$S_{12} = 10 \lg_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right), \quad (9)$$

Переходное ослабление (связь), или отношение мощности на входе основного канала к мощности на выходе связанного канала (дБ) (10):

$$S_{13} = 10 \lg_{10} \left(\frac{P_1}{P_3} \right), \quad (10)$$

Развязка, или отношение мощности на входе основного канала к мощности на выходе развязанного плеча связанного канала (дБ) (11):

$$S_{14} = 10 \lg_{10} \left(\frac{P_1}{P_4} \right), \quad (11)$$

Направленность, или отношение мощности на выходе основного канала к мощности на выходе развязанного плеча связанного канала (дБ) (12):

$$S_{34} = 10 \lg_{10} \left(\frac{P_3}{P_4} \right), \quad (12)$$

Коэффициент деления мощности, или отношение мощности на выходе основного канала к мощности на выходе связанного канала (дБ) (13):

$$S_{23} = 10 \lg_{10} \left(\frac{P_2}{P_3} \right), \quad (12)$$

Взаимность и симметричность ответвителя, говорят о том, что его свойства не зависят от его ориентации при подключении.

Это позволяет проектировать схему деления относительно сразу двух распределений.

Существенным недостатком схемы делителя КРМ предыдущей разработки, были большие фазовые сдвиги после каждого ответвителя. Так как, большинство ответвителей было соединено последовательно, поэтому на каждом выходе фаза менялась на 90 градусов.

Тогда как требовалось синфазное фазовое распределение, приходилось вводить настройку фазы, компенсировать фазовые сдвиги. Все это, не смотря на успешный результат, вносило дополнительные потери и не позволило создать широкополосный делитель мощности.

Для этого была использована схема в виде бинарного дерева (рис. 17, 18).

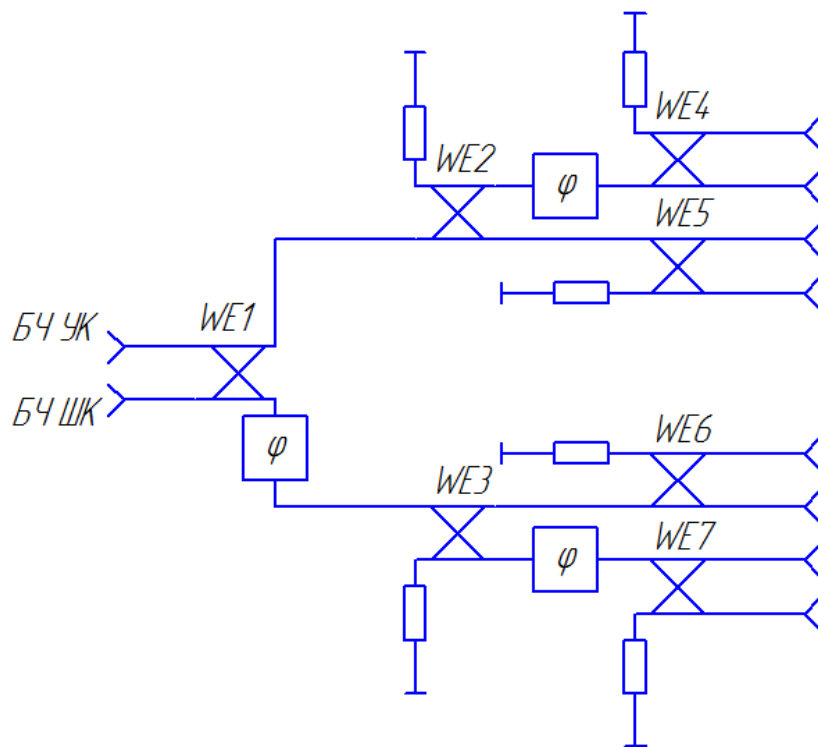


Рисунок 17 – Схема делителя БЧ

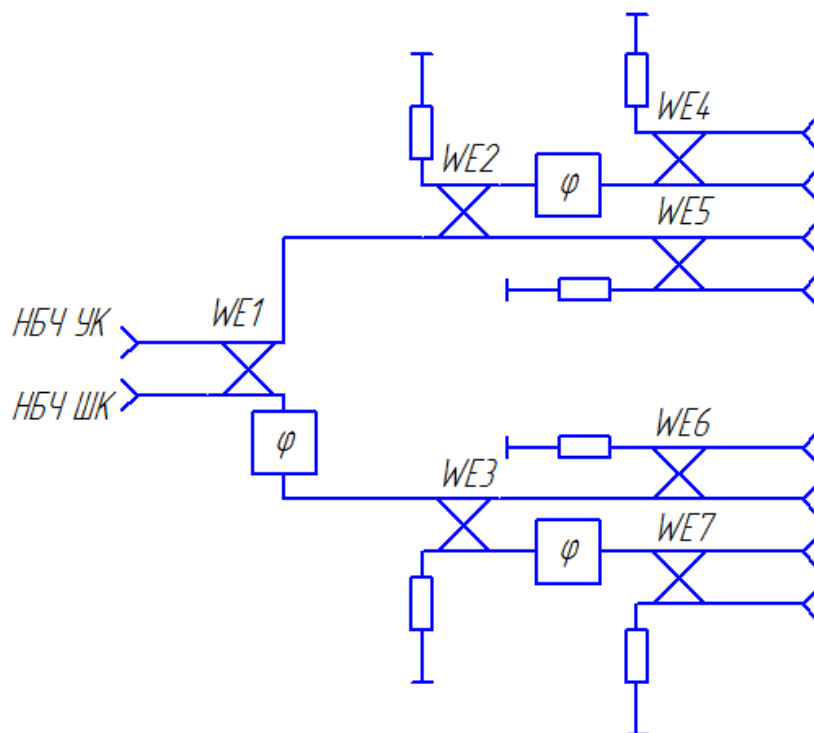


Рисунок 18 – Схема делителя НБЧ

Использование одинаковой схем деления облегчит процесс дальнейшего проектирования. Исходя из данной структуры, на площади платы должно располагаться как минимум восемь направленных ответвителей.

Рассмотрим в отдельности распределение схем БЧ и НБЧ. Схема БЧ как и схема НБЧ представляет собой делитель 2x8. Схема БЧ формирует распределение БЧ, схема НБЧ формирует распределение НБЧ. Далее сигналы БЧ и НБЧ делятся и складываются в сумматоре. То есть каждый сигнал БЧ (НБЧ) делится поровну на два в выходном трехдецибелном ответвителе, в этом же трехдецибелном ответвителе делится соответствующий сигнал НБЧ. За исключением выхода №8 БЧ и №1 НБЧ, для них нет парного выхода. Другими словами, выходы делителя БЧ и НБЧ образуют следующие пары: 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8. Таким образом для конструктивного упрощения требуется расположить данные пары как можно ближе друг к другу.

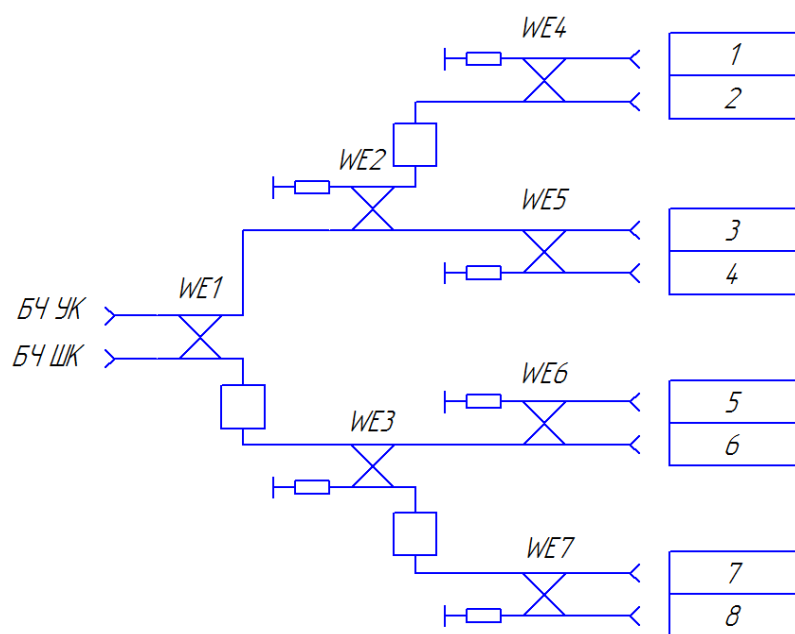


Рисунок 19 – Схема делителя БЧ на направленных ответвителях

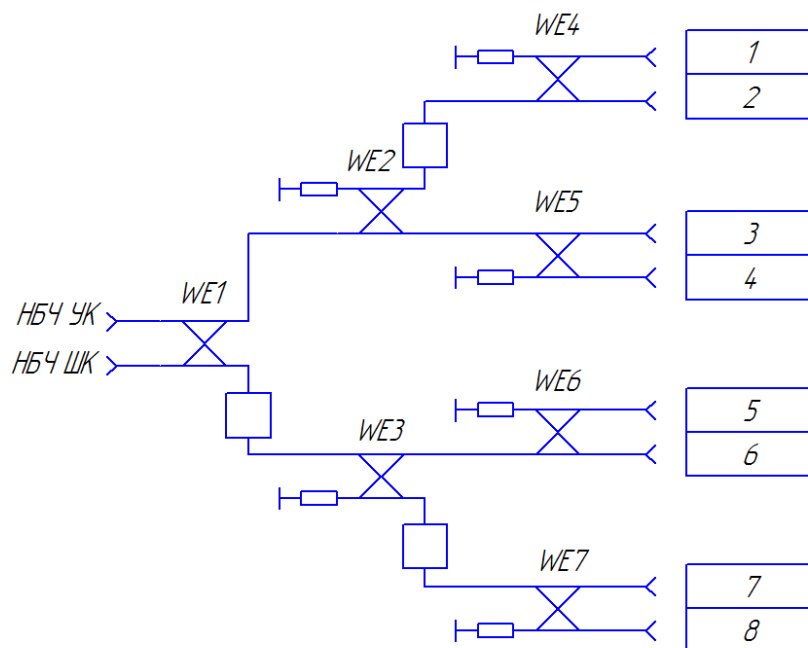


Рисунок 20 – Схема делителя НБЧ на направленных ответвителях

Для расчета коэффициентов связи ответвителей требуется совместно решить две системы уравнения. Номера выходов на картинке соответствуют таблицам распределения БЧ и НБЧ.

Составим системы уравнений, описывающие распределение мощности.

(Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчёт СВЧ элементов на полосковых линиях 1972 с. 198)

Запишем матрицу рассеяния идеального согласованного ответвителя, на одинаковых связанных линиях с развязанными плечами 1 и 4:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{21} & 0 & 0 & S_{24} \\ S_{31} & 0 & 0 & S_{34} \\ 0 & S_{42} & S_{43} & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Параметры ответвителей: S_{11} – характеризует обратные потери (коэффициент отражения), S_{21} – рабочее затухание (коэффициент передачи в основной канал), S_{31} – переходное затухание (коэффициент передачи в связанный канал), S_{41} – развязка (коэффициент передачи в развязанное плечо).

Если развязанное плечо не используется, то для нормальной работы его соединяют с согласованной нагрузкой.

Из условия симметрии унитарности матрицы рассеяния, следует что:

$$\begin{aligned} S_{12} = S_{21} = S_{34} = S_{43} \\ S_{13} = S_{24} = S_{31} = S_{42} \end{aligned} \quad (14)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & 0 & 0 & S_{13} \\ S_{13} & 0 & 0 & S_{12} \\ 0 & S_{13} & S_{12} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\sqrt{|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2} = 1 \quad (16)$$

На средней частоте ответвителя, коэффициент связи равен:

$$k = |S_{12}| = \sqrt{1 - |S_{13}|^2} \quad (17)$$

Обозначим буквой p рабочее затухание ответвителя:

$$p = \sqrt{1 - k^2} \quad (18)$$

Теперь введем систему уравнений описывающую распределение мощности по выходам в схеме бинарного дерева. Введем её относительно входа БЧ УК:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{1-k_{WE1}^2} \times k_{WE2}^2 \times k_{WE4}^2 = p_1 \\ \sqrt{1-k_{WE1}^2} \times k_{WE2}^2 \times \sqrt{1-k_{WE4}^2} = p_2 \\ \sqrt{1-k_{WE1}^2} \times \sqrt{1-k_{WE2}^2} \times \sqrt{1-k_{WE5}^2} = p_3 \\ \sqrt{1-k_{WE1}^2} \times \sqrt{1-k_{WE2}^2} \times k_{WE5}^2 = p_4 \\ k_{WE1}^2 \times \sqrt{1-k_{WE3}^2} \times k_{WE6}^2 = p_5 \\ k_{WE1}^2 \times \sqrt{1-k_{WE3}^2} \times \sqrt{1-k_{WE6}^2} = p_6 \\ k_{WE1}^2 \times k_{WE3}^2 \times \sqrt{1-k_{WE7}^2} = p_7 \\ k_{WE1}^2 \times k_{WE3}^2 \times k_{WE7}^2 = p_7 \end{array} \right. \quad (19)$$

Если переменным p_i сопоставить амплитудное распределение согласно таблице 8, и решить, то будут получены следующие расчётные значения коэффициентов связи ответвителей схемы БЧ (20):

$$\begin{array}{l} k_{WE1} = -3,23 \text{ дБ}; \\ k_{WE2} = -7,15 \text{ дБ}; \\ k_{WE3} = -8,01 \text{ дБ}; \\ k_{WE4} = -9,22 \text{ дБ}; \\ k_{WE5} = -2,53 \text{ дБ}; \\ k_{WE6} = -2,63 \text{ дБ}; \\ k_{WE7} = -5,68 \text{ дБ}; \end{array} \quad (20)$$

Очевидно, что ответвители WE5 и WE6 реализовать крайне сложно. Поэтому нужно найти такое решение системы чтобы коэффициент каждого ответвителя удовлетворял равенству:

$$k \leq -3 \text{ дБ}$$

Так структуру схемы изменить нельзя, требуется найти такую последовательность номеров выходов схемы БЧ, чтобы она удовлетворяла указанному выше условию. Также требуется чтобы эта последовательность удовлетворяла аналогичной системе для схемы НБЧ. То есть требуется чтобы выходы схемы БЧ были напротив выходов НБЧ.

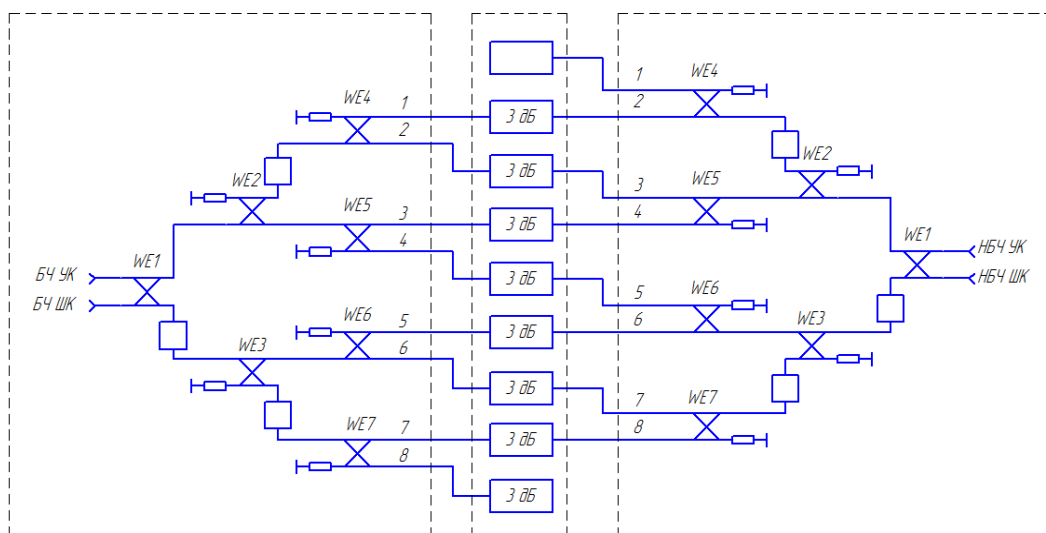


Рисунок 21 – Общая схема делителя KPM на направленных ответвителях

Для решения этой задачи воспользуемся методами оптимизации в среде Матлаб. Система MATLAB специально создана для проведения именно инженерных расчетов: математический аппарат, используемый ею, предельно приближен к современному математическому аппарату инженера.

Язык программирования системы MATLAB очень прост, близок к языку Basic. Он содержит всего несколько десятков операторов. Здесь большим числом процедур и функций, смысл которых понятен специалистам с соответствующей математической и инженерной подготовкой.

Таблица 4 – Амплитудно-фазовое распределение БЧ

№ выхода	БЧ УК			БЧ ШК		
	Амплитуда по напряжению	Ослабление, дБ	Фаза, ...°	Амплитуда по напряжению	Ослабление, дБ	Фаза, ...°
1	0,110	-19,17	0	0,997	-0,03	0
2	0,298	-10,50	0	0,023	-32,64	180
3	0,433	-7,26	0	0,034	-29,42	180
4	0,486	-6,26	0	0,038	-28,45	180
5	0,467	-6,62	0	0,026	-28,77	180
6	0,426	-7,41	0	0,033	-29,66	180
7	0,234	-12,62	0	0,013	-34,77	180
8	0,138	-17,23	0	0,011	-39,37	180

Таблица 5 – Амплитудно-фазовое распределение НБЧ

№ выхода	НБЧ УК			НБЧ ШК		
	Амплитуда по напряжению	Ослабление, дБ	Фаза, ...°	Амплитуда по напряжению	Ослабление, дБ	Фаза, ...°
0	0,230	-12,77	0	0,975	-0,02	0
1	0,563	-4,99	0	0,129	-17,74	180
2	0,529	-5,53	0	0,122	-18,28	180
3	0,433	-7,28	0	0,100	-20,01	180
4	0,336	-9,47	0	0,077	-22,21	180
5	0,199	-14,02	0	0,046	-26,79	180
6	0,090	-20,85	0	0,021	-33,60	180
7	0,025	-32,03	0	0,006	-44,95	180

Было получено наиболее приемлемое решение при:

$$n_{БЧ} = \{1, 2, 4, 3, 6, 5, 7, 8\} \text{ для схемы БЧ}$$

$$n_{БЧ} = \{1, 4, 2, 3, 6, 5, 7, 8\} \text{ для схемы НБЧ.}$$

Подставив согласно данной числовой последовательности номера выходов в систему уравнений, были получены следующие значения коэффициентов связей ответвителей для схемы БЧ и НБЧ (табл. 6 и 7):

Таблица 6 – Требуемые ослабления ответвителей для схемы БЧ

Ответвитель	Переходное ослабление, дБ
WE1	-3,24
WE2	-7,15
WE3	-7,97
WE4	-9,21
WE5	-3,53
WE6	-3,43
WE7	-5,56

Таблица 7 – Требуемые ослабления ответвителей для схемы НБЧ

Ответвитель	Переходное ослабление, дБ
WE1	-7.88
WE2	-5,42
WE3	-11,87
WE4	-6,58
WE5	-3,29
WE6	-5,85
WE7	-6,21

5 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ДЕЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ КРМ В ВИДЕ ОБЪЕМНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО МОДУЛЯ СВЧ

5.1 Объёмная интегральная технология

В этом разделе рассмотрены вопросы, посвященные разработке конструкции делителя мощности в виде объёмного интегрального модуля. В качестве базового элемента ОИС, выбран направленный ответвитель. Для дальнейшей разработки требуется выбрать тип линии, параметры диэлектрического основания, материалы для неё.

Применение объёмной интегральной технологии позволяет с большей пользой использовать объём СВЧ модуля, ввиду того что элементы делителя будут расположены в многослойной конструкции.

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		47

5.2 Разработка направленного ответвителя

Как уже отмечалось выше, в качестве базового элемента делителя будет использован направленный ответвитель. Направленный ответвитель может иметь разнообразные реализации на различных типах линий передачи (рис. 22). В данной работе наибольший интерес представляет симметричная и несимметричная полосковая линия.

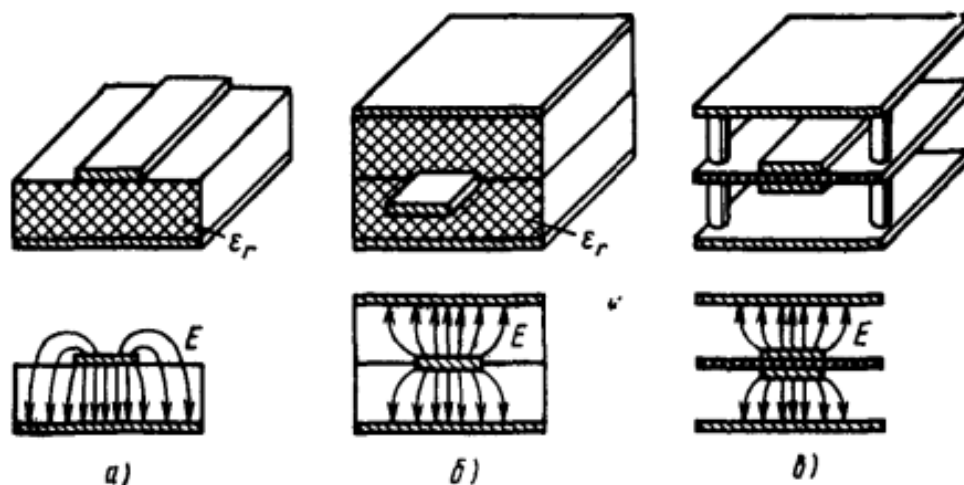


Рисунок 22 – Полосковые линии передачи: а – несимметричная линия, б – симметричная линия, в – высокочастотная линия

Построение многоканального делителя с использованием направленных ответвителей позволяет сделать именно такой модуль, какой требуется по техническому заданию.

Направленные ответвители строятся в основном на связанных линиях. Используются связанные линии с лицевой, боковой связью и ответвители Ланге (рис. 23).

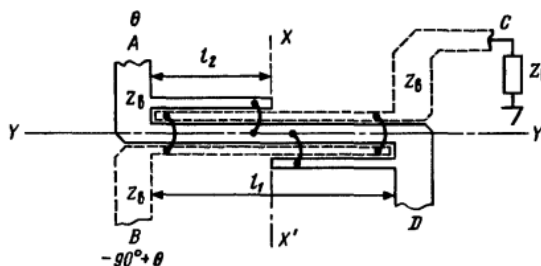


Рисунок 23 – Ответвитель Ланге

Недостатком ответвитель Ланге являются его размеры, из-за использования четвертьволновых отрезков, и использование перемычек, которые снижают его надежность.

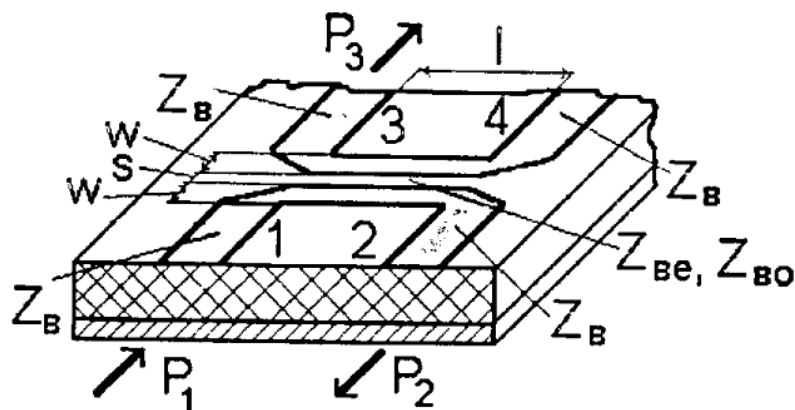


Рисунок 24 – Ответвитель с торцевой связью

Ответвители с торцевой связью (рис. 24) могут выполняться как на симметричной, так и на несимметричной полосковой линии. Эти устройства состоят из двух связанных полосковых линий, расположенных на диэлектрическом основании, с одной стороны. Связь между проводящими линиями контролируется зазором между ними, также величина связи между проводящими линиями зависит от используемого диэлектрика и формы полосков. С торцевой связью обычно хорошо получаются ответвители со слабой (меньше минус 10 дБ) связью.

Направленный ответвитель с лицевой связью – многополюсник, состоящий из двух связанных линий, расположенная с двух сторон от основания диэлектрика (рис. 25).

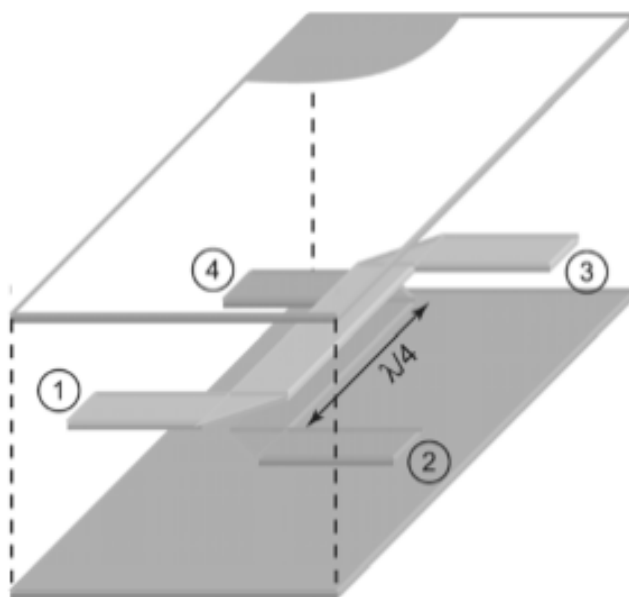


Рисунок 25 – Ответвитель на связанных линиях с лицевой связью

Согласно табл. 6 и 7, требуется разработать 14 различных ответвителей с сильной связью.

Направленные ответвители этого типа, отлично подходят для реализации связи между полосками от минус 3 дБ до минус 12 дБ, эти направленные ответвители отлично согласуются, а также они наиболее просты и в изготовлении, и при проектировании. Соответственно была выбрана симметричная полосковая линия.

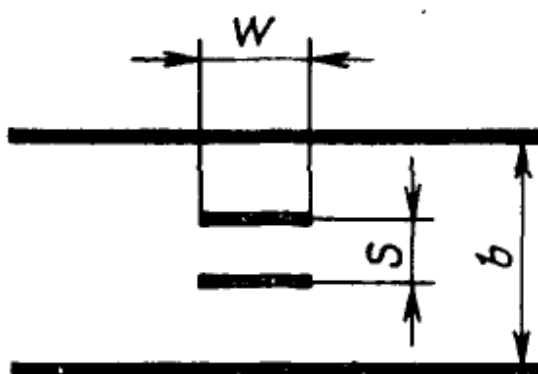


Рисунок 26 – Структура платы направленного ответвителя с полной лицевой связью

Для начала был разработан 3-децибелльный ответвитель. Исходя из габаритов плат и применяемых материалов, была рассчитана наиболее подходящая комбинация материалов для разработки направленных ответвителей с различной коэффициентом связи – RO4003 толщиной 0,813 мм и 1,524 мм, и RO4450В толщиной 0,102 мм (препрег) (рис. 27).

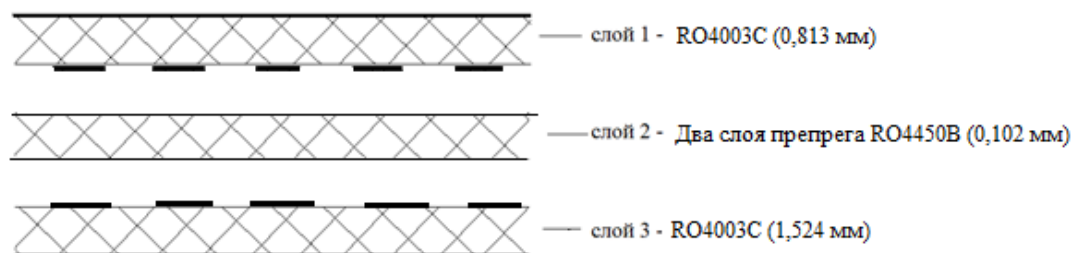


Рисунок 27 – Выбранная структура платы направленного ответвителя

Согласно [2] и [9], связь конструктивных и электрических характеристик ответвителя, определяется соотношениями:

$$\rho_{oe} = \frac{188,3}{\frac{W}{b-S} + \frac{\ln(4)}{\pi} + \frac{1}{\pi} \times \frac{C}{\epsilon_a}} \sqrt{\epsilon} [Ом] \quad (21)$$

$$\rho_{oo} = \frac{188,3 \times \frac{S}{b}}{\frac{W}{b-S} + \frac{1}{\pi} \times \frac{C}{\epsilon_a}} \sqrt{\epsilon} [Ом] \quad (22)$$

где

$$\frac{C}{\epsilon_a} = \frac{S}{b-S} \times \ln\left(\frac{b}{S}\right) - \ln\left(1 - \frac{S}{b}\right) \quad (23)$$

Коэффициент связи рассчитаем по формуле:

$$C = \frac{\rho_{oe} - \rho_{oo}}{\rho_{oe} + \rho_{oo}} \quad (24)$$

Так как расстояние от полосковых проводников до верхнего и нижнего экрана отличаются (0,813 и 1,524 мм) то данные формулы можно использовать только для оценочного расчета.

Таким образом, при $w=0,6$ мм, $b=2,2$ мм, $s=2,2$ мм, $\epsilon_r=3,38$, получаем:

$$C = -3,33 \text{ дБ}$$

Далее данный ответвитель был смоделирован в CST Microwave Office (рис. 28).

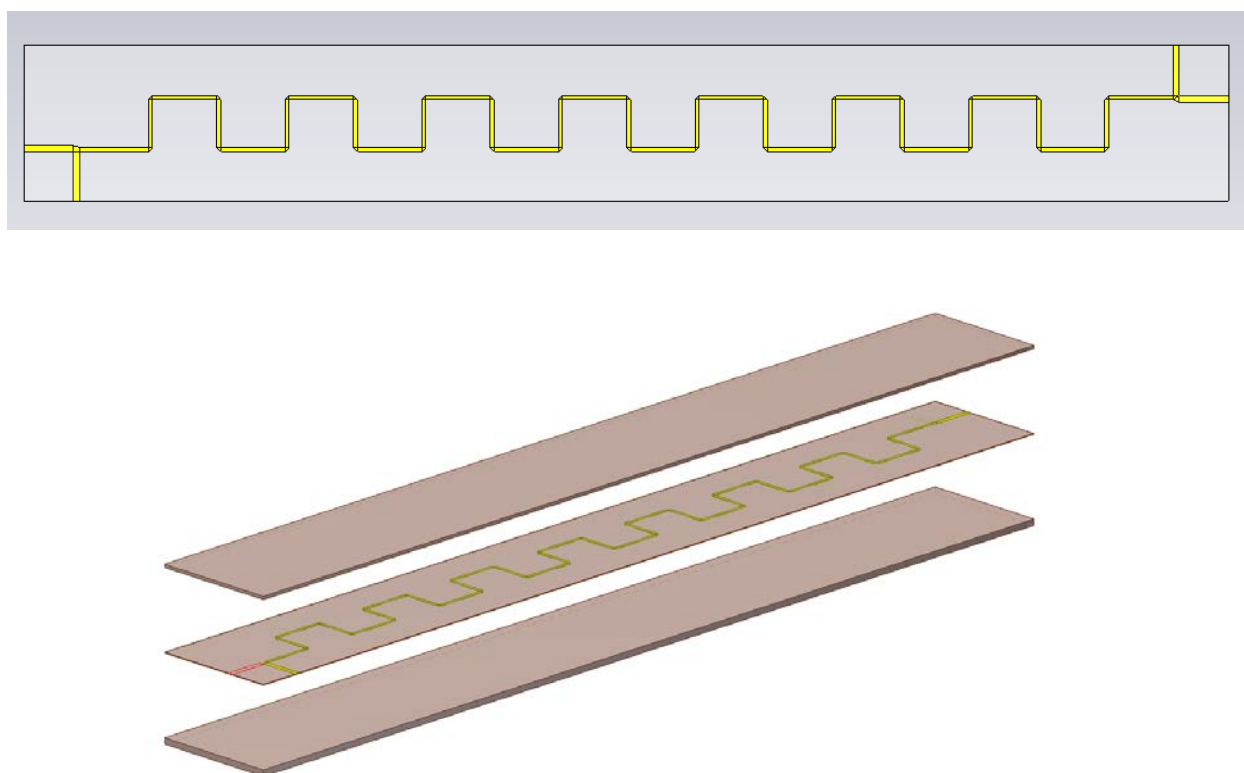


Рисунок 28 – Общий вид 3-х децибельного направленного ответвителя

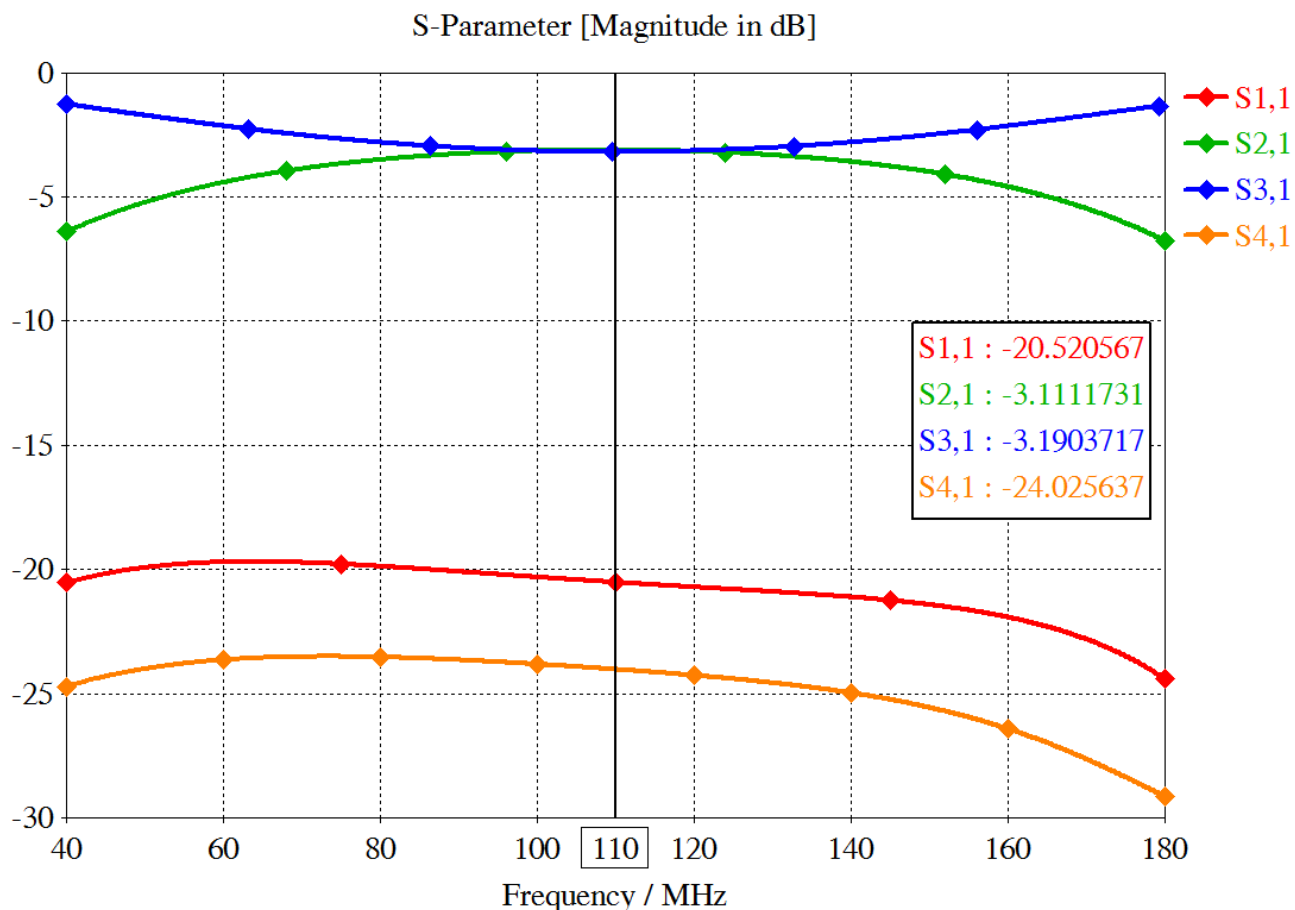


Рисунок 29 – Расчётные характеристики S-параметров ответвителя

Расчетный коэффициент связи на частоте $f=110$ МГц и $l = \frac{\lambda}{4} = 264$ мм имеет следующие параметры (рис. 29 и 30):

Обратные потери:

$$S_{11} = -20,52 \text{ дБ}$$

Рабочее затухание:

$$S_{21} = -3,19 \text{ дБ}$$

Переходное ослабление (связь):

$$S_{31} = -3,11 \text{ дБ}$$

$$C_p = -3,11 \text{ дБ}$$

Развязка:

$$S_{41} = -24,0 \text{ dB}$$

Направленность:

$$S_{43} = -21,0 \text{ dB}$$

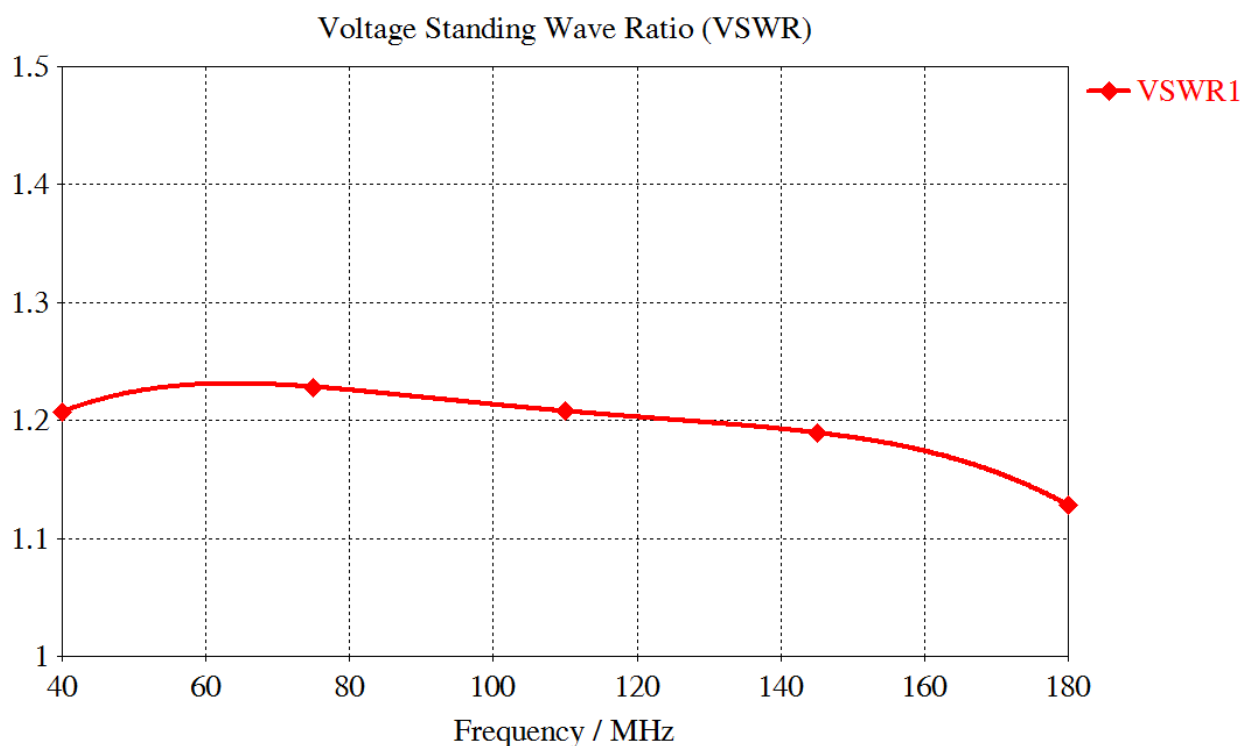


Рисунок 30 – КСВН направленного ответвителя

Таким образом был окончательно определено конструктов направленных ответвителей делителя мощности.

Для упрощения делитель был разделен на три многослойный печатные платы (БЧ, НБЧ, сумматор). Каждая из этих плат представляет 2-х или 3-х слойную печатную плату, полученные методом горячего спекания с помощью препрега. При дальнейшей сборке платы соединяются с помощью болтового соединения к корпусу.

Разработанная плата сумматора имеет следующую топологию (рис 31 и 32). Размеры платы получились следующие 247x158x2.65 мм. Это соответствует технологическим возможностям многих предприятий, изготавливающих печатные платы.

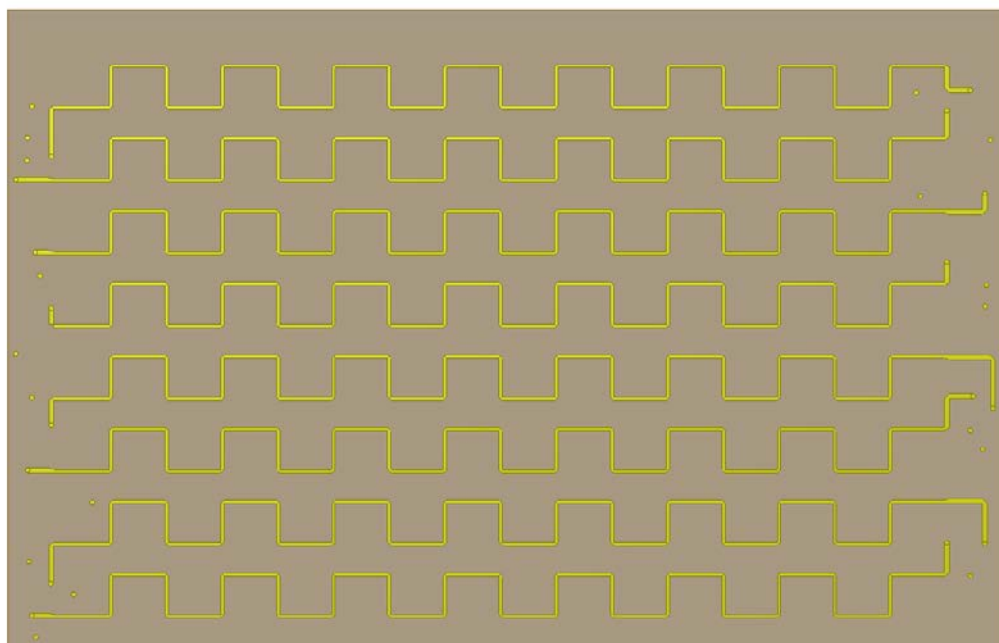


Рисунок 31 – Верхний слой топологии платы сумматора

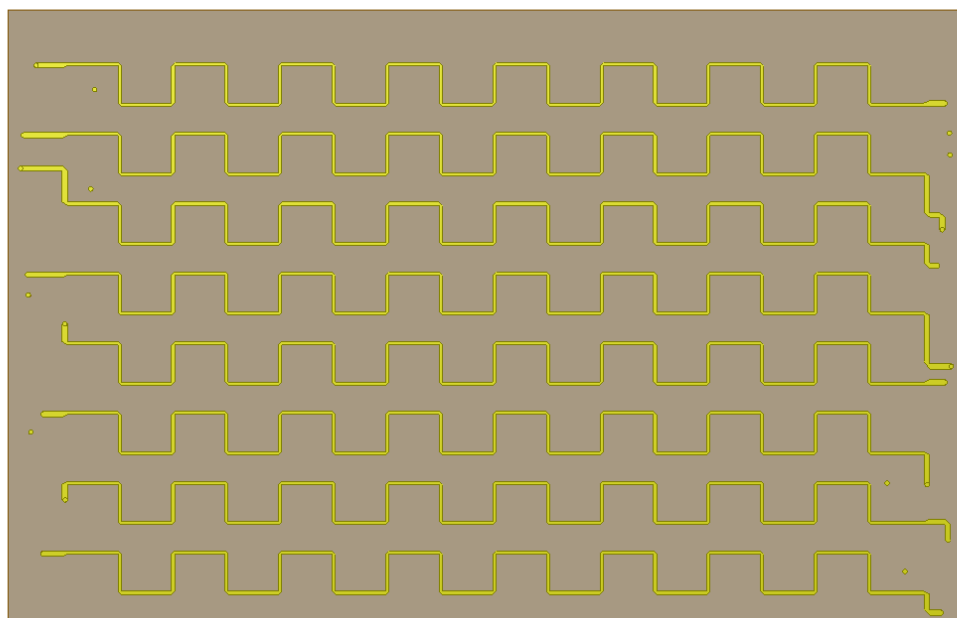


Рисунок 32 – Нижний слой топологии сумматора

5.3 Разработка многослойных плат делителя мощности

Данный раздел посвящен разработке многослойных плат делителя мощности. Как было отмечено ранее, делитель был разделен на три основных платы – БЧ, НБЧ и сумматор. Также помимо этого в конструкции будут присутствовать платы для настройки фазы. Всего их будет три: По одной для подстройки плат БЧ и НБЧ и еще одна для конечной настройки выходного фазового распределения после сумматора. Так же эта плата будет иметь на верхней стороне слой с микрополосковой линией.

Согласно, рассчитанной схеме, плата БЧ имеет в своем составе семь направленных ответвителей. Данные направленные ответвители имеют такое же конструктивное исполнение что и, описанный выше, трехдецибелльный направленный ответвитель.

Для изменения коэффициента связи ответвителя было применено смещение полосков относительно друг друга и изменение их ширины. Данный прием позволяет в широких пределах регулировать коэффициент связи ответвителя.

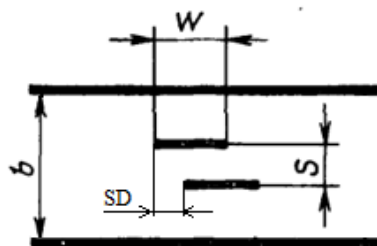


Рисунок 33 – Структура платы направленного ответвителя с изменением коэффициента связи

Так, например, смещение на 0,8 мм позволяет получить связь на уровне 7-6 дБ. Кроме этого для настройки согласования и направленности имеется возможность изменения ширины полосковых проводников. Так были рассчитаны остальные ответвители (табл. 8 и 9).

Таблица 8 – Ответвители платы БЧ

Ответвитель	Коэффициент связи, дБ	Ширина полоска, мм	Смещение между полосками, мм
WE1	3,23	0,65	0
WE2	7,16	0,8	0,8
WE3	7,97	1,1	1,1
WE4	9,21	1,05	1,15
WE5	3,54	0,65	0,1
WE6	3,43	0,65	0,05
WE7	5,56	0,75	0,6

Таблица 9 – Ответвители платы НБЧ

Ответвитель	Коэффициент связи, дБ	Ширина полоска, мм	Смещение между полосками, мм
WE1	7,88	0,8	0,85
WE2	5,42	0,7	0,55
WE3	11,85	1,1	1,4
WE4	6,58	0,8	0,7
WE5	3,29	0,65	0
WE6	5,85	0,9	0,75
WE7	6,21	0,8	0,7

Используя эти данные, были спроектированы платы БЧ и НБЧ, в виде трехслойной печатной платы. Исходная схема была преобразована. В полосковом исполнении данная схема принимает следующий вид (рис. 34)

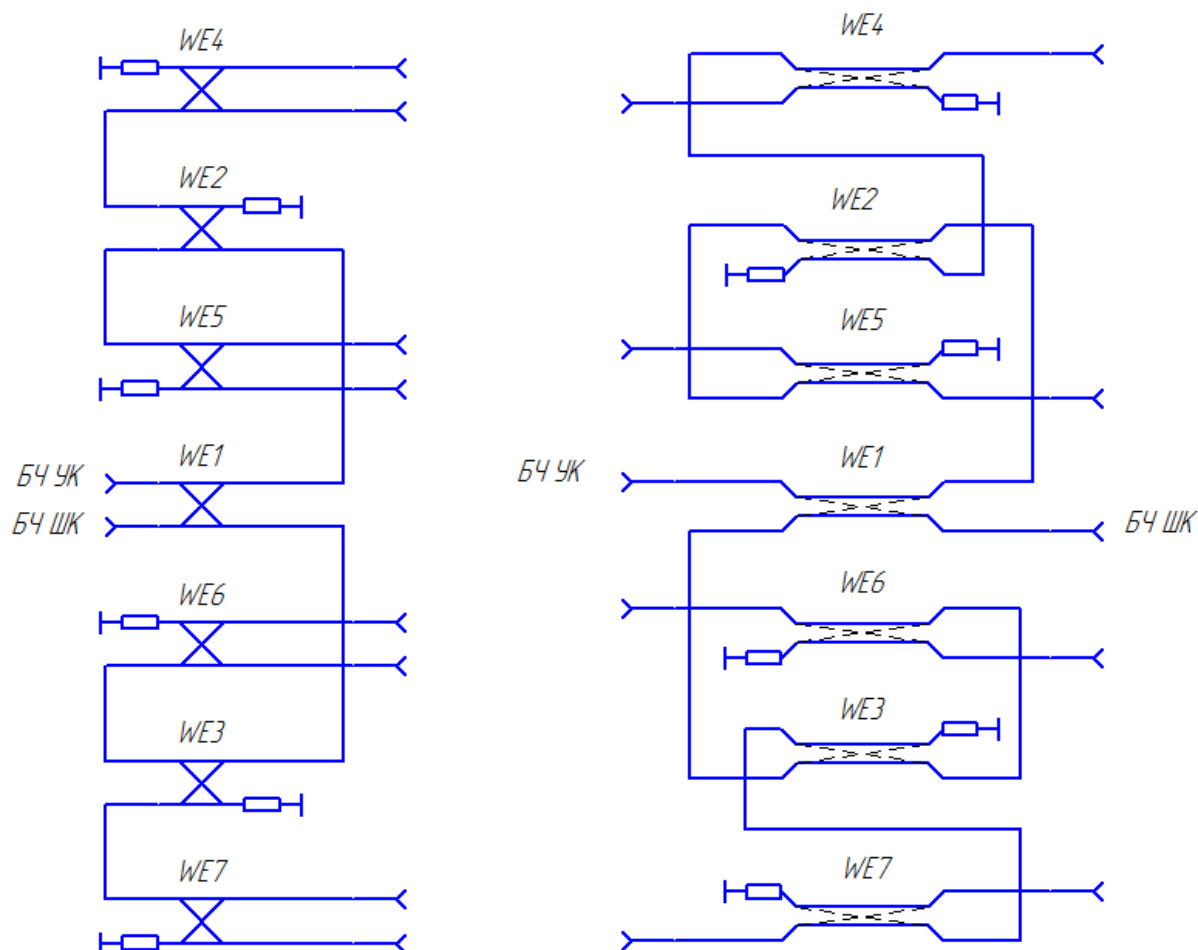


Рисунок 34 – Компоновка ответвителей на плату БЧ

Все ответвители выполнены в виде четвертьволновых связанных линий с лицевой связью (рис. 12). Диэлектрический фольгированный материал был использован тот же что и в сумматоре.

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ

Лист

58

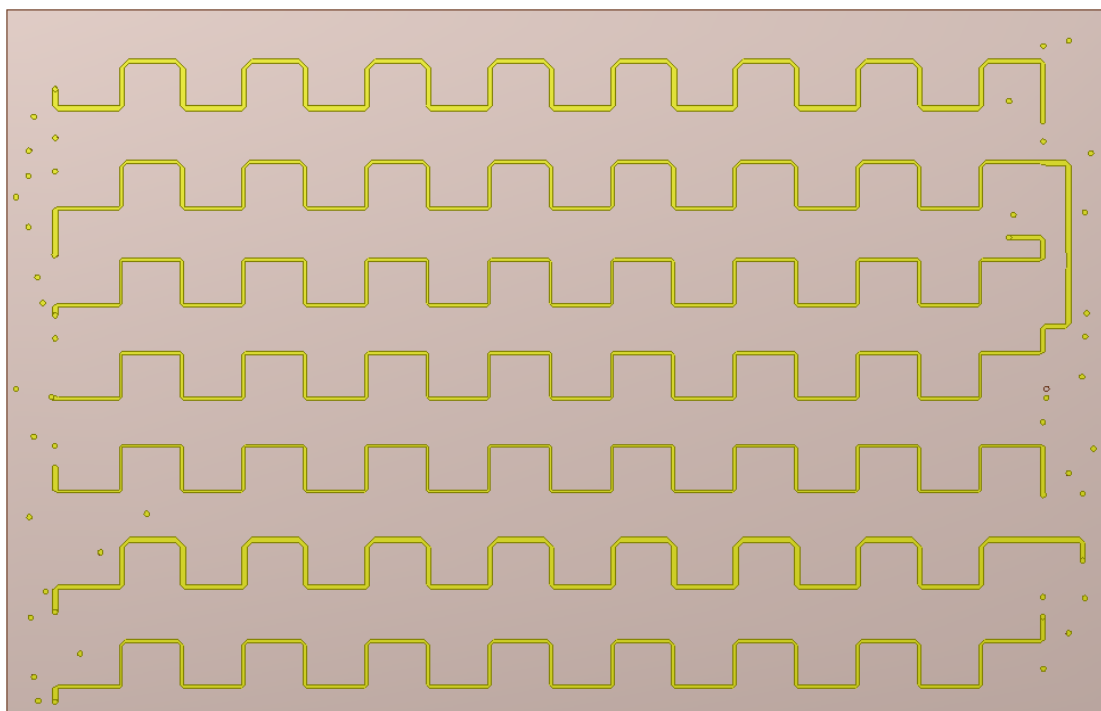


Рисунок 35 – Верхний слой топологии платы БЧ

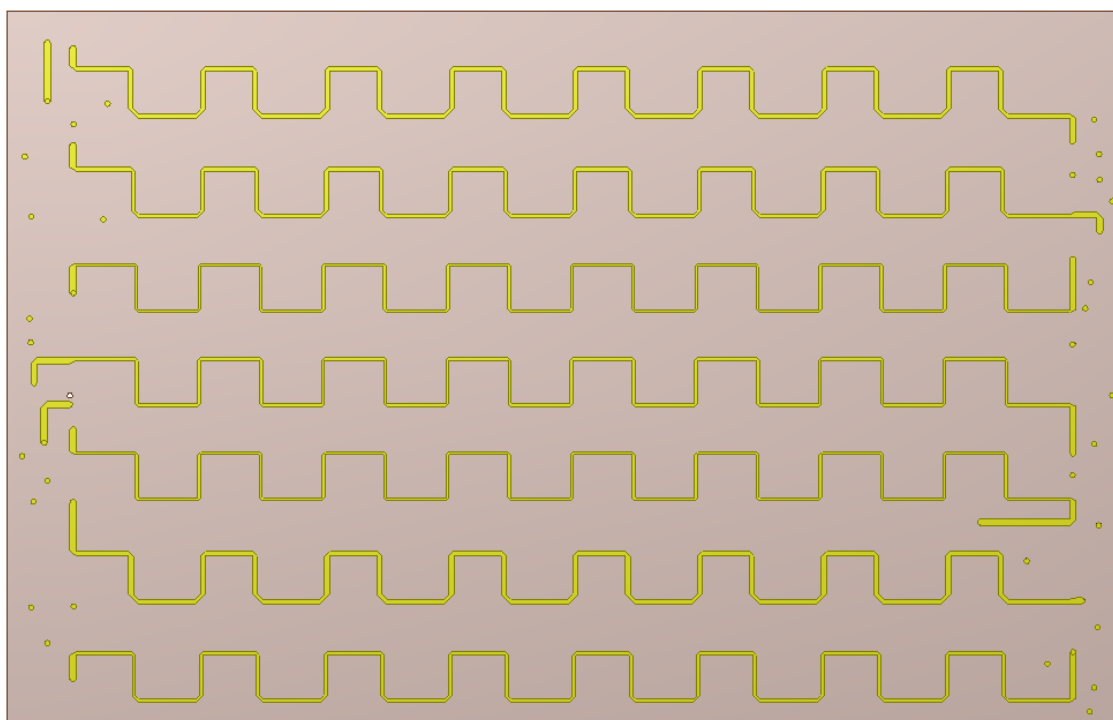


Рисунок 36 – Нижний слой топологии платы БЧ

Плата была смоделирована в среде Microwave Studio CST. Полученное амплитудное распределение представлено на рисунке 13. Полученное амплитудное и фазовое распределение в сравнении требуемым значениями представлено ниже (табл. 5 и 6). Фазовое распределение было от нормировано по среднему значению.

Таблица 10 – Амплитудное распределение

№ выхода	Требуемые значения, дБ	Расчётные значения, дБ
1	-19,17	-19,95
2	-10,50	-10,91
3	-7,26	-7,40
4	-6,26	-6,28
5	-6,62	-6,99
6	-7,41	-7,98
7	-12,62	-13,36
8	-17,23	-18,12

Таблица 11 - Фазовое распределение

№ выхода	Требуемые значения, град.	Расчетные значения, град.	Нормированные значения, град.
1	0	65,12	-1,00
2	0	66,16	0,04
3	0	65,36	-0,76
4	0	65,72	-0,40
5	0	65,36	-0,76
6	0	65,63	-0,49
7	0	66,62	0,50
8	0	68,96	2,80

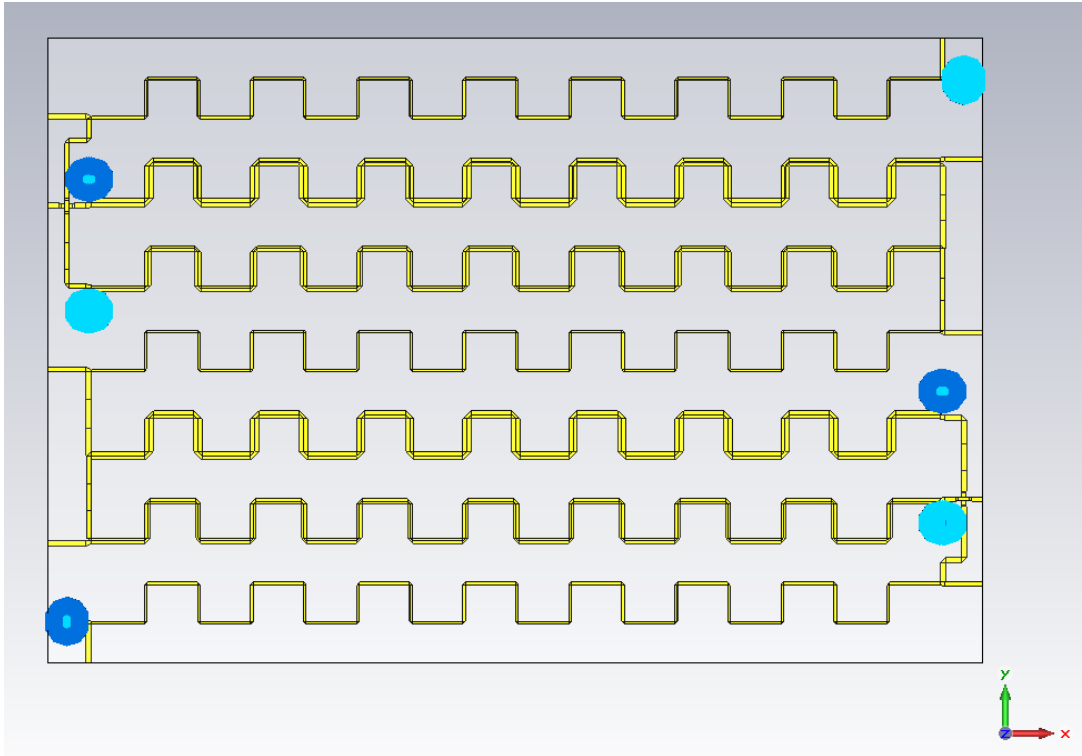


Рисунок 37 – Топологический рисунок проводников платы
БЧ делителя мощности КРМ

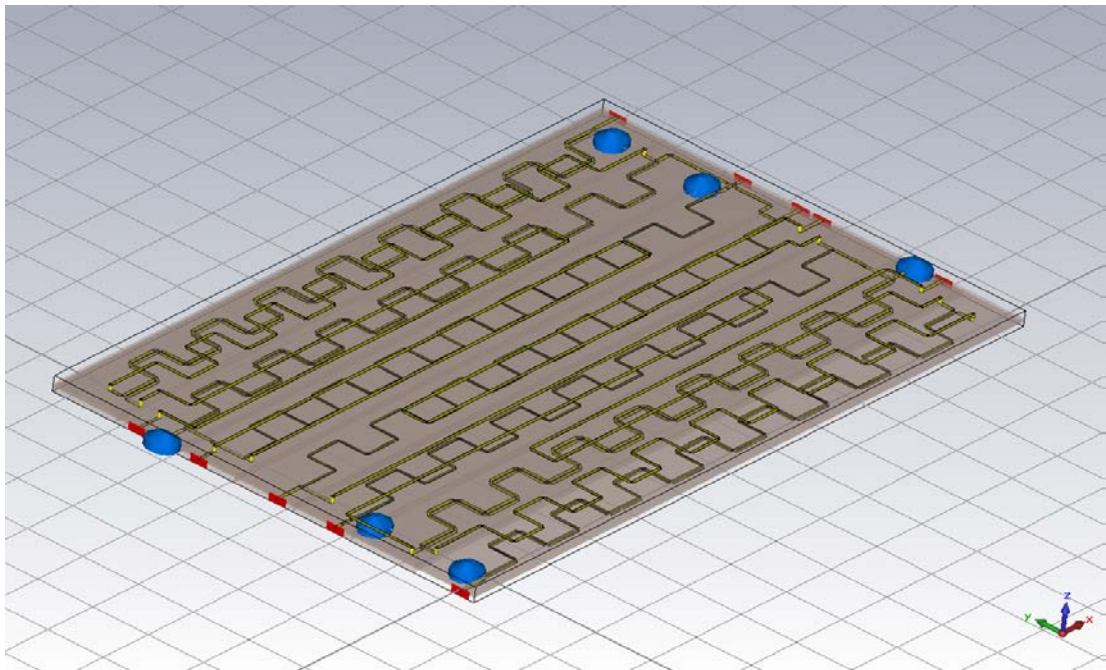


Рисунок 38 – Модель платы БЧ и платы фазирования в CST Microwave Studio

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ

Лист

61

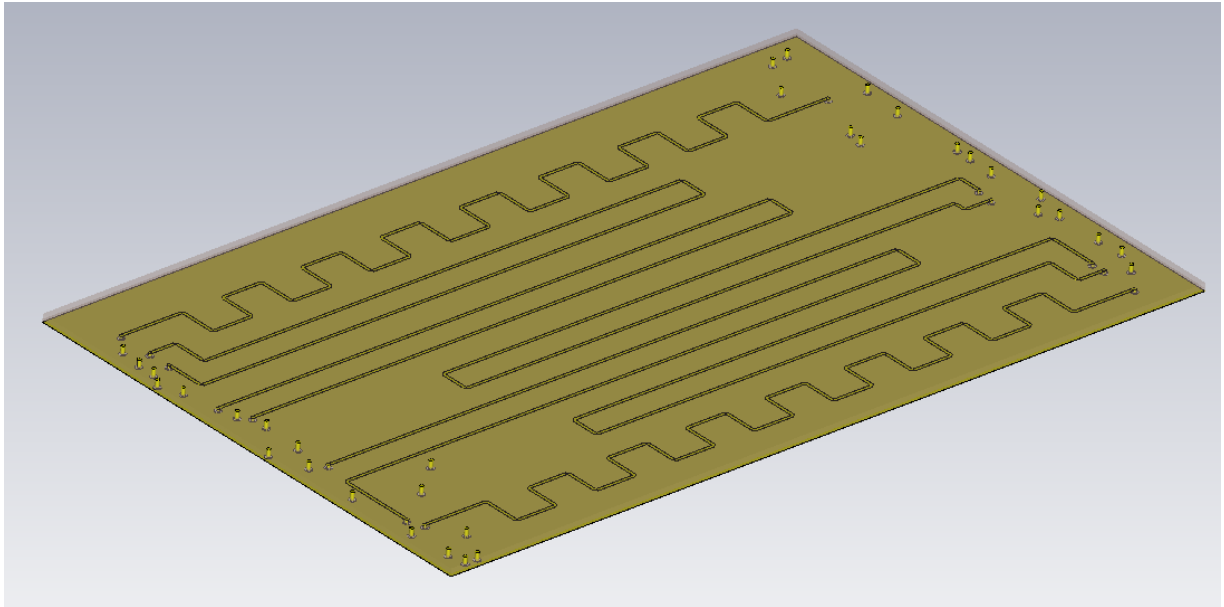


Рисунок 39 – Плата фазовой настройки платы БЧ

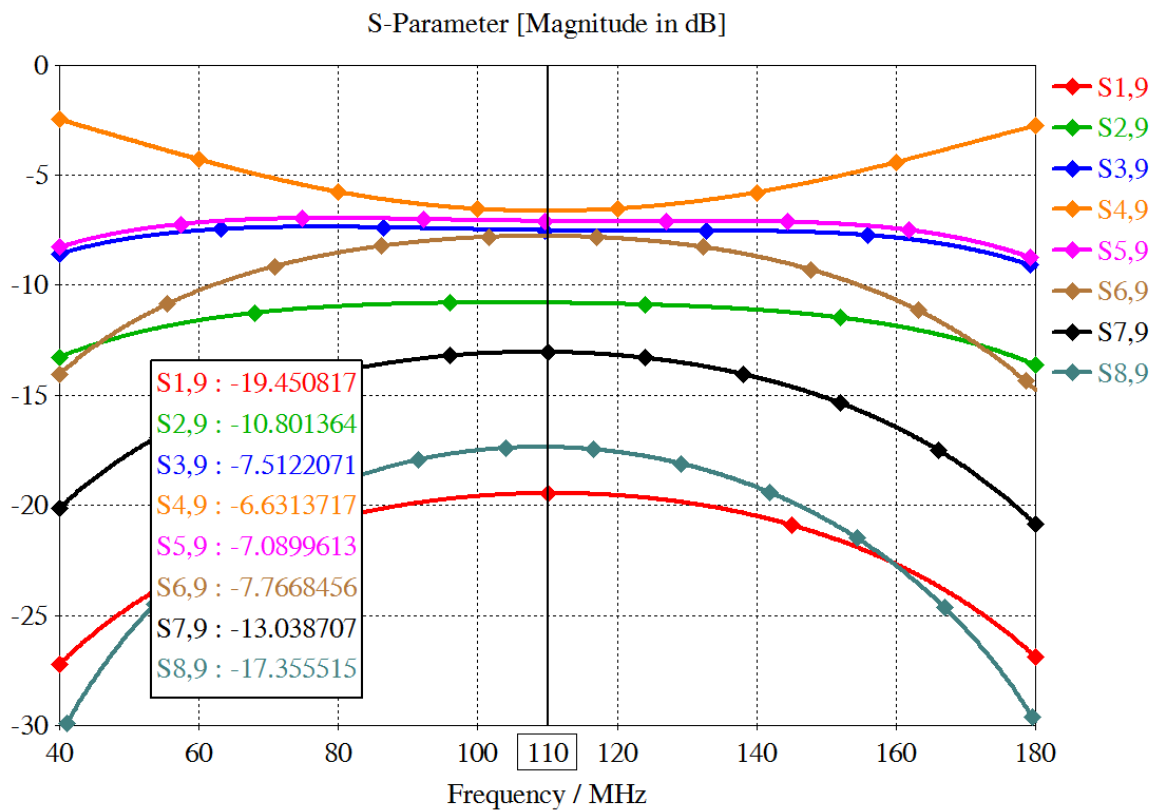


Рисунок 40 – Результат моделирования в CST Microwave Studio

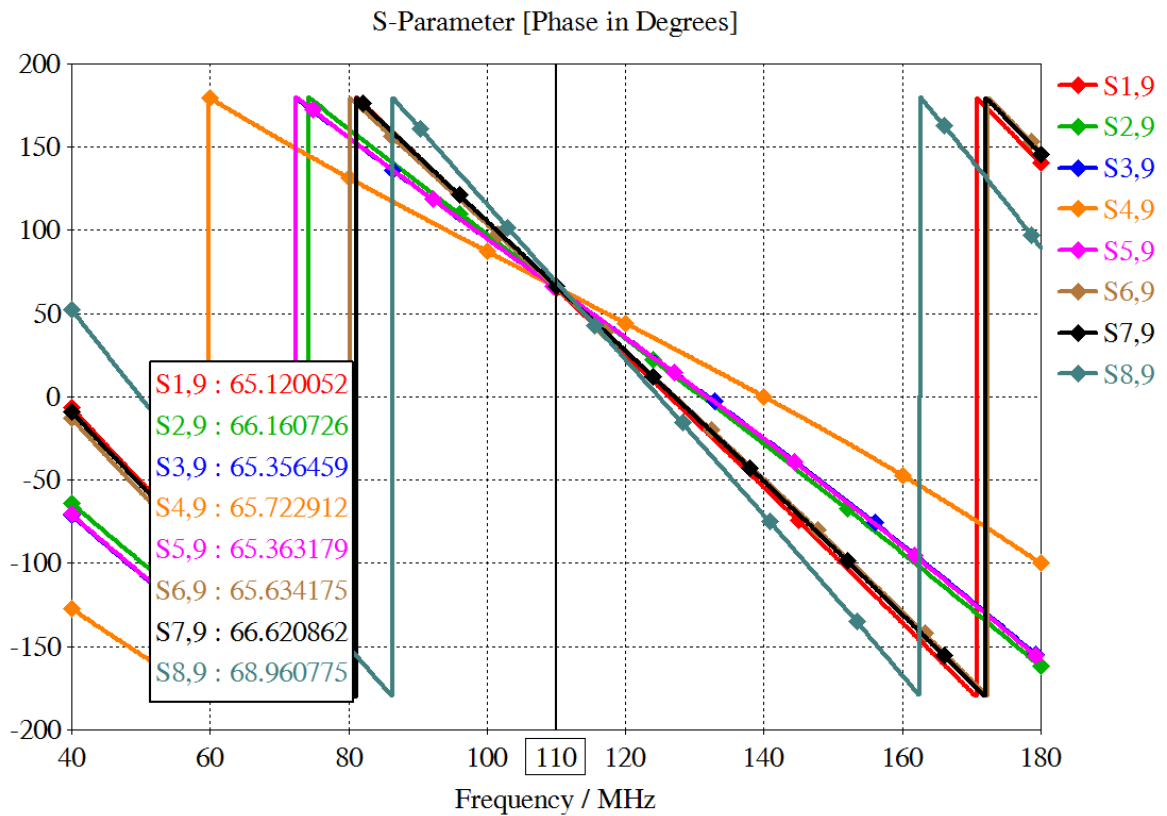


Рисунок 41 – Результат моделирования в CST Microwave Studio

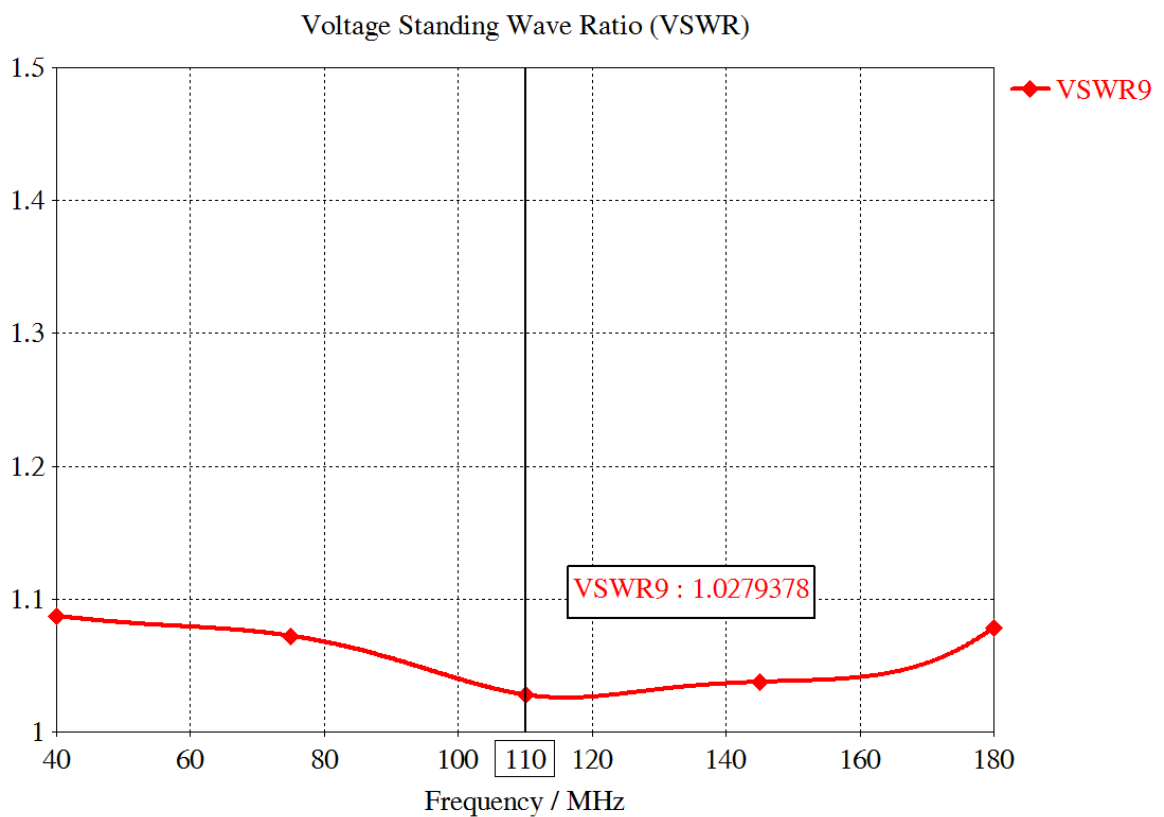


Рисунок 42 – КСВН входа платы БЧ УК

Аналогично спроектирована многослойная плата НБЧ (рис. 43). Благодаря использованию одинаковой схемы деления, было сэкономлено время на проектирование и настройку фазового распределения. Также в дальнейшем это облегчало коммутацию плат БЧ, НБЧ и сумматора.

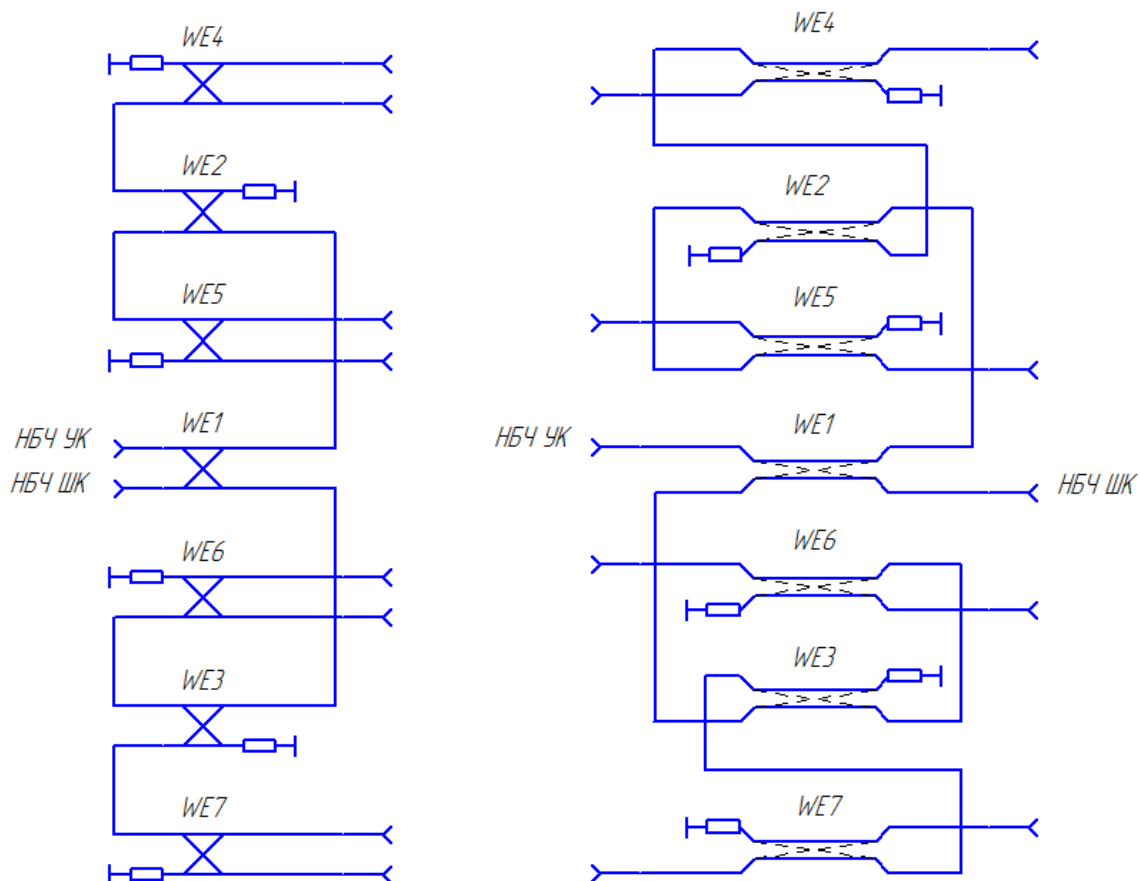


Рисунок 43 – Компоновка ответвителей на плату НБЧ

Плата была также смоделирована в среде Microwave Studio CST. Полученное амплитудное распределение представлено на рисунке 13. Полученное амплитудное и фазовое распределение в сравнении требуемым значениями представлено ниже (табл. 12 и 13). Фазовое распределение было отнормировано по среднему значению.

Таблица 12 – Амплитудное распределение

№ выхода	Требуемые значения, дБ	Расчётные значения, дБ
1	-12,77	-12,78
2	-4,99	-5,21
3	-5,53	-5,88
4	-7,28	-7,85
5	-9,47	-9,73
6	-14,02	-14,49
7	-20,85	-21,19
8	-32,03	-26,33

Таблица 13 - Фазовое распределение

№ выхода	Требуемые значения, град.	Расчетные значения, град.	Нормированные значения, град.
1	0	62,20	-2,57
2	0	67,18	2,41
3	0	65,42	0,65
4	0	65,26	0,49
5	0	67,45	2,68
6	0	64,37	-0,4
7	0	65,05	0,28
8	0	61,26	-3,51

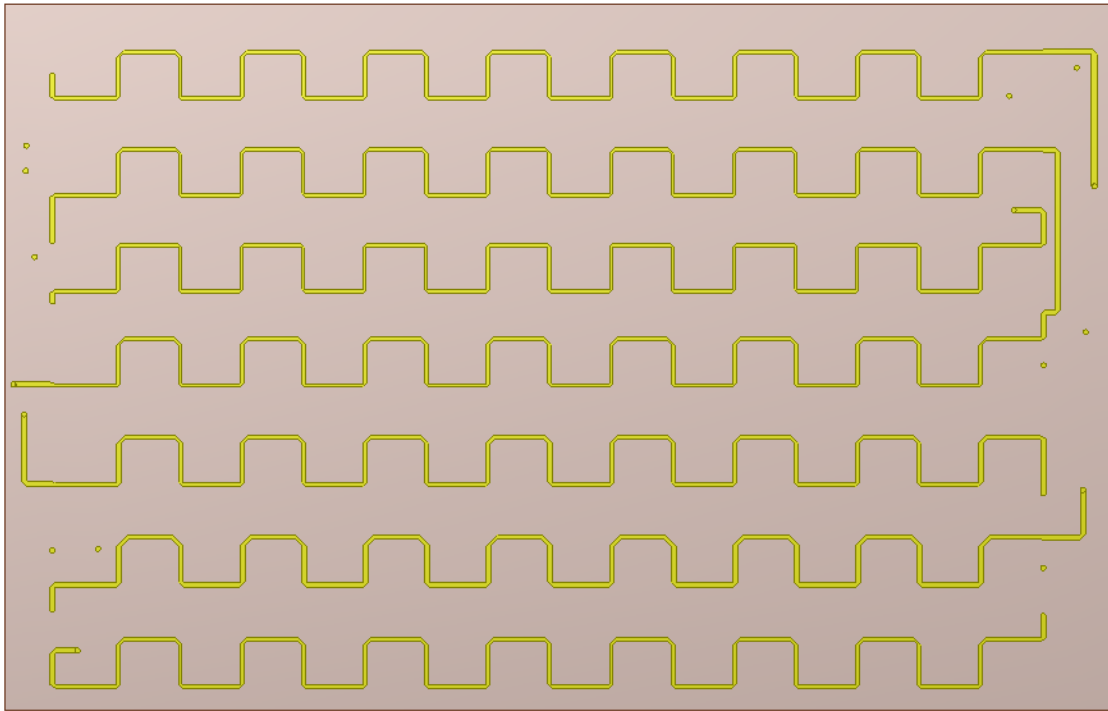


Рисунок 44 – Верхний слой топологии платы НБЧ

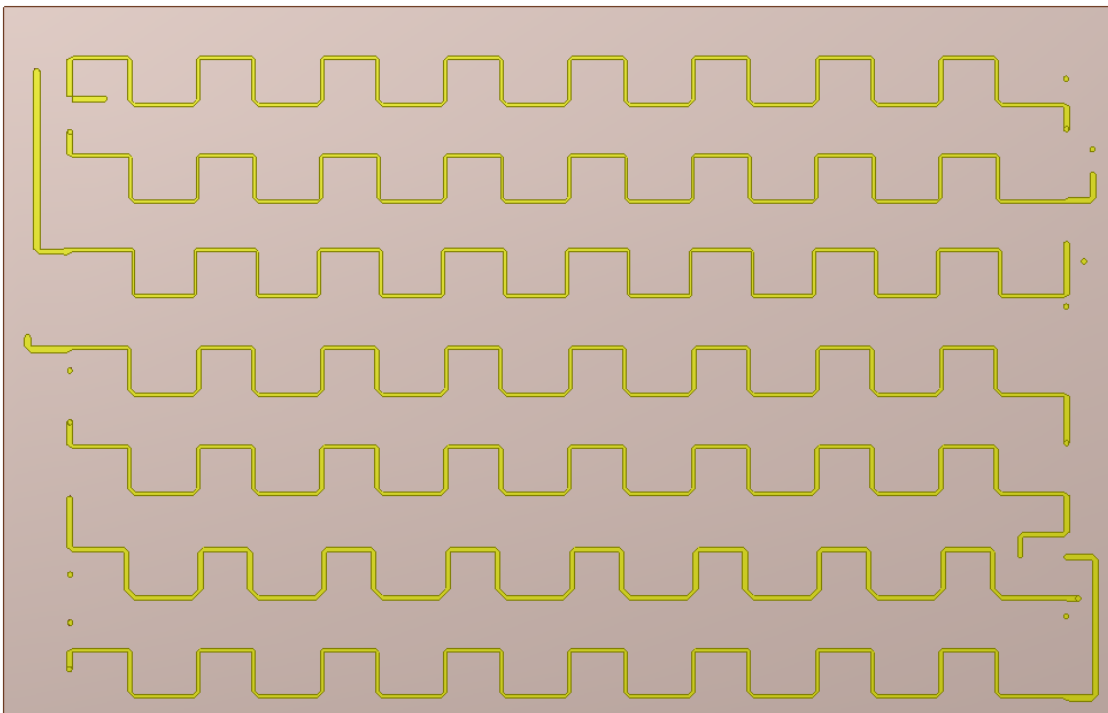


Рисунок 45 – Нижний слой топологии платы НБЧ

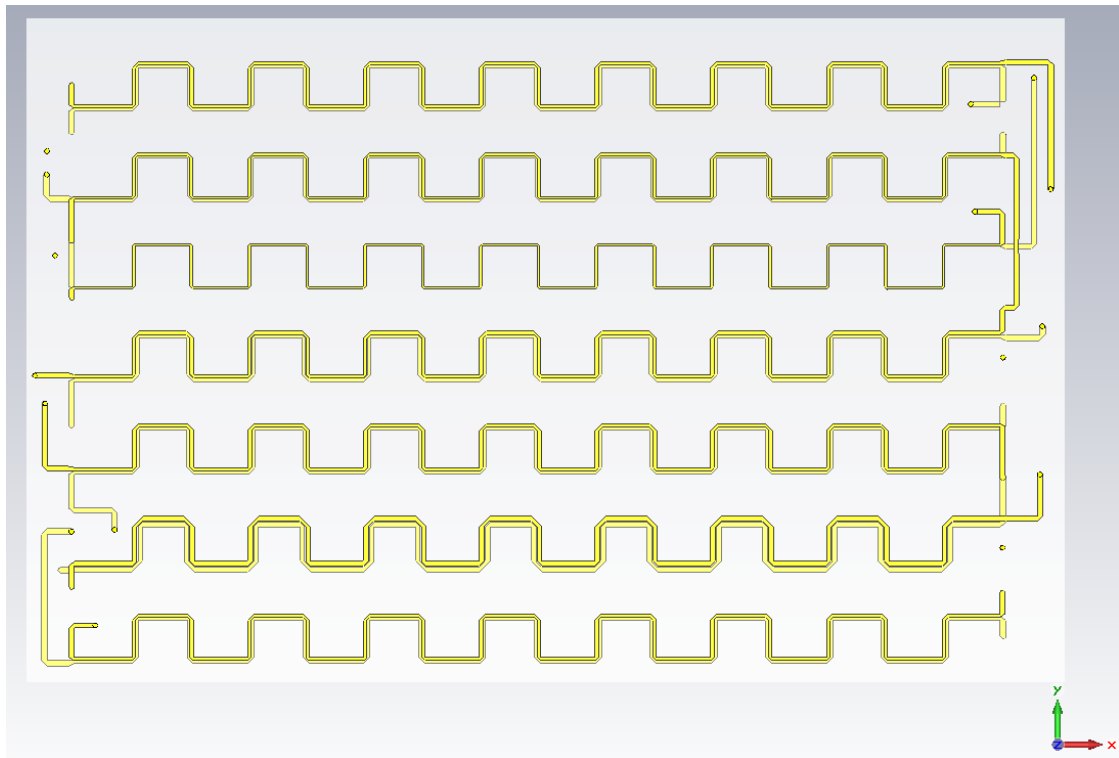


Рисунок 46 - Топологический рисунок полосковых проводников платы НБЧ

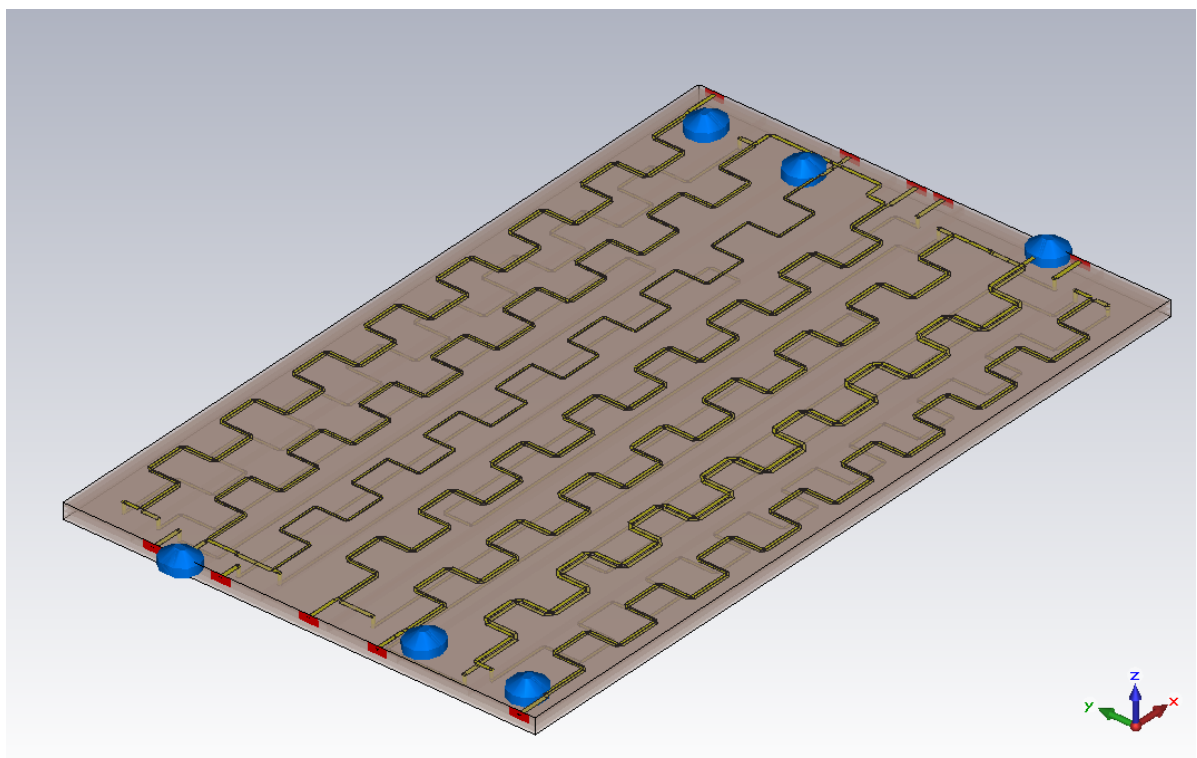


Рисунок 47 – Модель платы НБЧ и платы фазирования в CST Microwave Studio

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ

Лист

67

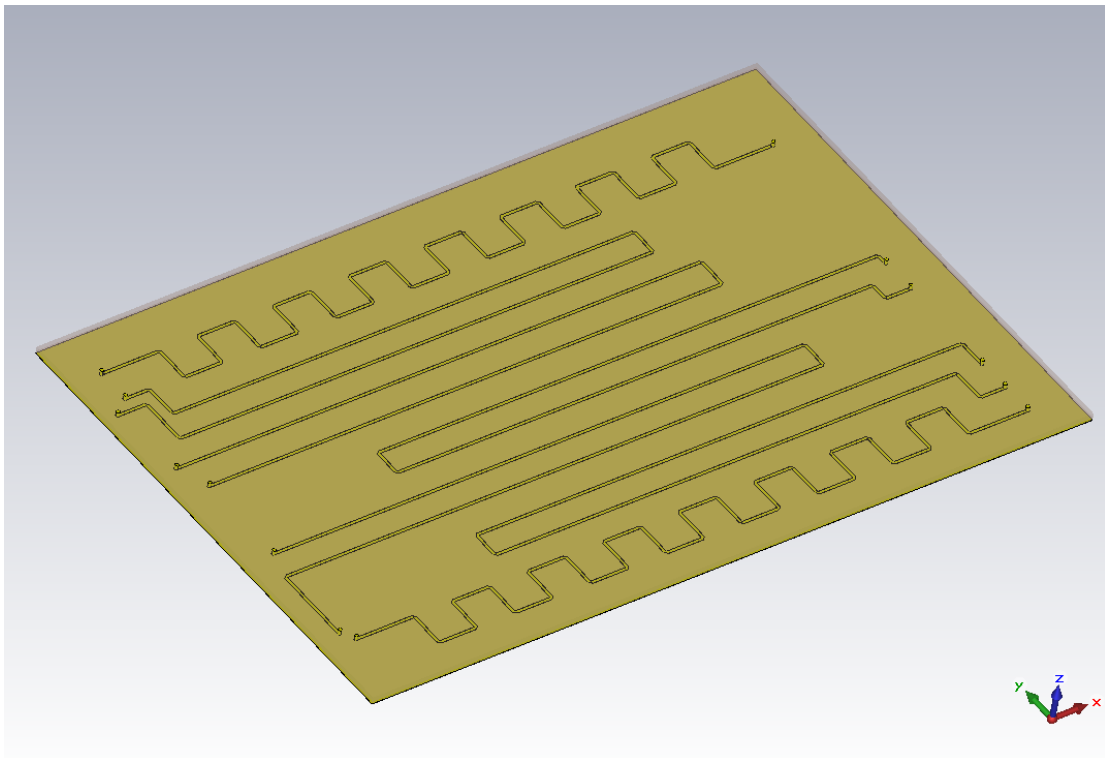


Рисунок 48 – Плата фазовой настройки платы НБЧ

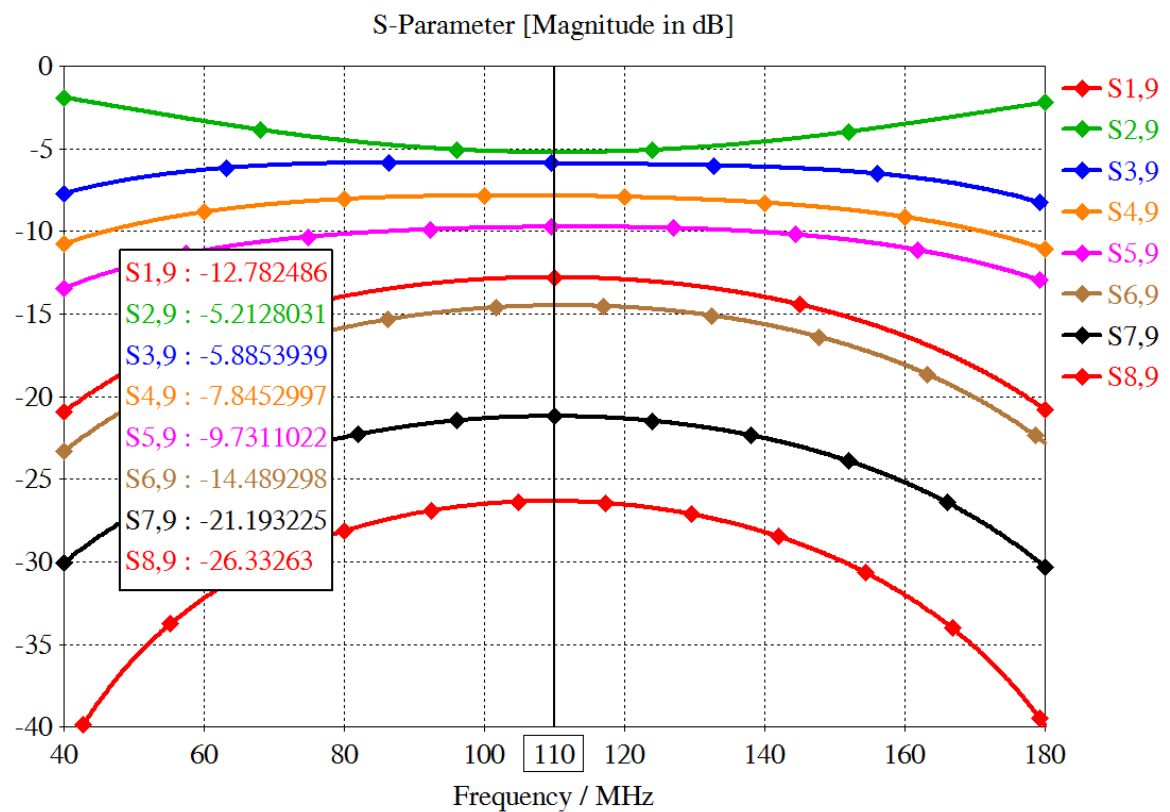


Рисунок 49 – Результат моделирования в CST Microwave Studio

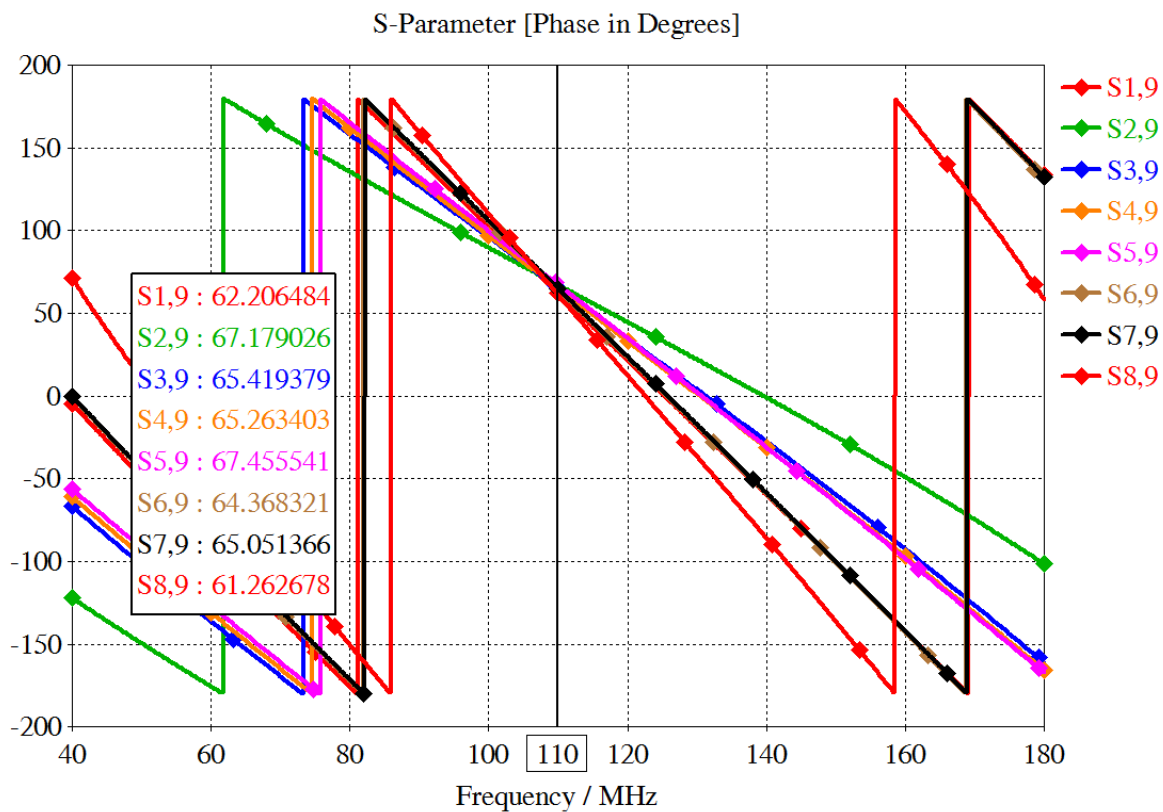


Рисунок 50 – Результат моделирования в CST Microwave Studio

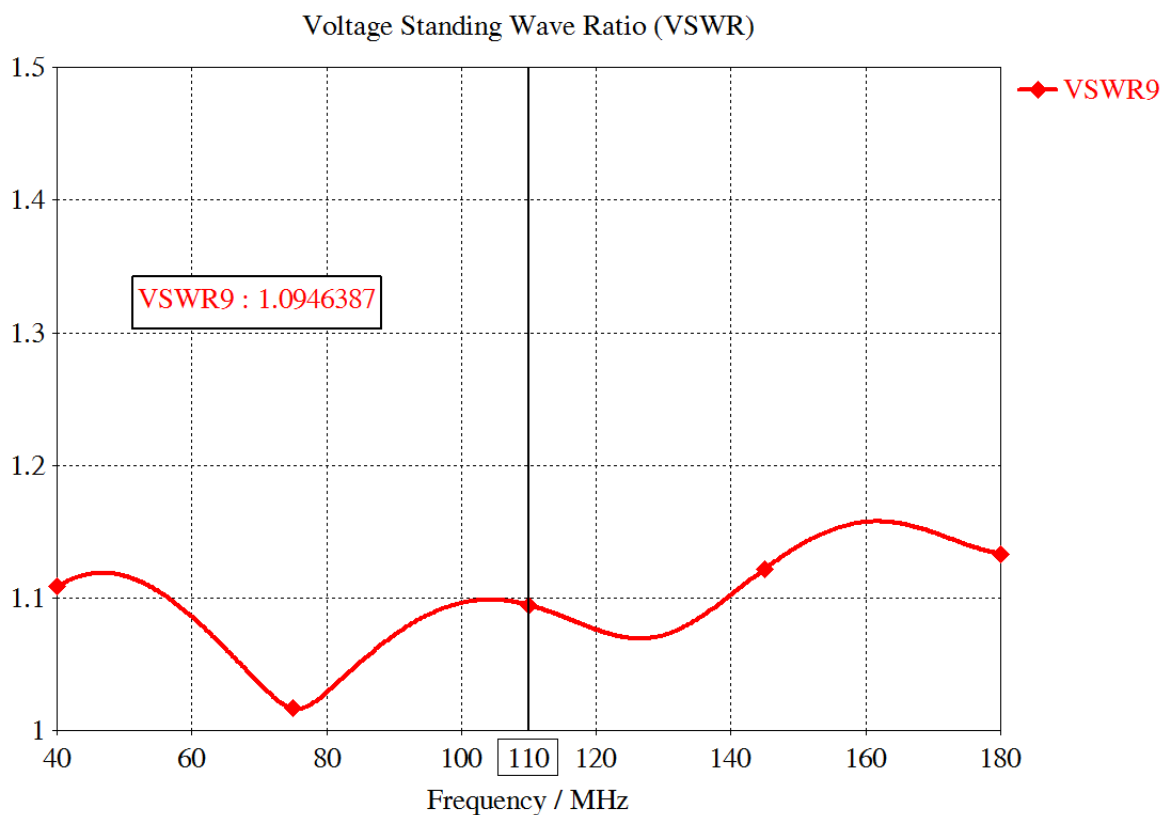


Рисунок 51 – КСВН входа НБЧ УК платы НБЧ

Очевидно, что для передачи сформированного амплитудно-фазового распределения на выходные разъемы, требуется переход на открытую несимметричную линию.

Поэтому, последняя, верхняя плата, имеет аналогичную конструкцию, за тем исключением, что сверху она имеет дополнительный слой. Он служит для размещения микрополосковой линии. Конструкция платы приведена ниже на рисунках (рис. 52, 53).

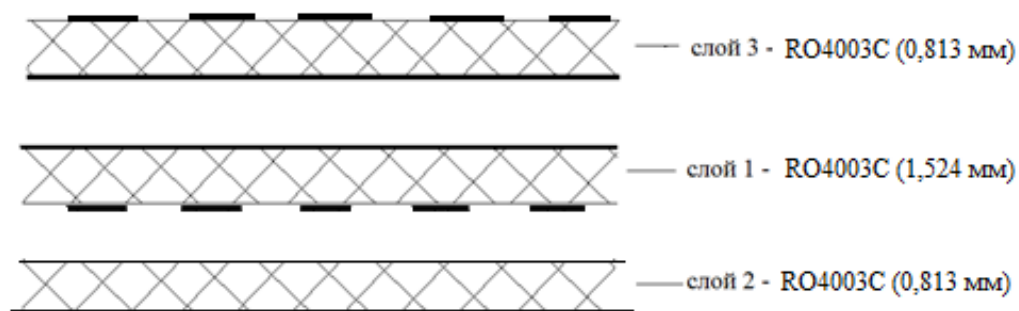


Рисунок 52 – Структура выходной платы делителя мощности КРМ

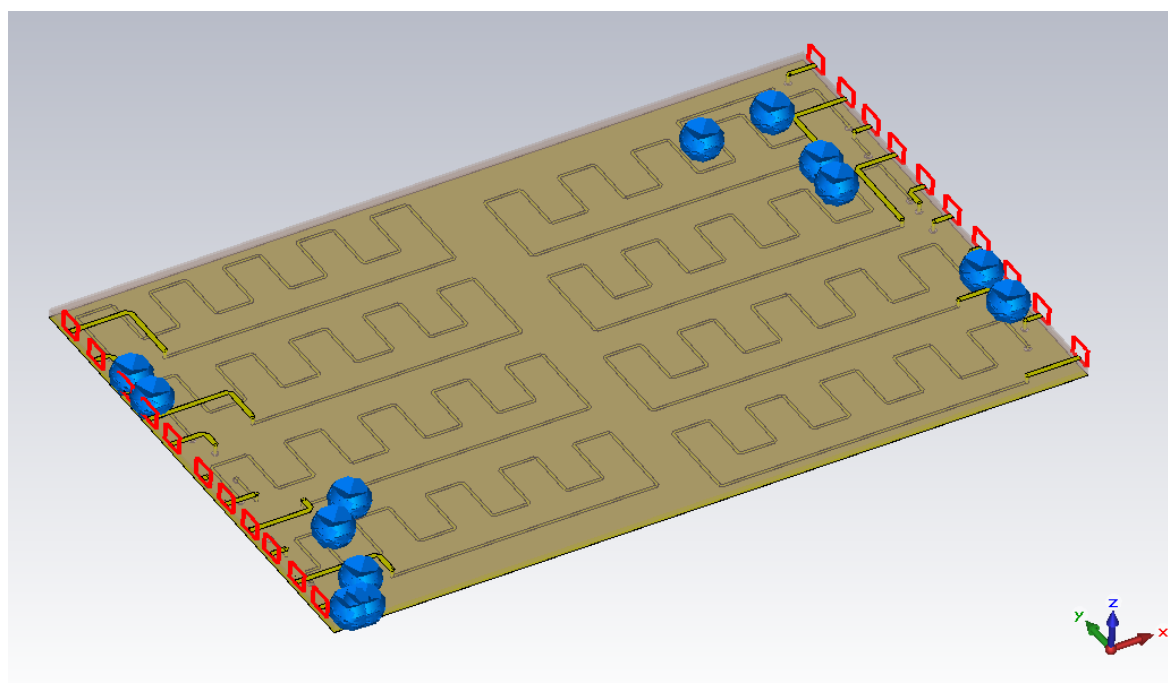


Рисунок 53 – Общий вид модели выходной платы делителя в CST Microwave Studio

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ

Лист

70

5.4 Расчет модели делителя KPM в CST Microwave Studio

После того как были спроектированы все платы делителя, они были объединены в одну общую модель в CST. Общий вид модели представлен на рис. 54. Расположение многослойных плат делителя представлен на рисунках 55-56.

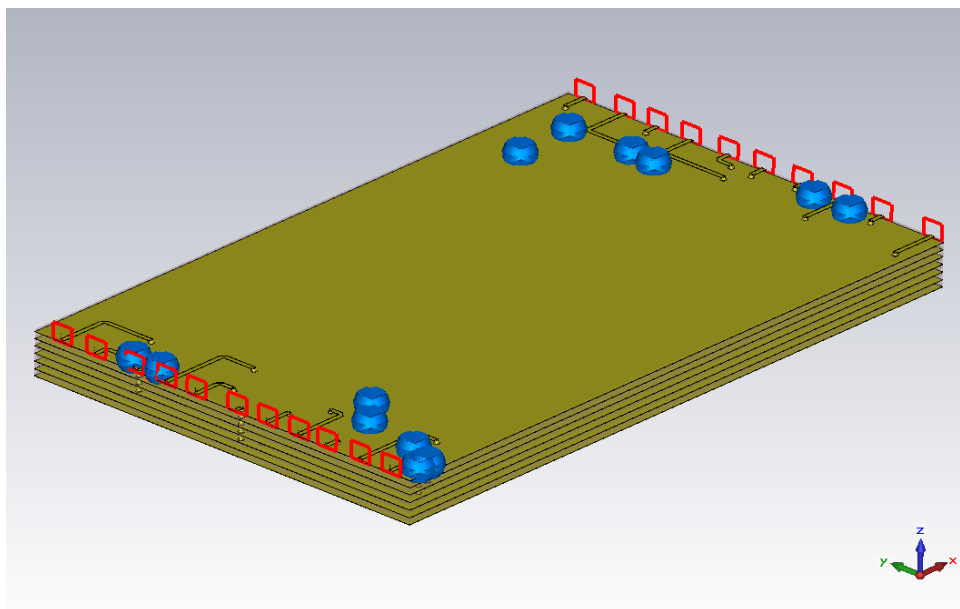


Рисунок 54 – Общий вид модели делителя мощности в CST Microwave Studio

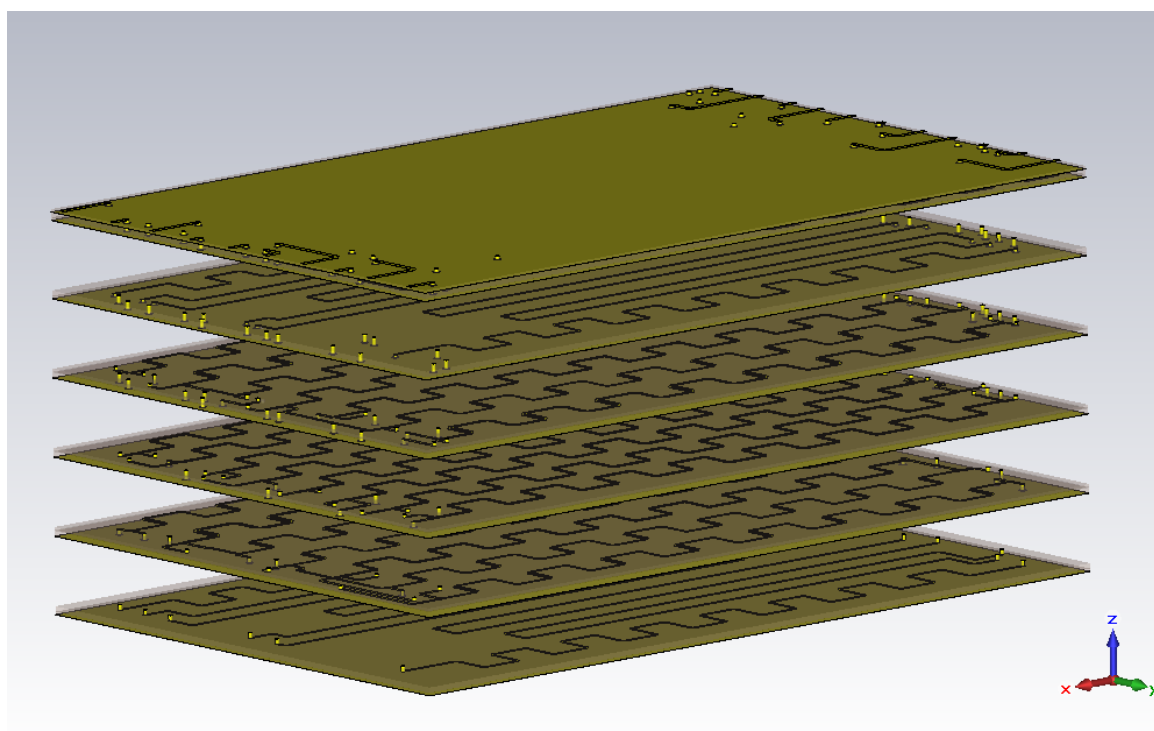


Рисунок 55 - Расположение платы в делителе

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ

Лист

71

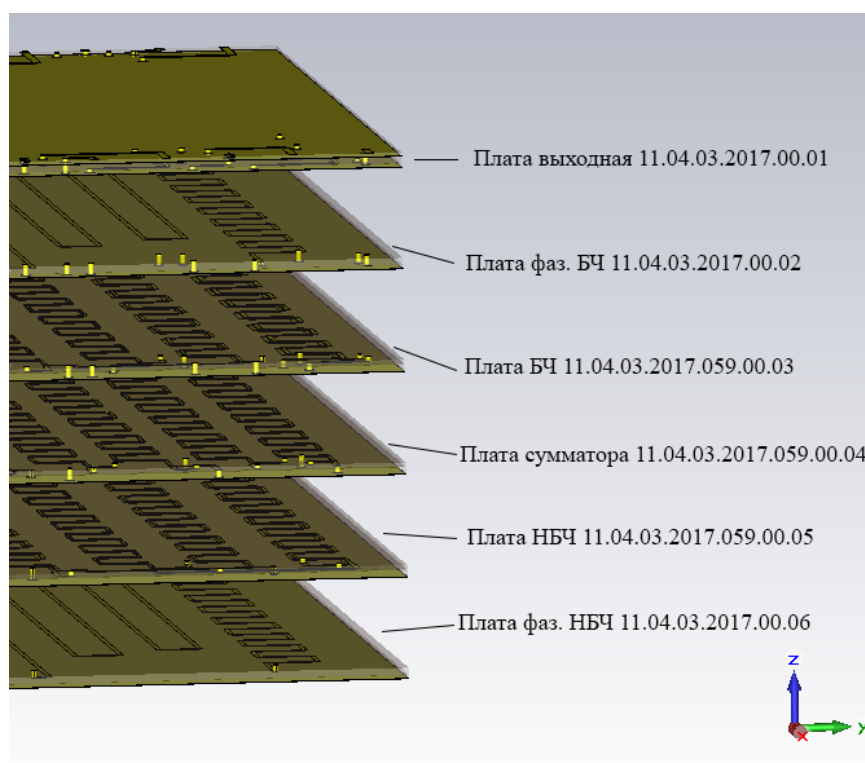


Рисунок 56 – Расположение плат в делителе

Полученное расчетное распределение относительно входа БЧ УК представлено в табл. 14. Как видно амплитудное распределение, с допустимой погрешностью соответствует требуемому. Фазовое распределение требует дальнейшей настройки. На выходы 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 нужно добавить четвертьволновые отрезки линий, которые обеспечат дополнительный 90-градусный фазовый сдвиг. На рисунках 58 и 59 представлены графики расчетных характеристик амплитудного распределения БЧ УК и НБЧ УК. КСВН по входам БЧ УК и НБЧ УК менее 1,25. Графики КСВН представлены на рис. 60 и 61. Общая структура всего делителя представлена на рис. 57.

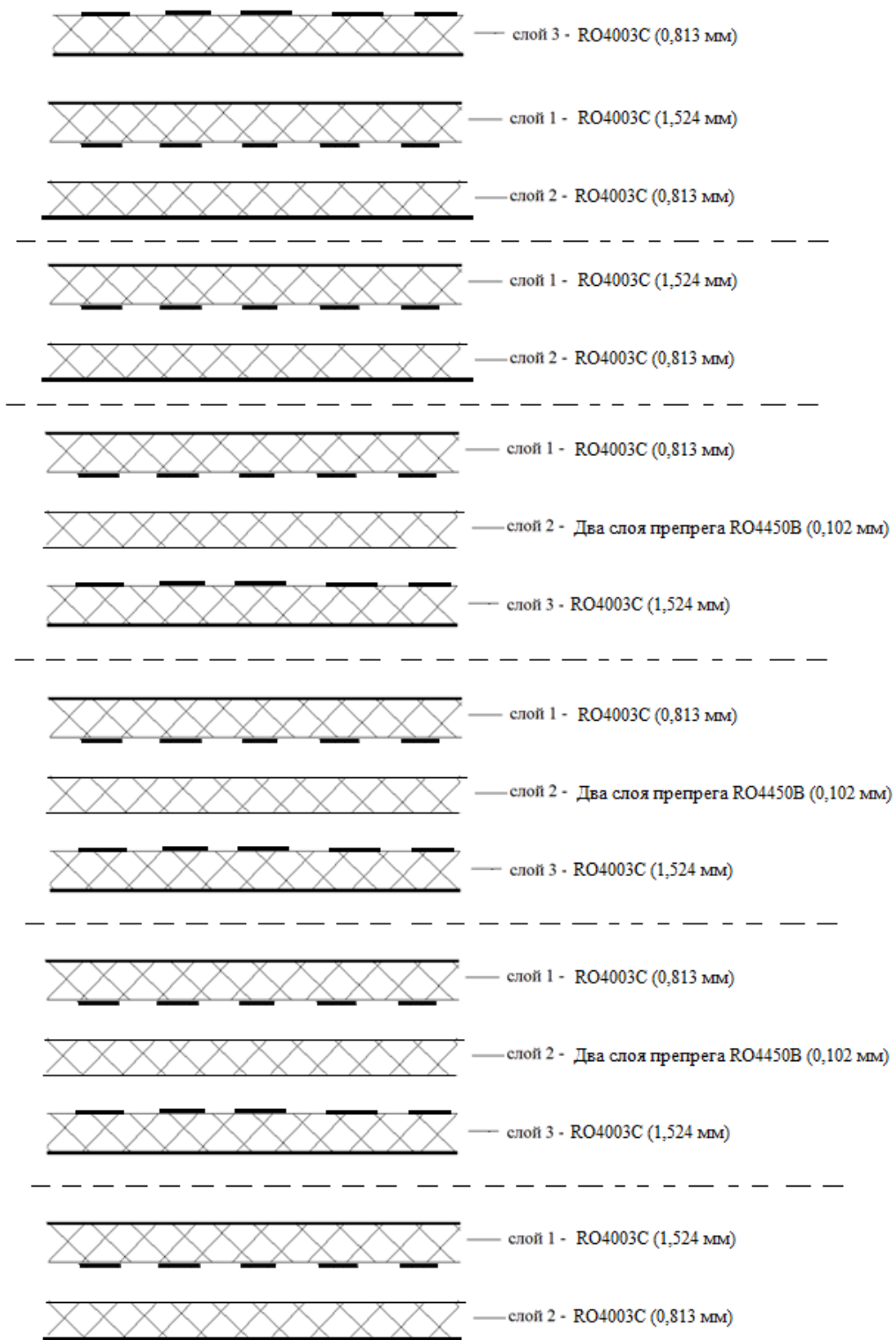


Рисунок 57

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ

Лист

73

Таблица 14 – БЧ УК

№ входа	Требуемые значения		Расчетные значения	
	Ослабление, дБ	Фаза, град	Ослабление, дБ	Фаза, град
1	-20,26	90	-20,27	59,92
2	-15,65	90	-16,13	53,37
3	-10,42	90	-11,04	62,94
4	-9,55	90	-10,31	57,67
5	-9,26	90	-9,91	49,19
6	-10,28	90	-10,73	60,09
7	-13,51	90	-13,72	51,62
8	-22,27	90	-22,32	62,60
9	-	-	-	-
10	-22,27	-90	-22,72	-36,45
11	-13,51	-90	-13,96	-30,96
12	-10,28	-90	-10,87	-40,75
13	-9,26	-90	-9,80	-33,08
14	-9,55	-90	-10,37	-26,43
15	-10,42	-90	-11,08	-38,46
16	-15,65	-90	-16,17	-28,94
17	-20,26	-90	-20,45	-35,81

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ

Лист

74

Таблица 15 – НБЧ УК

№ входа	Требуемые значения		Расчетные значения	
	Ослабление, дБ	Фаза, град	Ослабление, дБ	Фаза, град
1	-	-	-	-
2	-35,39	0	-29,17	-36,45
3	-23,88	0	-24,42	-30,96
4	-17,08	0	-17,56	-40,75
5	-12,47	0	-12,78	-33,08
6	-10,28	0	-11,04	-26,43
7	-8,54	0	-8,9	-38,46
8	-8,00	0	-8,37	-28,94
9	-12,76	0	12,58	64,78
10	-8,00	0	-8,40	53,37
11	-8,54	0	-9,09	62,94
12	-10,28	0	-11,03	57,67
13	-12,47	0	-12,92	49,19
14	-17,08	0	-17,69	60,09
15	-23,88	0	-24,39	51,62
16	-35,39	0	-29,18	62,60
17	-	-	-	-

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ

Лист

75

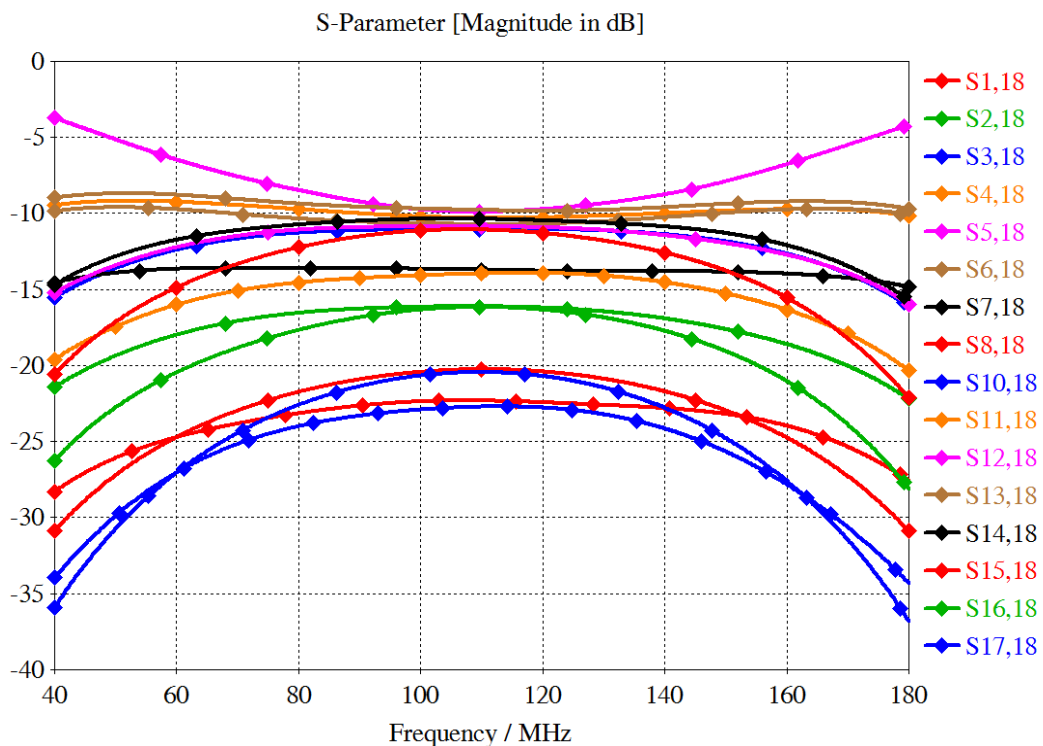


Рисунок 58 – Амплитудное распределение БЧ УК

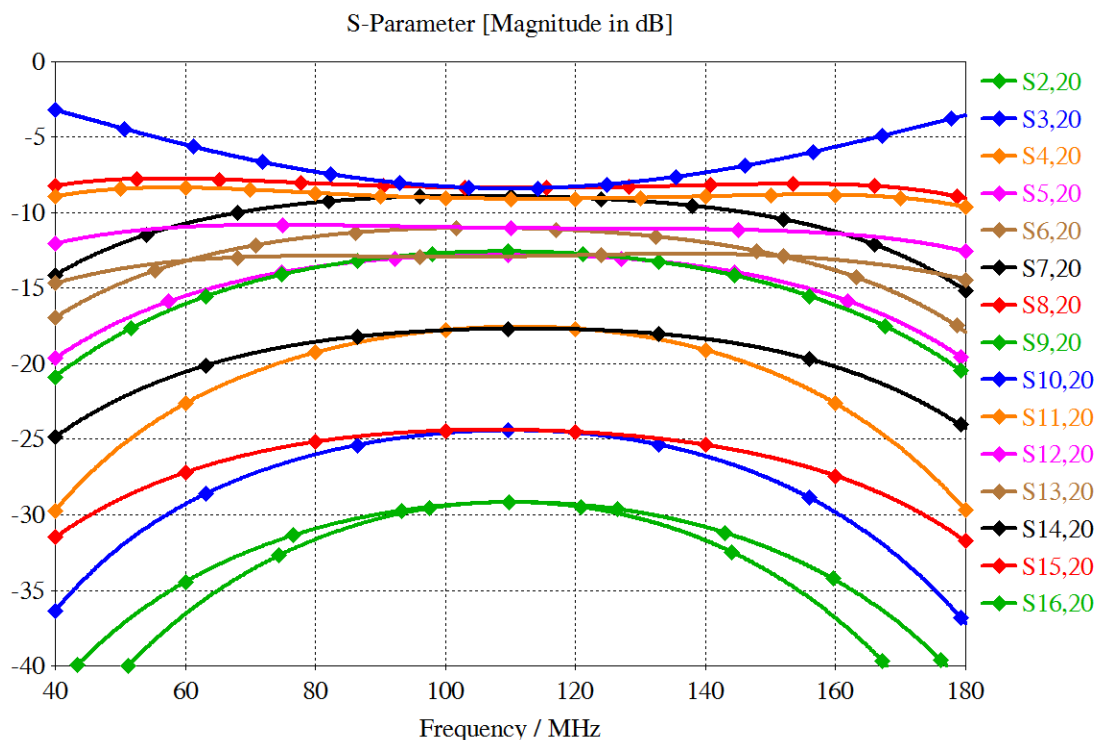


Рисунок 59 – Амплитудное распределение НБЧ УК

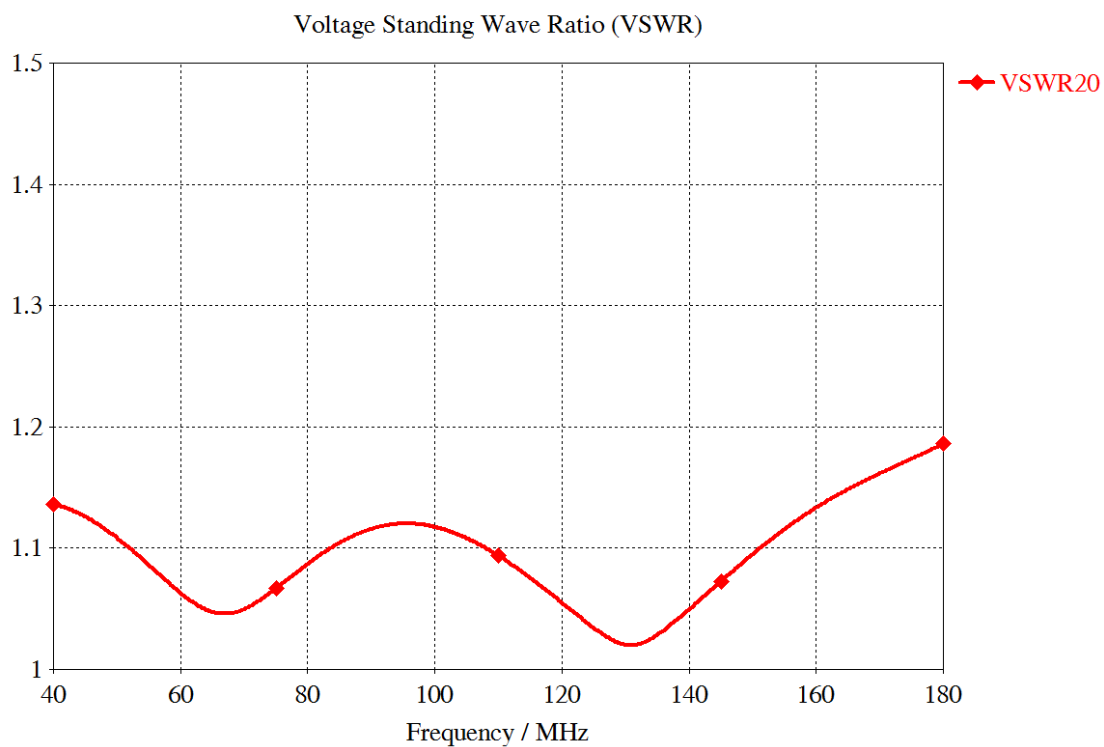


Рисунок 60 – КСВН входа НБЧ УК делителя мощности КРМ

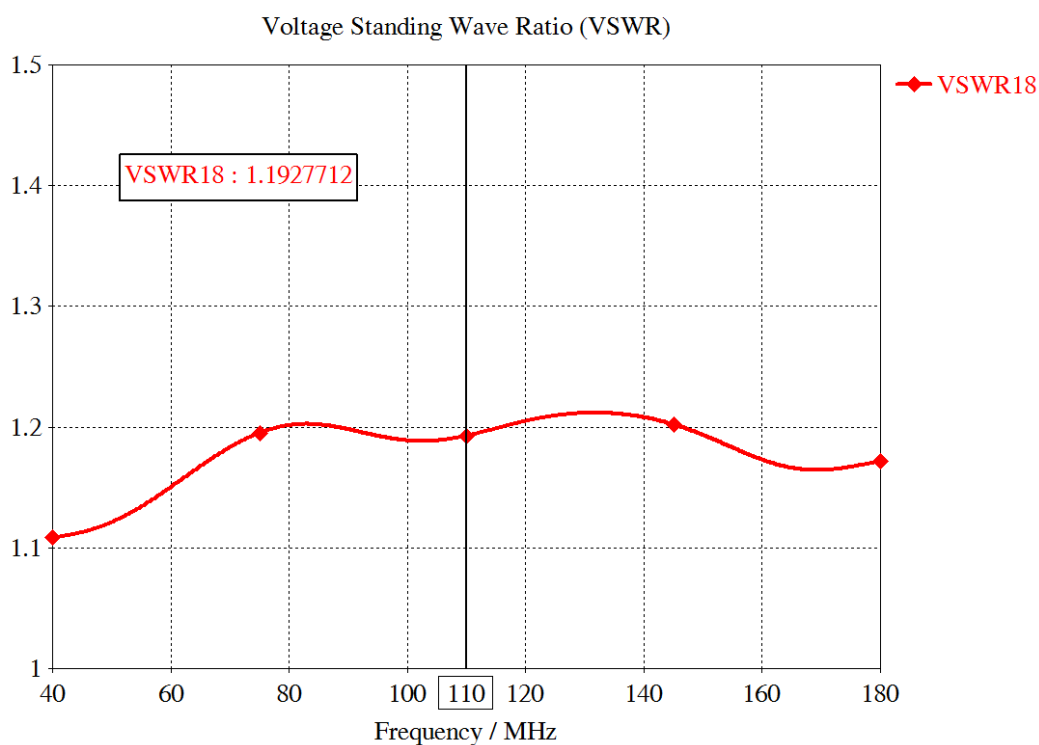


Рисунок 61 – КСВН входа БЧ УК делителя мощности КРМ

6 ОБОБЩЕНИЕ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В выпускной квалификационной работе проведено исследование и разработка пассивных объёмных интегральных модулей СВЧ. Целью данной работы являлась разработка делителя мощности для антенной решетки курсового радиомаяка системы посадки СП-2010.

В ходе работы над проектом был спроектирован многослойный интегральный делитель мощности КРМ в широком использовании принципов многослойности. Благодаря рассчитанной схеме делителя КРМ, в небольшом объёме делителя были смоделированы 22 направленных ответвителя, и достигнуты минимальные массогабаритные параметры. Платы делителя были спроектированы на основе диалектических материалов фирмы Rogers,

Таким образом, в рамках ВКР было проведено исследование возможности применения многослойных плат в разработке объёмных интегральных модулей СВЧ. Для автоматизации процесса проектирования были использованы программные пакеты: CST Microwave Studio, MATLAB, КОМПАС.

В процессе работы были выявлены некоторые трудности. Во-первых, общая модель делителя имеет высокую сложность и для расчёта требуются большие вычислительные мощности. Во-вторых, достижение минимальных массогабаритных характеристик, выявило другую проблему – компоновка направленных ответвителей на платах получилась очень плотной (рис. 61). Из-за этого на платах делителя осталось мало пространства для выполнения крепежных отверстий. Данная проблема решаема, например, изменением схемы делителя, но это означает что количество плат, входящих в делитель будет увеличено.

В целом выбранное направления исследования очень перспективно и можно сказать, что главная задача данной работы выполнена. Например, исполнения менее сложных устройств СВЧ с использованием многослойной объёмной интегральной технологии не вызовет таких сложностей.

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		78

Построение же делителя мощности КРМ по данной концепции является сложной задачей. Наиболее оптимальным решением для реализации ТЗ на делитель мощности является использование гибридной интегральной технологии, с использованием готовых решений направленных ответвителей, например, фирмы Anaren.

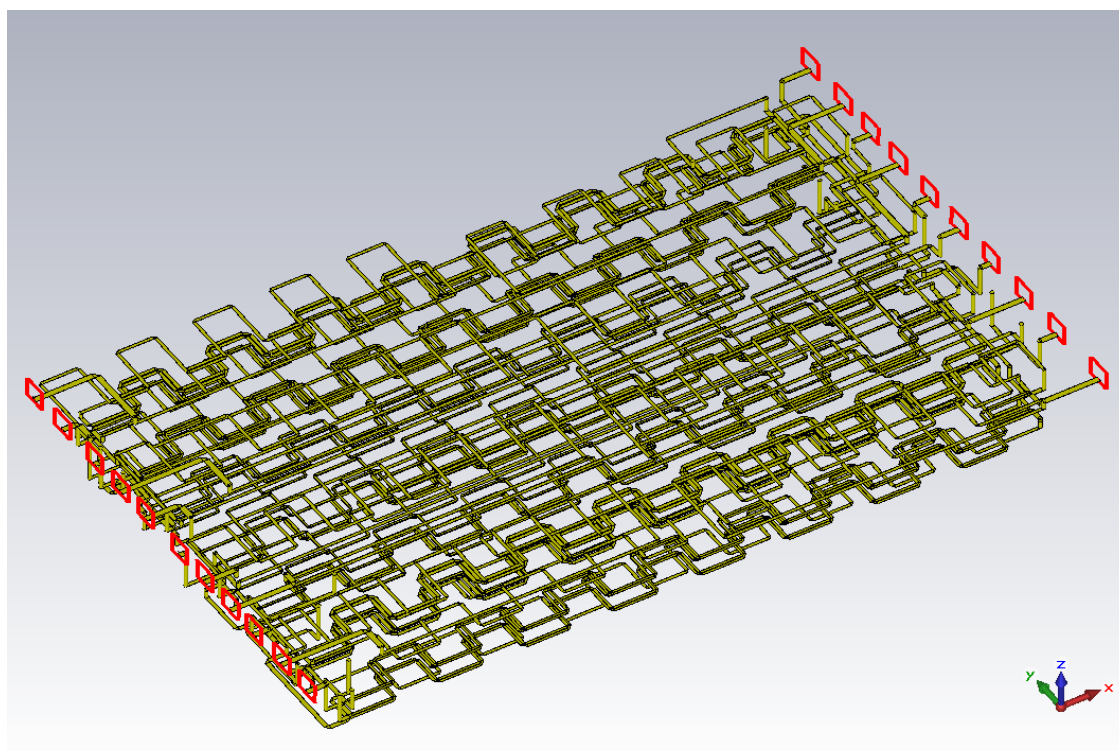


Рисунок 62 – Общий вид полосковых проводников в делителе мощности

Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата

11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ

Лист

79

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выпускной квалификационной работе проведено исследование и разработка пассивных объёмных интегральных модулей СВЧ. Целью данной работы являлась разработка делителя мощности для антенной решетки курсового радиомаяка системы посадки СП-2010. В рамках ВКР было проведено исследование возможности применения многослойных структур полосковых плат в разработке объёмных интегральных модулей СВЧ. Полученные результаты удовлетворяют требованиям ТЗ, что говорит о том, что использование объемной интегральной технологии имеет большие перспективы в сфере разработке СВЧ устройств.

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		80

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Микроэлектронные устройства СВЧ: учебное пособие / Г. И. Веселов, Е. Н. Егоров, и др.; под ред. Г. И. Веселова. – М.: Высшая школа, 1988. – 281 с., ил.
2. Справочник по элементам полосковой техники: справочник / О. И. Мазепова, В. П. Мещанов, А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич и др.; под ред. А. Л. Фельдштейна. – М.: Изд-во «Связь», 1979. – 336 с., ил.
3. Гвоздев, В. И. Объёмные интегральные схемы СВЧ – элементная база аналоговой и цифровой радиоэлектроники / В. И. Гвоздев, Е. И. Нефёдов. – М.: Наука, 1987. – 112 с., ил.
4. Нефёдов, Е. И. Полосковые линии передачи / Е. И. Нефёдов, А. Т. Фиалковский. – 2-е изд. – М.: Наука, 1980. – 312 с., ил.
5. Машинное проектирование устройств СВЧ: учебное пособие / В. Г. Шейнкман, К. Гупта, и др.; под ред. В. Г. Шейнкмана. – М.: Радио и связь, 1987. – 428 с., ил.
6. Малорацкий, Л. Г. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях: учебное пособие / Л. Г. Малорацкий, Л. Р. Явич. – М.: Сов. радио, 1972. – 232 с., ил.
7. Тимофеева, Г. А. Опыт разработки высокочастотных трактов пассивной фазированной антенной решетки в виде гибридных интегральных модулей СВЧ / Г. А. Тимофеева, И. М. Бигильдин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – № 4 (15). – С. 33–50.
8. Войтович, Н. И. Моделирование работы двухчастотной инструментальной системы посадки самолетов / Н. И. Войтович, Б. В. Жданов, А. В. Зотов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – № 4 (13). – С. 55–69.

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		81

9. Фельдштейн, А. Л. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на свч / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич. – 2-е изд. – М.: Изд-во «Связь», 1971. – 389 с., ил.

10. Ковалев, И. С. Конструирование и расчет полосковых устройств: учебное пособие / В. И. Голубев, И. С. Ковалев, Е. Г. Кузнецов. – М.: «Сов. радио», 1974. – 296 с, ил.

11. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств: справочник / С. И. Бахарев, В. И. Вольман, Ю. Н. Либ и др.; под ред. В. И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328с., ил.

12. Полосковые платы и узлы. Проектирование и изготовление / Е. П. Котов, В. Д. Каплун, А. А. Тер-Маркарян, и др.; под ред. Е. П. Котова и В. Д. Каплуна. –М.: Сов. радио, 1979. – 248 с., ил.

13. Нечаев Ю.Б., Николаев В.И., Андреев Р.Н., Винокурова Н.Н. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии: учеб. пособие. Под общ. ред. Нечаева Ю.Б., Николаева В.И. –2-е издание Воронеж: ОАО Концерн «Созвездие», 2008. – 629с., ил.

14. Фуско, В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: пер. с англ. / В. Фуско – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с., ил.

15. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / под ред. Р.Г. Варламова. – М.: Советское радио, 1980. – 480 с.

16. Малорацкий, Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ / Л. Г. Малорацкий – М.: Сов. Радио, 1976. – 216 с., ил.

17. Пименов, Ю.В. Техническая электродинамика/ Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов: учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2000. – 536 с.: ил.

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

КГС – курсо-глиссадная система
СП – система посадки
ГРМ – глиссадный радиомаяк
КРМ – курсовой радиомаяк
ВПП – взлётно-посадочная полоса
АФР – амплитудно-фазовое распределение
БЧ – боковая частота
БЧ УК – боковая частота узкого канала
БЧ ШК – боковая частота широкого канала
НБЧ – несущая боковая частота
НБЧ УК – несущая боковая частота узкого канала
НБЧ ШК – несущая боковая частота широкого канала
СВЧ – сверхвысокая частота
УГО – условно-графическое обозначение
КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению
МПЛ – микрополосковая линия
ПП – печатная плата
ТЗ – техническое задание
КСВН – коэффициент стоячей волны
АФР – амплитудно-фазовое распределение

					11.04.03.2017.059.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		83