

На правах рукописи



Дударев Николай Валерьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ СВЧ УЗЛОВ
ДИАГРАММООБРАЗУЮЩИХ СХЕМ**

Специальность:
05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск– 2020

Работа выполнена на кафедре инфокоммуникационных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель:

Даровских Станислав Никифорович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные технологии» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты:

Бударагин Роман Валерьевич, доктор технических наук, доцент. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева», г. Нижний Новгород. Заведующий кафедрой «Общая и ядерная физика».

Шабунин Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург. Заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации».

Ведущая организация:

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится 02.07.2020 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 219.003.02 при ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» по адресу: 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО ПГУТИ и на сайте https://www.psuti.ru/ru/science/dissertation_councils/announcements

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 219.003.02

доктор технических наук,

доцент

Гребешков Александр Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Диаграммообразующие схемы (ДОС) – это разновидность радиочастотных устройств, предназначенных для формирования требуемых амплитудно-фазовых распределений высокочастотного сигнала на излучающие элементы антенных решеток. Значительное место в реализации данных устройств занимает технология СВЧ плат. Особенно широко данная технология используется для реализации ДОС в приемо-передающих трактах антенных решёток, где мощность сигнала, как правило, не превышает нескольких десятков-сотен ватт.

Современные требования по оптимизации, предъявляемые к разработке СВЧ ДОС, напрямую связаны с уменьшением их габаритных характеристик. Повышение компактности ДОС достигается многоуровневым размещением функционала СВЧ устройств в виде многослойных плат. Для этого применяются технологии LTCC и HTCC, предусматривающие спекание отдельных плат (слоёв) в единую монолитную конструкцию. По причине монолитного их построения для многослойных LTCC и HTCC плат характерна высокая их надежность. Но в тоже время такая конструкция изделия исключает его ремонтпригодность и оперативное изменение функционального предназначения (обусловлено монолитностью конструкции). При этом для изготовления таких ДОС необходимы дополнительные технологические операции по спеканию их частей. Применение подобного подхода экономически оправдано только для типовых крупносерийных изделий.

Для разрабатываемых, опытных и мелкосерийных образцов радиолокационных устройств целесообразным является применение недорогих способов построения ДОС, содержащих в себе высокий модернизационный потенциал, направленный на возможность оперативного создания из типовых элементов конструкции разнообразные по своему назначению ДОС. Такое построение ДОС исключает реализацию требования по их монолитности. При этом габаритные характеристики данных устройств не должны уступать аналогичным многослойным монолитным аналогам.

Таким образом, к способу построения таких объемно-модульных ДОС предъявляется основное требование для их реализации: многослойность немонолитной конструкции. При этом их составные части должны иметь унифицированные габаритные и присоединительные размеры, а также стандартные элементы электромагнитной связи. Применение объемно-модульного способа построения позволит на базе унифицированных составных частей (базовых элементов) реализовывать близкие по характеристикам устройства без использования трудоёмких и дорогостоящих технологических процессов. Такой способ реализации СВЧ устройств особенно востребован при стендовом моделировании работы радиолокационных устройств, применяемом как при проведении опытно-конструкторских

разработок, так и в учебных целях. Кроме того, объемно-модульный способ построения ДОС целесообразен для использования в мелкосерийных изделиях, в которых с целью сокращения стоимости их разработки требуется предусмотреть максимальную унификацию составных частей и обеспечить достаточный задел для их модернизации.

До настоящего времени исследований потенциальных и реальных возможностей применения такого способа построения ДОС не проводилось по причине сложности обеспечения надёжной электромагнитной связи между отдельными немонокристаллическими частями устройства. Решение проблемы обеспечения надёжной электромагнитной связи между базовыми элементами объемно-модульных ДОС является основой их построения. В частности, её решение связано не только с исследованием степени влияния конструктивных элементов объёмно-модульной ДОС на электродинамические характеристики элементов электромагнитной связи (объёмный полосково-щелевой переход), но и с разработкой технического решения, направленного на расширение их рабочего частотного диапазона.

Важной задачей в рамках решения указанной проблемы является оценка степени взаимного влияния элементов электромагнитной связи при высокой плотности их размещения и возможность её снижения.

Все вышеизложенное предопределило актуальность диссертационного исследования, направленного на разработку метода оптимизации СВЧ узлов диаграммообразующих схем на основе реализации объемно-модульного подхода к их построению.

Степень разработанности темы исследования характеризуется следующими основными достижениями.

Разработкой многослойных СВЧ плат занимается значительное количество отечественных и зарубежных компаний: ЗАО «ОСТЕК», ПТК «Печатные платы», IBM, NGK, Toshiba, Murata, ПТК «Печатные платы» ФГУП «Рязанский приборостроительный завод», DuPont, Kyocera, NEC, Hitachi, Fujitsu, Matsushita, «НИИ КП», СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи» (РНИИРС). Реализация многослойных СВЧ плат производится на основе фторопластовых или керамических подложек, представляющих собой многослойные структуры, выполненные с использованием технологий высокотемпературного HTCC (High Temperature Co-fired Ceramics) или низкотемпературного LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) обжига.

Другим способом оптимизировать конструкцию ДОС является применение интегральной технологии. Данный метод заключается в замене законченных элементов ДОС (направленные ответвители, фазовращатели, аттенюаторы, фильтры и др.) на конструктивно независимые элементы, устанавливающиеся на общее основание (плату). Данное конструктивное решение также способствует не только прогрессу по габаритным показате-

лям СВЧ устройств, но и обеспечивает значительные возможности в реализации требований по их ремонтпригодности.

Разработка и изготовление СВЧ ДОС с применением интегральной технологии осуществляется компаниями: Anaren, Murata, Kyocera, IBM и др.

Достигнуть более высоких показателей в снижении габаритных характеристик, повышении ремонтпригодности, унификации ДОС можно с помощью разработки метода оптимизации на основе применения объёмно-модульной технологии. Этот метод содержит в себе преимущества вышеописанных технологий: многослойность и модульность построения ДОС.

При разработке объёмно-модульного способа построения ДОС за основу были взяты исследования, проведенные отечественными учеными: Б.И. Гвоздевым, Е.И. Нефёдовым, В.А. Тельцом.

Анализ результатов проведенных ими исследований свидетельствует о том, что в полном виде объёмно-модульный принцип построения ДОС пока не реализован.

Объектом диссертационного исследования являются СВЧ устройства диаграммообразующих схем антенных решёток радиолокационных и радионавигационных комплексов.

Предметом диссертационного исследования является метод оптимизации построения ДОС с существенно улучшенными параметрами.

Цель работы и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является разработка метода оптимизации СВЧ узлов диаграммообразующих схем, позволяющего уменьшить их габаритные характеристики и обеспечить функциональную перестраиваемость их назначения, достигаемую немонолитностью их составных частей.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решение следующих задач:

1. Определить основные направления оптимизации СВЧ узлов ДОС в процессе их разработки.

2. Исследовать влияние неоднородностей объёмно-модульной конструкции ДОС на электродинамические характеристики элементов передачи СВЧ мощности между отдельными её частями и определить условия обеспечения высокой плотности их компоновки с необходимыми конструктивными решениями по обеспечению широкополосности элементов передачи СВЧ мощности.

3. Исследовать электродинамические характеристики объёмно-модульных ДОС, сравнить их по габаритным и электромагнитным характеристикам с аналогами, разработанными на основе традиционных технологий.

4. Разработать на основе применения объёмно-модульного метода оптимизации ДОС экспериментальный макет делителя мощности и прове-

сти сравнительную оценку его технических характеристик с аналогами и результатами математического моделирования.

Научная новизна результатов работы. В процессе выполнения диссертационного исследования получены результаты, научную новизну которых составляют:

1. Разработан новый метод оптимизации СВЧ узлов ДОС на основе объёмно-модульного их построения. Он *отличается* от существующих методов построения ДОС реализацией в одном устройстве требований по модульности и многослойности немонокриптивного исполнения на уровне базовых элементов, их технологичности и компактности.

2. Получены результаты исследования электродинамических характеристик элементов передачи СВЧ мощности (полосково-щелевой переход), *отличающиеся* от известных на сегодняшний день результатов исследования тем, что они *учитывают* влияние конструктивных особенностей объёмно-модульного способа построения на их характеристики.

3. Впервые разработано конструктивное решение по осуществлению развязки между полосково-щелевыми переходами, щели которых размещены в непосредственной близости друг от друга на одном базовом элементе и *отличается* от известных тем, что для развязки используется дополнительная щелевая линия.

4. Впервые разработано конструктивное решение по обеспечению широкополосности объёмного полосково-щелевого перехода с учетом особенностей объёмно-модульного способа построения, *не имеющее* своих аналогов.

5. Приведены результаты исследований диаграммообразующих схем, *отличающихся* от существующих аналогов тем, что для передачи СВЧ сигнала между их частями *используются* оригинальные широкополосные объёмные полосково-щелевые переходы.

Теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования.

Теоретическая значимость работы заключается:

- в разработке нового метода оптимизации построения СВЧ узлов ДОС на основе объёмно-модульного способа их построения, позволяющего реализовать устройства в виде многослойных СВЧ плат, состоящих из конструктивно обособленных (конструктивно немонокриптивных) составных частей (базовых элементов);

- в оценке ранее неизвестных закономерностей влияния неоднородностей, обусловленных объёмно-модульной конструкцией их построения, на электродинамические характеристики элементов передачи СВЧ мощности;

- в определении ранее неизвестных условий обеспечения требуемых электродинамических характеристик полосково-щелевых переходов в условиях высокой плотности их компоновки и конструктивных решений

по расширению их рабочей полосы при наличии особенностей объёмно-модульной метода построения ДОС.

Практическая значимость работы состоит:

- в реализации на основе объёмно-модульного метода оптимизации устройств ДОС с существенно, более чем в 10 раз, улучшенными габаритными характеристиками, по сравнению с действующим методом их построения, с одновременной возможностью изменения функционала ДОС путем замены необходимых составных частей;

- в оригинальном конструктивном решении задачи обеспечения широкополосности объёмного полосково-щелевого перехода;

- в оригинальном конструктивном решении задачи обеспечения высокой плотности размещения нескольких объёмного полосково-щелевых переходов;

- в разработке экспериментального образца делителя мощности для шести элементной антенной решётки, разработанного согласно принципу суперпозиции многослойности и модульности с применением разработанного метода оптимизации, позволяющего обеспечить минимальные габариты и функциональную перестраиваемость устройства.

Методы исследования.

При разработке модели, применяющейся для исследования электродинамических характеристик элементов объёмно-модульной конструкции, использовались методы решения задачи дифракции электромагнитных волн вблизи щелевого резонатора с последующим нахождением элементов матрицы рассеяния при помощи эквивалентных приближений.

Для анализа электродинамических характеристик применялись специализированные программные продукты электромагнитного моделирования, в основе которых лежит метод конечного интегрирования.

В ходе экспериментальных исследований электродинамических характеристик реальных образцов объёмно-модульных ДОС проводились их лабораторные измерения с использованием векторных анализаторов ОБЗОР TP1300/1, Agilent E5071C и сравнение результатов измерения с данными, полученными в процессе виртуального моделирования с помощью прикладных программ.

Положения, выносимые на защиту

1. Определено, что объёмно-модульный метод оптимизации построения СВЧ узлов ДОС *позволяет реализовать* устройства в виде многослойных СВЧ плат с высокой модульностью их составных частей (базовых элементов). При этом каждая составная часть представлена в виде конструктивно обособленной и законченной платы, с унифицированными габаритными, присоединительными размерами и стандартным способом электромагнитной связи, что позволяет собирать СВЧ узлы из базовых элементов с необходимыми электродинамическими характеристиками.

2. Доказано, что для связи конструктивно немонолитных частей *необходимо использовать* устройства бесконтактной передачи мощности, поскольку применение гальванических способов передачи СВЧ сигнала не обеспечивает стабильности его передаваемых электродинамических характеристик в условиях конструктивных неоднородностей, обусловленных немонолитностью составных частей.

3. Определено, что закономерности изменения электродинамических характеристик устройства бесконтактной передачи мощности (объёмный полосково-щелевой переход) при влиянии на него конструктивных особенностей, обусловленных совмещением принципов модульности и многослойности построения объёмно-модульной ДОС, *обуславливают возможность применения* объёмного полосково-щелевого перехода в качестве устройства для передачи СВЧ сигнала в объёмно-модульных ДОС.

4. Показано, что размещение объёмных полосково-щелевых переходов в составе одного базового элемента приводит к возникновению их взаимного электромагнитного влияния, которое может быть снижено дополнительной щелью, *обеспечивающей возможность* их совместного применения в рамках одного базового элемента.

5. Определено, что конструктивные решения по расширению полосы пропускания объёмного полосково-щелевого перехода в условиях конструктивных особенностей объёмно-модульной конструкции, *позволяют обеспечить* ширину его рабочей полосы до 25 % от центральной частоты.

Сведения о личном вкладе автора. Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично. Подготовка некоторых результатов исследования к публикациям в научных изданиях проводилась в ходе обсуждения совместно с соавторами.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается проведением моделирования объёмно-модульного элемента ДОС при помощи электромагнитных методик. Также результаты подтверждены выполненной оценкой электродинамических характеристик экспериментального макета элемента ДОС.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.12.07 «Антенны, СВЧ устройства и их технологии» по пунктам 3 и 9: «Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных устройств СВЧ, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами»; «Разработка методов проектирования и оптимизация антенных систем и СВЧ устройств широкого применения» соответственно.

Апробация результатов. Полученные в процессе исследования результаты воплощаются в макете объёмно-модульной диаграммообразующей схемы «делитель мощности» предназначенной для шести элементной антенной сканирующей фазированной антенной решётки, результаты дис-

сертационного исследования внедрены в производственный и учебный процесс.

Результаты работы представлялись на научно-технических конференциях: международной научно-практической конференции «Менеджмент качества, транспортная и информационная безопасность, информационные технологии», г. Санкт-Петербург – 2018; 12-ой международной научно-технической конференции "Динамика систем, механизмов и машин», г. Омск – 2018; «Московский семинар по электронным и сетевым технологиям», г. Москва – 2018; международной научно-практической конференции «Динамика взаимоотношений различных областей науки в современных условиях», г. Уфа – 2017; международной научно-практической конференции «Планирование и проведение исследований и интерпретация экспериментальных данных по изучению материалов различной природы», г. Омск – 2017; международной научно-практической конференции «Взаимодействие науки и общества: проблемы и перспективы», г. Казань – 2017.

По результатам исследований получен патент на полезную модель RU № 175331 U1, МПК H01P5/10: «Широкополосный объёмный полосково-щелевой переход».

Внедрение результатов работы. Основные результаты работы нашли применение на АО ЧРЗ «Полёт» при разработке действующих ДОС для радиомаячного комплекса системы посадки СП -2010.

Результаты экспериментальных исследований с использованием разработанных аппаратно-программных средств подтверждены актом о внедрении результатов диссертационного исследования, который представлен в приложении к диссертации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 3 научные статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ; 3 статьи в материалах научных конференций, включенных в международную базу цитирования Scopus; 9 научных работ по теме проведенного исследования в других журналах и материалах российских и международных научно-технических и научно-практических конференций.

Структура и объём работы. Диссертационная работа включает введение, 4 главы, заключение, список использованной литературы, насчитывающий 110 наименований. Общий объём диссертационной работы 158 стр., 103 рисунка, 24 таблицы и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования; сформулирована цель диссертационной работы; приведен перечень решенных задач для её достижения; указаны положения, выносимые на защиту и определяющие научную новизну и практическую ценность результатов исследований.

В первой главе приведена сравнительная оценка способов реализации элементов ДОС фазированных антенных решёток: традиционный мик-

рополосковый плоскостной способ, многослойный монокристалльный способ, способ реализации с сосредоточенными постоянными. Для каждого из способов их построения выявлены недостатки. Предложена объёмно-модульная технология, позволяющая устранить данные недостатки.

Основной итог решения задачи: *определения основных направлений оптимизации СВЧ узлов ДОС в процессе их разработки* состоит в обосновании перспективности построения объёмно-модульных ДОС на основе суперпозиции принципов модульности и многослойности их построения. Представлена разработанная методика проектирования объёмно-модульных ДОС, а также способ расчёта их электродинамических характеристик. Сформулирован основной принцип объёмно-модульного способа построения ДОС, получивший название принципа суперпозиции модульности и многослойности.

Методика проектирования объёмно-модульной ДОС, согласно вышеназванного принципа, осуществляется в четыре этапа: декомпозиция электрической схемы ДОС (см. рисунок 1), создание модульной конструкции ДОС, обеспечение бесконтактной электромагнитной связи между слоями объёмно-модульной ДОС, разработка элементов регулировки электромагнитных характеристик ДОС.

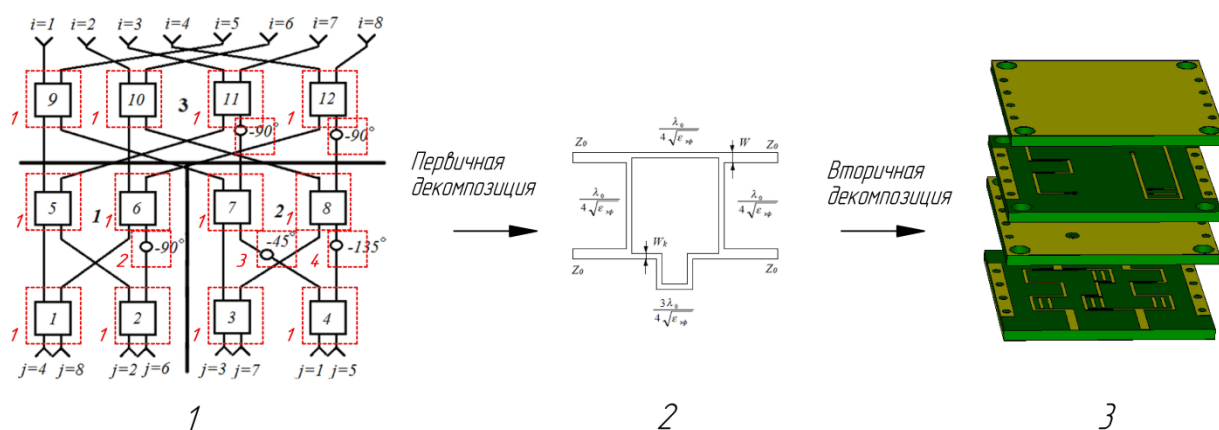


Рисунок 1. Процесс декомпозиции ДОС на базовые элементы: 1 – разбиение устройства по функциональному принципу, 2 – функциональный блок (результат первичной декомпозиции), 3 – конечный набор базовых элементов

Во второй главе приведены результаты исследования контактных и бесконтактных элементов передачи мощности для связи конструктивно немонокристалльных частей объёмно-модульной ДОС. Выявлены недостатки, препятствующие применению контактных элементов передачи мощности для связи конструктивно немонокристалльных частей объёмно-модульной ДОС. Доказана реальная возможность применения бесконтактной передачи мощности для электромагнитной связи между базовыми элементами. Представлена электродинамическая модель бесконтактного устройства передачи мощности (ОПЩ перехода). Приведена сравнительная с методом конечного интегрирования оценка её использования для расчёта основных

электродинамических характеристик объемного полосково-щелевого перехода.

Основной итог решения задачи исследования влияния неоднородностей объёмно-модульной конструкции ДОС на электродинамические характеристики элементов передачи СВЧ мощности между отдельными её частями и определения условия обеспечения высокой плотности их компоновки с необходимыми конструктивными решениями по обеспечению широкополосности элементов передачи СВЧ мощности заключается в обосновании возможности и целесообразности бесконтактного устройства передачи мощности сигнала с помощью объёмного полосково-щелевого перехода (ОПЩ переход).

Наиболее распространенным методом исследования ОПЩ перехода является метод, основанный на использовании метода конечного интегрирования.

Вместе с тем представляется целесообразным также оценить возможность применения модели электромагнитного поля, учитывающей его дифракцию на элементах конструкции ОПЩ перехода. Целью такого исследования является оценка элементов матрицы рассеивания и последующее сравнение его результатов с аналогичными оценками, полученными с помощью модели, основанной на использовании метода конечного интегрирования.

Основной задачей, решаемой при построении модели дифракции электромагнитного поля, являлось получение выражения для магнитного поля, порождаемого током в щели:

$$\mathbf{p} \cdot \mathbf{H}(\mathbf{l}_1) = - \int_V \mathbf{j}_m \cdot \mathbf{H}_M dv + \int_S [(\mathbf{H} \times \mathbf{E}_M) - (\mathbf{H}_M \times \mathbf{E})] \cdot \mathbf{n} ds, \quad (1)$$

где $\mathbf{H}$ – искомое поле, на поверхности полосковой линии; $\mathbf{p}$ – единичный вектор, задающий ориентацию вспомогательного источника; $\mathbf{l}_1$ – расстояние между полосковой и щелевой линией; $\mathbf{H}_M$ и $\mathbf{E}_M$ – вспомогательное поле, обусловленное действием полосковой линии на щель; $\mathbf{n}$ – вектор единичной внешней нормали к поверхности проводящего экрана.

Согласно (1) получено выражение для распределения плотности токов на полосковой линии в виде интегрального уравнения (ИУ) II рода:

$$\mathbf{j}^{nov}(a) = 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}^i(a) + \frac{\mathbf{n}}{2\pi} \times \int_S \mathbf{j}^{nov}(b) \times \text{grad}_b \left[\frac{\exp(ikl_{ab})}{l_{ab}} \right] ds_b, \quad (2)$$

где $\mathbf{j}^{nov}$ – распределение электрического поверхностного тока на проводящем экране; a – координата наблюдения, лежащая в плоскости металлического экрана; b – координата источника, лежащая в плоскости металлического экрана; k – волновое число.

Сравнительный анализ элементов матрицы рассеивания ОПЩ перехода, полученных при использовании дифракционной модели и модели, основанной на методе конечного интегрирования, показал совпадение резонансных характеристик ОПЩ перехода (см. рисунок 2).

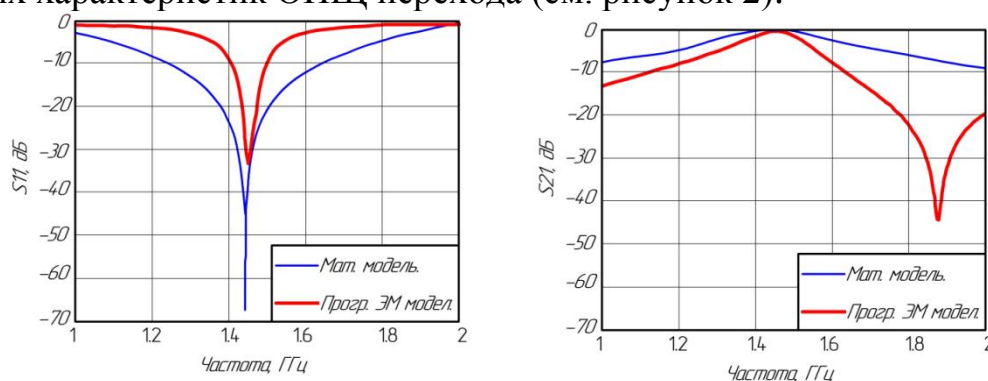


Рисунок 2. Сравнение графиков коэффициента отражения (S_{11}) и коэффициента передачи (S_{12})

В тоже время имеют место расхождения в оценке коэффициентов передачи и отражения (см. рисунок 2). Эти расхождения обусловлены допущениями, принятыми при построении дифракционной модели (бесконечно тонкий и протяженный металлический слой). Принятые в модели допущения обусловили идеализированное значение коэффициента отражения на центральной частоте (-34 дБ в методе конечного интегрирования и -67 дБ в мат. модели).

Из результатов исследования можно сделать вывод о возможности использования предложенного метода оценки степени согласования полосковых и щелевых линий, входящих в состав ОПЩ перехода. Данный метод обеспечивает достаточную точность непосредственного решения электродинамической задачи для предварительной её оценки. Однако для более высокой точной указанной оценки целесообразно использовать специализированные программы электромагнитного моделирования.

Проведённые исследования продемонстрировали возможность применения ОПЩ переходов для осуществления электрической связи между базовыми элементами в немонолитных конструкциях, подверженных смещению их частей, и образованию воздушных зазоров между ними. При этом исследования показали, что при величинах данных неоднородностей до 0,1 мм не происходит существенных искажений электродинамических характеристик ОПЩ переходов (см. рисунок 3, 4). В связи с этим их использование в немонолитных объёмно-модульных конструкциях представляется возможным.

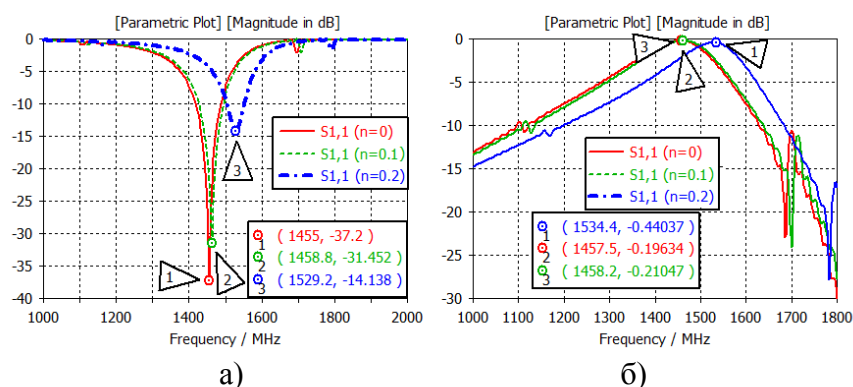


Рисунок 3. Динамика изменения электродинамических характеристик ОПЩ перехода при введении зазора между БЭ: а) коэффициент отражения; б) коэффициент передачи

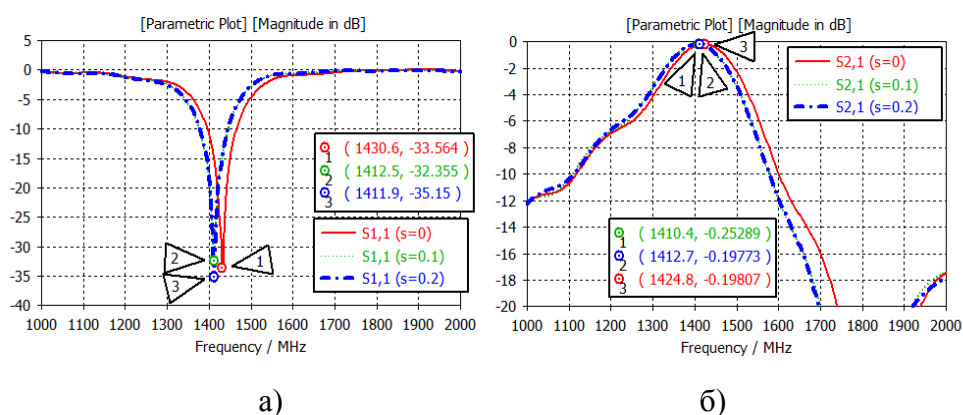


Рисунок 4. Динамика изменения электродинамических характеристик ОПЩ перехода при смещении базовых элементов относительно друг друга: а) коэффициент отражения; б) коэффициент передачи

Исследования, направленные на определение степени влияния особенностей конструкции на электродинамические характеристики ОПЩ перехода продемонстрировали реальную возможность его применения в составе объёмно-модульного ДОС.

Доказана возможность размещения нескольких ОПЩ переходов в рамках одного базового элемента. Причём определено, что оптимальным является размещение ОПЩ переходов, щелевые линии которых размещены параллельно (см. рисунок 5 а). Из результатов исследования следует, что даже при близком размещении нескольких ОПЩ переходов (на расстоянии 5 мм) можно обеспечить уровень развязки между ними в пределах от минус 25 дБ до 33 дБ при использовании дополнительной щелевой линии со значительно большим волновым сопротивлением, чем у щелей, входящих в ОПЩ переходы (см. рисунок 5 б). Данные результаты позволяют сделать вывод о возможности высокой плотности их компоновки в пределах одного слоя.

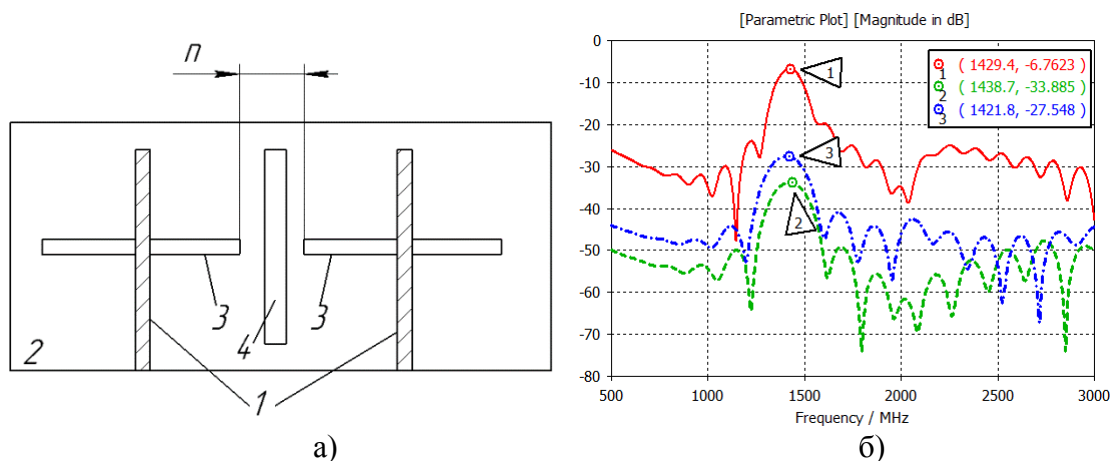


Рисунок 5. Развязка по СВЧ сигналу двух ОПЩ переходов с помощью щелевого резонатора

Для обеспечения решения задач в более широком диапазоне частот (25-30 % от рабочей частоты) необходимо добиться расширения полосы пропускания ОПЩ перехода. Предложено два варианта решения этой задачи: изменение геометрии щелевой линии и изменение области пересечения полосковой и щелевой линий.

Изменение геометрии щелевой линии. Рассмотренный выше ОПЩ переход содержит однородную щелевую линию, закороченную на концах. Расширение щелевой линии реализовано в виде сегмента окружности, расширяющегося к её концам (см. рисунок 6 а). В зависимости от величины угла сегмента обеспечивается разная ширина полосы пропускания ОПЩ перехода. Результаты численного моделирования (см. рисунок 6 б) показывают, что увеличение угла сегмента на её концах приводит к значительному расширению полосы пропускания (см. таблицу 1).

Таблица 1

Электродинамические характеристики ОПЩ перехода при разном размере расширения щелевой линии

Угол сегмента, град	0	8	15	20
Центральная частота, МГц	2480	2480	2480	2480
Коэффициент отражения по центру полосы пропускания, дБ	- 40	- 20	- 27	- 25
Коэффициент связи, дБ	-0,01	- 0,9	-1,0	-1,0
Ширина полосы по уровню коэффициента отражения минус 20 дБ, МГц	39	50	65	80

Введение в модель щелевой линии сегментов, расширяющихся к короткозамкнутым концам, позволяет, за счет уменьшения добротности ОПЩ перехода, двукратно расширить его полосу пропускания (ширина полосы пропускания изменяется от 1,5% до 3,0 % от значения центральной частоты). Однако, при этом нарушается его согласование с полосковыми

линиями передачи, что проявляется в ухудшении значения коэффициента отражения по центру полосы пропускания на 20 дБ (см. таблицу 1). Таким образом, применение выше представленного ОПЩ перехода в реальных изделиях возможно, но при этом будет иметь место ухудшение электродинамических характеристик ДОС.

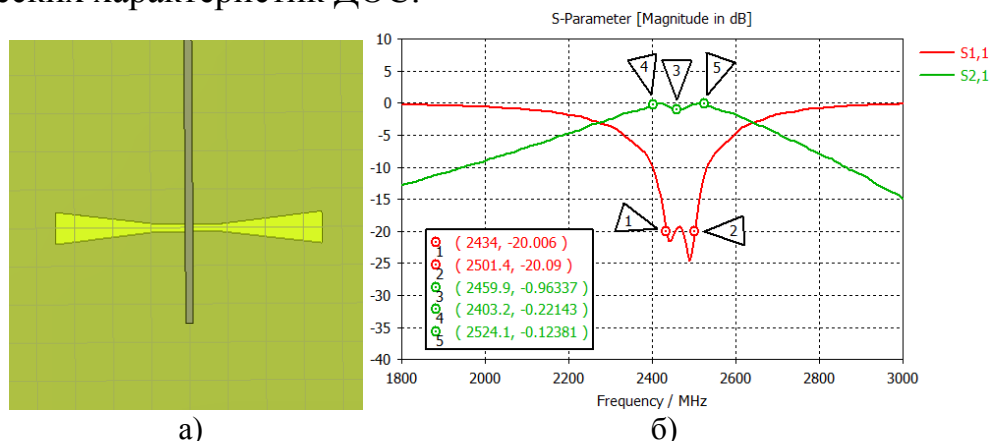


Рисунок 6. ОПЩ переход с расширяющейся к краям щелевой линией (угол сегмента 15°): а) топология щелевой линии; б) электродинамические характеристики ОПЩ перехода

Изменение области пересечения полосковых и щелевых линий. На базе ОПЩ перехода разработана его модификация, ширина полосы пропускания которой в несколько раз шире полосы пропускания исходного его варианта. Конструктивно эта модификация сводится к созданию разновидности ОПЩ перехода (см. рисунок 7). Он включает в себя две полосковых линии передачи 2 и 3, размещённые на разных слоях многослойной диэлектрической конструкции 1, связанных через щелевой резонатор 4, вырезанный в металлической плоскости между слоями с полосковыми линиями. В отличие от исходного варианта ОПЩ перехода в его модификации (широкополосный ОПЩ переход) полосковые линии перекрещиваются с щелью два раза, причём длина отрезка полосковой линии между ними соответствует половине длины волны.

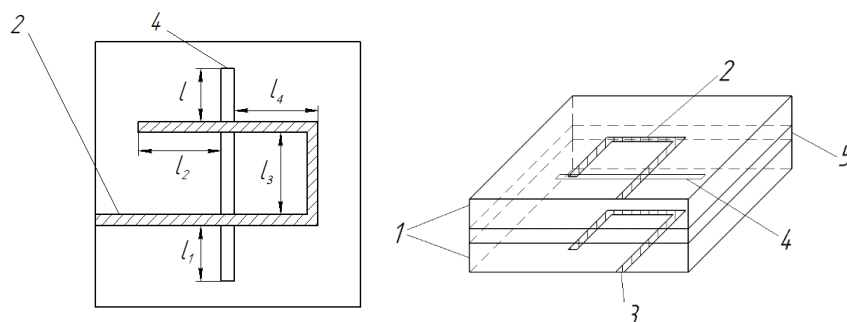


Рисунок 7. Изометрия широкополосного объёмного полосково-щелевого перехода и его эквивалентная схема

Результаты моделирования (см. рисунок 8) свидетельствуют о том, что широкополосный ОПЩ переход (см. рисунок 7) имеет полосу пропус-

кания 242 МГц (до 25% от центральной частоты 980 МГц), в которой коэффициент передачи не менее минус 0,15 дБ. При этом коэффициент отражения соразмерен уровню минус 50 дБ.

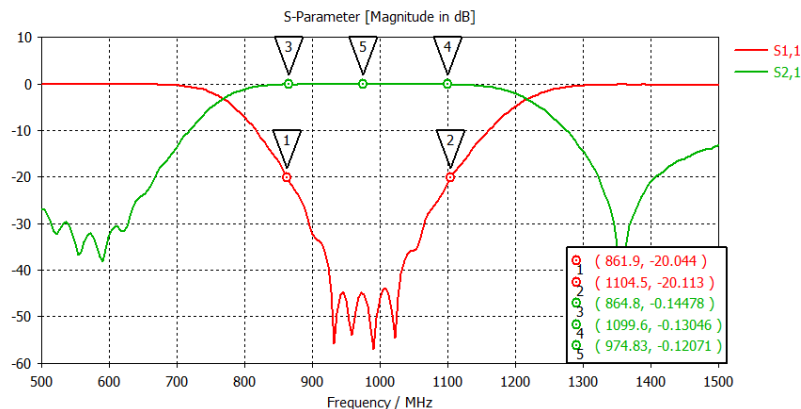


Рисунок 8. Электродинамические характеристики широкополосного объёмного полосково-щелевого перехода

В третьей главе рассматривается электромагнитная модель объёмно-модульной ДОС. В связи со сложностью расчета электродинамических характеристик этого устройства аналитическими методами актуальным является использование численных методов расчёта, реализованных с помощью программ электромагнитного моделирования. В основу решения задачи исследования электродинамических характеристик объёмно-модульных ДОС, сравнения их по габаритным и электромагнитным характеристикам с аналогами, разработанными на основе традиционных технологий, положено применение метода конечного интегрирования к ДОС «делитель мощности» и «матрица Батлера». Решение задачи состоит в нахождении электродинамических характеристик электромагнитной модели ДОС, в которой учитывается влияние на них конструктивных особенностей, связанных с объёмно-модульным способом построения. Исследования проводились на ДОС делитель мощности (см. рисунок 9).

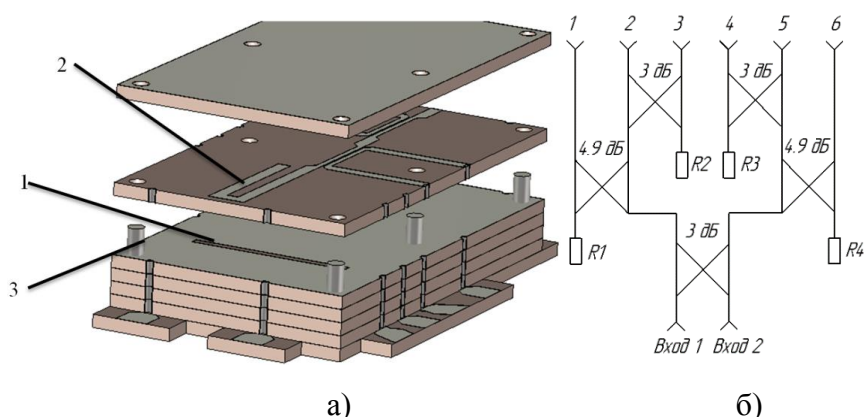


Рисунок 9. Объёмно-модульная структура: а) модель объёмно-модульной структуры состоящая из конструктивно немонолитных базовых элементов, связанных с помощью широкополосных полосково-щелевых переходов (1 – щель, 2 – полосковая линия), б) схема электрическая ДОС «делитель мощности»

С использованием метода конечного интегрирования проведено численное моделирование ДОС «делитель мощности», в результате которого рассчитаны основные его электродинамические характеристики (см. рисунок 10, 11).

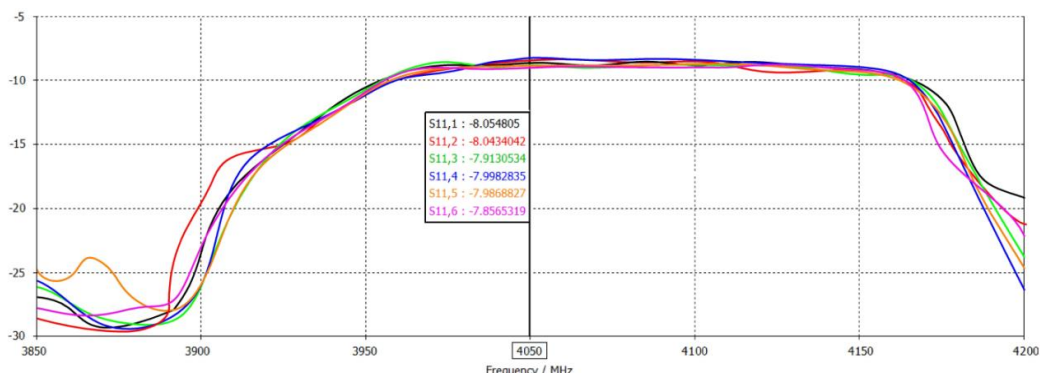


Рисунок 10. Амплитудное распределение, дБ

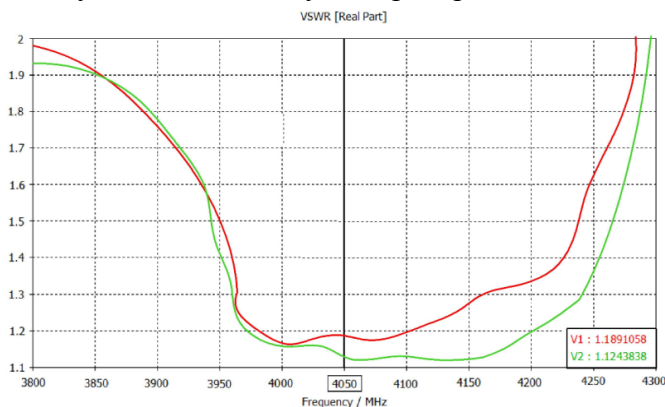


Рисунок 11. КСВН на входах ДОС

Полученные в результате электромагнитного моделирования характеристики ДОС свидетельствуют о том, что они незначительно отличаются от теоретических: отклонение амплитудного распределения - не превышает 0,2 дБ. КСВН на входах ДОС1 и 2 - не превышает 1,18, и 1,19 соответственно. Другим устройством, разработанным по объёмно-модульной технологии, является ДОС «матрица Батлера» (см. рисунок 12, 13, 14, 15).

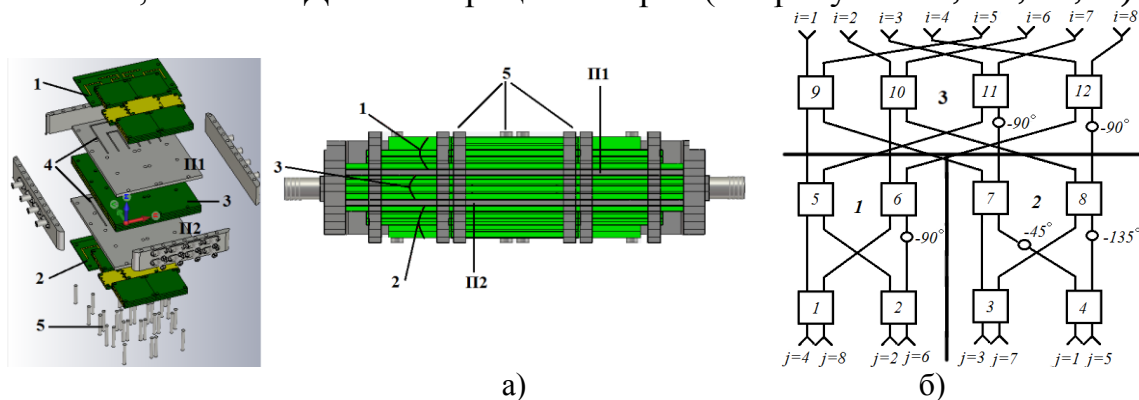


Рисунок 12. Объёмно-модульная структура: а) модель объёмно-модульной структуры (1-3 – составные блоки, 4 – щелевые линии, размещённые на металлических пластинах П1, П2 и входящие в состав ОПЩ переходов, используемых для передачи СВЧ мощности между блоками), б) схема электрическая ДОС «матрица Батлера».

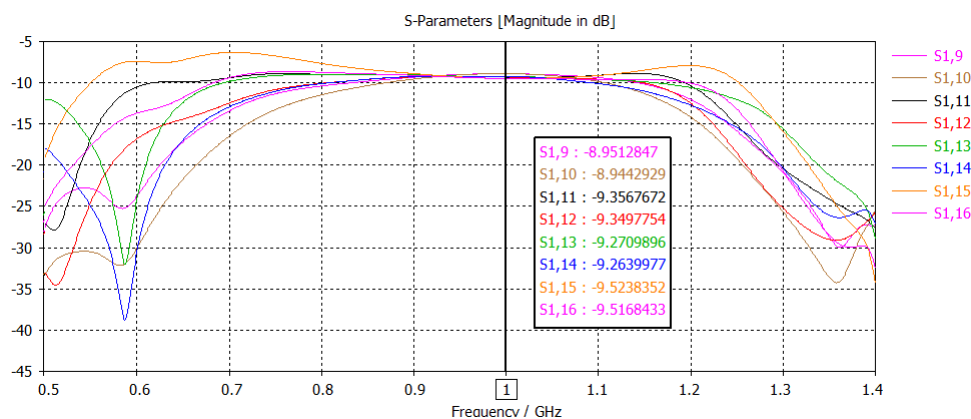


Рисунок 13. Амплитудное распределение радиочастотного сигнала с одного из входов на восемь выходов «матрицы Батлера», дБ

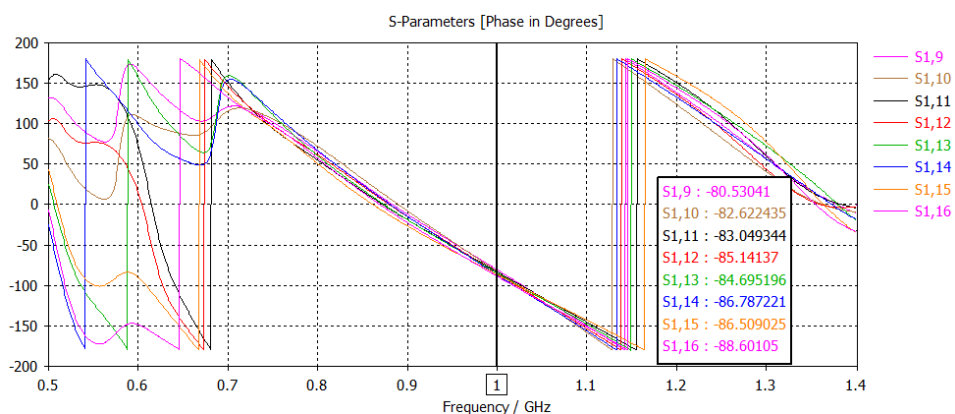


Рисунок 14. Фазовое распределение сигнала с одного из входов на восемь выходов «матрицы Батлера», дБ

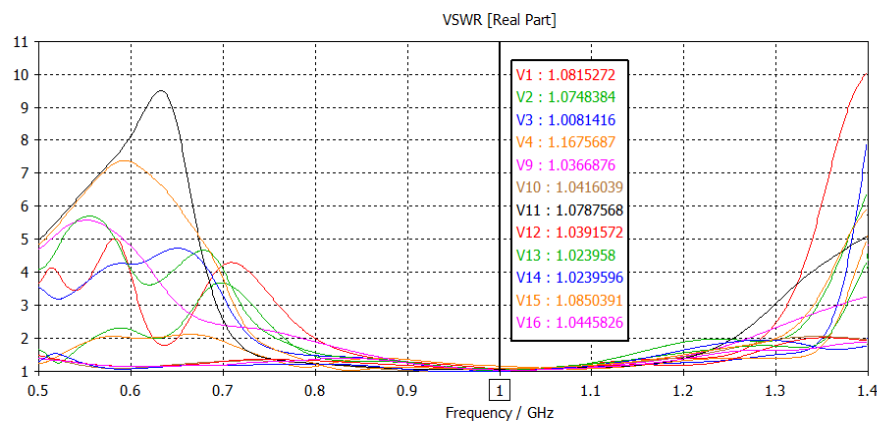


Рисунок 15. КСВН «матрицы Батлера»

Описываемая «матрица Батлера» имеет разработанный на АО ЧРЗ «Полёт» аналог, реализованный с применением традиционной плоскостной технологии. Сравнение показало, что по электрическим характеристикам объемно-модульная ДОС практически эквивалентна своему микрополосковому аналогу, а по габаритным характеристикам объемно-модульный ДОС имеет значительно меньшие размеры и массу. Устройство, разработанное с применением объемно-многослойной технологии (см. рисунок 16),

занимает объём 324 см^3 ($12 \times 9 \times 3 \text{ см}^3$), а разработанный на АО ЧРЗ «Полёт» устройство-аналог, занимает объём 6400 см^3 ($80 \times 80 \times 10 \text{ см}^3$).

В четвёртой главе решается задача *разработки на основе применения объёмно-модульного метода оптимизации ДОС экспериментального макета делитель мощности и проведения сравнительной оценки его технических характеристик с аналогами и результатами математического моделирования.*

Целью экспериментального исследования являлась: сравнительная оценка технических характеристик экспериментального образца (макета) - делителя мощности, разработанного на основе объёмно – модульной технологии и реального его образца, выполненного по традиционной (плоскостной) технологии. В работе приведены обоснования постановки выше-названного эксперимента и подробная методика его проведения.

Результаты проведенного исследования достоверно подтверждают ожидаемую эффективность разработанной объёмно-модульной ДОС (см. рисунок 16). Сравнение её технических характеристик с аналогом, реализованным с помощью микрополосковой технологии, показывает преимущество объёмно-модульных ДОС.

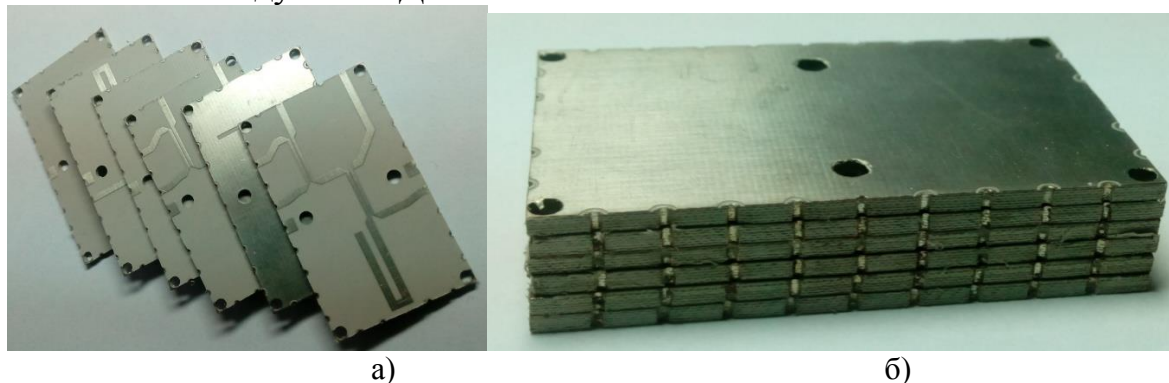


Рисунок 16. Строение макета ДОС «делитель мощности»: а) базовые элементы, из которых состоит ДОС «делитель мощности»; б) ДОС целиком

Результаты измерения электродинамических характеристик свидетельствуют об адекватности изложенных в диссертации принципов объёмно-модульного способа реализации ДОС (см. рисунок 17, 18).

Незначительные расхождения электродинамических характеристик макета ДОС «делитель мощности» и его электромагнитной модели в диапазоне значений $0,1 - 0,3 \text{ дБ}$ сопоставимо с величиной погрешности измерительных приборов.

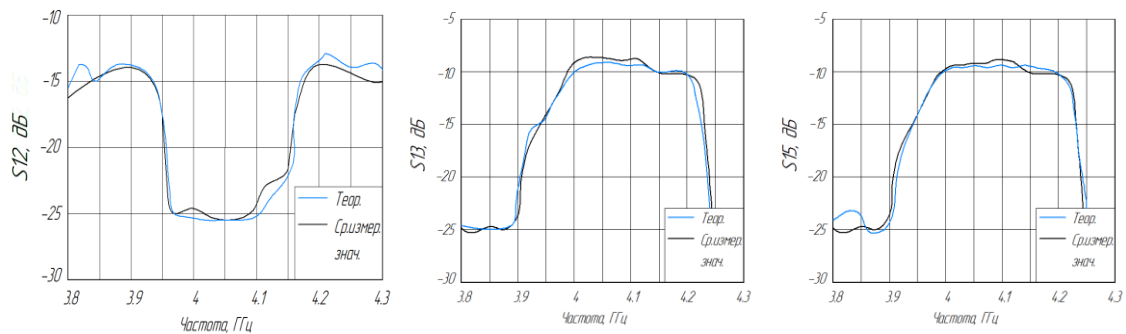


Рисунок 17. Коэффициент передачи S_{12} , S_{13} , S_{15} ДОС «делитель мощности»

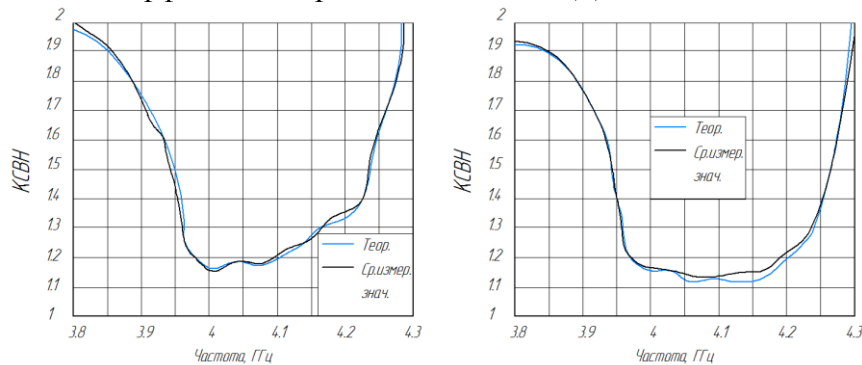


Рисунок 18. КСВН на входах ДОС «делитель мощности»

Результаты расчёта, позволяют сделать вывод о возможности применения объёмно-модульного принципа построения для реализации полноценного ДОС, не уступающей по электродинамическим характеристикам традиционным аналогам.

В заключении приведено описание основных результатов проведенного исследования.

В приложении представлены копии актов о внедрении разработанной ДОС, патент на полезную модель объемного полосково-щелевого перехода.

Заключение

Основные результаты и выводы диссертационного исследования состоят в следующем.

1. Анализ существующих способов построения ДОС (волноводный, коаксиальный, СВЧ платы и цифровой) указывает, что в настоящий период времени наиболее целесообразным методом оптимизации СВЧ узлов ДОС является объёмно-модульное их построение, позволяющее реализовать такие показатели эффективности как уменьшение габаритных характеристик, обеспечение функциональной перестраиваемой (модульности) на уровне их составных частей и снижение себестоимости. Результаты проведенного исследования указывают на реальную возможность существенного уменьшения (более чем в 10 раз) габаритных показателей ДОС объёмно-модульного построения с сохранением технических параметров, характерных для традиционной микрополосковой технологии. При этом каждая

составная часть представлена в виде конструктивно обособленной и законченной платы, с унифицированными габаритными, присоединительными размерами и стандартным способом электромагнитной связи, позволяющим собирать из базовых элементов СВЧ узлы с необходимыми электродинамическими характеристиками.

2. Результатом оценки влияния основных конструктивных неоднородностей на электродинамические характеристики ДОС в диапазоне частот от 1 до 7,5 ГГц является определение допустимых величин воздушного зазора между элементами конструкции и смещения базовых элементов друг относительно друга, не превышающих 0,1 мм, при которых не происходит существенных искажений электродинамических характеристик ОПЩ переходов.

2.1. Определены условия для обеспечения высокой плотности компоновки полосково-щелевых переходов для диапазона частот от 1 до 7,5 ГГц. Установлено, что при использовании дополнительной щелевой линии со значительно большим волновым сопротивлением, чем у щелей, входящих в ОПЩ переходы, можно обеспечить уровень развязки между ними в пределах от минус 25 дБ до 33 дБ на расстоянии до 5 мм между торцами щелевых линий.

2.2. Конструктивные решения по расширению рабочей полосы частот полосково-щелевых переходов в объёмно-модульном ДОС основаны на введении неоднородности в щелевую линию в виде сегментообразных её расширений или дополнительной связи между полосковой и щелевой линий передачи, позволяющей увеличить полосу пропускания ОПЩ перехода до 25 % от центральной (расчётной) частоты.

3. Результаты электромагнитного моделирования ДОС делитель мощности с целью оценки её электродинамических характеристик, показали незначительные их отличия от теоретических значений: отклонения амплитудного и фазового распределения не превышают 0,2 дБ и 1° соответственно. В то же время КСВН на входах ДОС не превышает 1,19.

4. Результаты экспериментальных исследований технических характеристик макета диаграммообразующей схемы делитель мощности показали практическую её идентичность с аналогичными электродинамическими характеристиками микрополосковых аналогов. Незначительные расхождения в диапазоне значений 0,1 - 0,3 дБ сопоставимы с величинами погрешностей измерительных приборов. При этом объёмно-модульные макеты имеют выигрыш перед аналогами в габаритах примерно на порядок.

Рекомендации по результатам диссертационной работы. Представленная в диссертации методика оптимизации СВЧ узлов рекомендует к применению при реализации малогабаритных СВЧ узлов с возможностью дальнейшей их функциональной модернизации на производствах радиолокационной и радионавигационной техники.

Перспективное направление дальнейших исследований по тематике диссертационной работы связано с разработкой научных основ, технических и технологических решений для создания новых более совершенных объёмно-модульных диаграммообразующих схем.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень
ВАК РФ:**

1. **Дударев, Н.В.** Разработка гибридного делителя мощности на многослойной структуре/ Н.В. Дударев, С.Н. Даровских//Вестник ЮУрГУ. – 2017. – № 1 (том 17). – С. 34-41.

2. **Дударев, Н.В.** Принципы построения объёмно-модульных СВЧ устройств диаграммообразующей схемы и проблемы их реализации/ Н.В. Дударев, С.Н. Даровских// журнал «Антенны». – 2018. – №3. – С.48-58.

3. **Дударев, Н.В.** Модели бесконтактной передачи мощности сигнала в объёмно-модульном диаграммообразующем устройстве СВЧ-диапазона/ Н.В. Дударев, С.Н. Даровских// журнал «Антенны». – 2018. – №9. – С. 54-59.

Публикации в научных изданиях, включённых в Scopus

4. **Dudarev, N.V.** The influence of Design Features on the Electrical Characteristics of the Microwave Volumetric Strip-Slot Line Transition/ N.V. Dudarev, S.N. Darovskikh, N.V. Vdovina// Proceedings of the 2018 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2018 8525041. – St. Petersburg, Russia – 2018. – С.428-431.

5. **Dudarev, N.V.** Volumetric-modular technology for building high-frequency diagramming devices/ N.V. Dudarev, S.N. Darovskikh// Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceeding. – 2018. – С.1-4.

6. **Dudarev, N.V.** Design Fundamentals of a Three-Dimensional Modular Microwave Phase Converter/ N.V. Dudarev, S.N. Darovskikh, N.V. Vdovina//12th International Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines". –Omsk,Russia–2019. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/330244776_Design_Fundamentals_of_a_Three-Dimensional_Modular_Microwave_Phase_Converter - 02.03.20

Патенты, заявки на патенты и свидетельства о госрегистрации программ

7. **Дударев, Н.В.** Широкополосный объёмный полосково-щелевой переход / Дударев Н.В.; правообладатель: федеральное автономное образовательное учреждение высшего образования ЮУрГУ. - RU № 175331 U1, МПК H01P5/10; заявл. 05.09.2017; зарег. 30.11.17; опубл. 30.11.17. – 6 с.

Публикации в других научных журналах, трудах международных и всероссийских конференций

8. **Дударев, Н.В.** Объёмный полосково-щелевой переход с неоднородной щелевой линией/ Н.В. Дударев, С.В. Дударев, А.В. Дударев// Научно-практический журнал «Молодёжный вестник», издательство общество с ограниченной ответственностью «Вектор науки». – 2019. – № 3. – С. 130-134.

9. **Дударев, Н. В.** Объёмно-щелевой СВЧ делитель мощности / Н.В. Дударев, С.В. Дударев// Международный инновационный журнал Инновационная наука. Серия «Технические науки». – 2017. –Вып. 2 – Часть 1 – С. 45-47.

10. **Дударев, Н. В.** Объёмно-интегральный СВЧ делитель мощности/ Н.В. Дударев, А.В. Дударев// Международный инновационный журнал Инновационная наука. Серия «Технические науки». – 2016. –Вып. 12. – Часть 2 – С. 51-53.

11. **Дударев, Н. В.** Разработка гибридного делителя мощности на многослойной структуре / Н.В. Дударев, С.Н. Даровских// Международный инновационный журнал Инновационная наука. Серия «Технические науки». – 2016. –Вып. 4. – Часть 3 – С. 100-107.

12. **Дударев Н. В.** Использование переходных отверстий и перемычек в линиях ВЧ и СВЧ тракта / Н.В. Дударев// Международный инновационный журнал Инновационная наука. Серия «Технические науки». – 2016. –Вып. 10 – Часть 2. – С. 41-45.

13. **Дударев Н. В.** Применение бесконтактных переходов в объёмно-многослойных устройствах диаграмма образующей схемы СВЧ и КВЧ диапазонов / Н.В. Дударев, С.В. Дударев, А.В. Дударев// Международный инновационный журнал Инновационная наука. Серия «Технические науки». – 2017. –Вып. 9. – С. 16-18.

14. **Дударев, Н. В.** Влияние конструктивных неоднородностей на электрические характеристики объёмного полосково-щелевого перехода / Н.В. Дударев, С.В. Дударев, А.В. Дударев // Взаимодействие науки и общества: проблемы и перспективы: сборник статей международной научно-практической конференции. – Казань, 2017. – Часть 3.– С. 33-36.

15. **Дударев, Н. В.** Объёмный матричный делитель СВЧ мощности / Н.В. Дударев, С.В. Дударев, А.В. Дударев// Планирование и проведение исследований и интерпретация экспериментальных данных по изучению материалов различной природы: сборник статей международной научно-практической конференции. – Омск, 2017. – С. 27-29.

16. **Дударев, Н. В.** Щелевой объёмно-многослойный переход для устройств диаграммообразующих схем СВЧ устройств/ Н.В. Дударев, С.В. Дударев, А.В. Дударев// Динамика взаимоотношений различных областей науки в современных условиях: сборник статей международной научно-практической конференции. – Уфа, 2017. – Часть 2. – С. 53-56.

Подписано в печать . .2020г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,375. Тираж 100 экз. Заказ № 1014733.

ИУНЛ ПГУТИ
443090, г. Самара, Московское шоссе, 77