

На правах рукописи



Попков Александр Юрьевич

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛОСКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ
ОТВЕТВИТЕЛЕЙ СО СЛАБОЙ СВЯЗЬЮ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск, 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель: **Гошин Геннадий Георгиевич**
доктор физико-математических наук,
профессор, ТУСУР, г. Томск

Официальные оппоненты: **Разинкин Владимир Павлович**
доктор технических наук, профессор кафедры
теоретических основ радиотехники, ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный технический
университет», г. Новосибирск

Сусяев Валентин Иванович
кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры радиоэлектроники, директор ЦКП
«Центр радиоизмерений ТГУ», ФГАОУ ВО «На-
циональный исследовательский омский государ-
ственный университет», г. Томск

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное обра-
зовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет» (Инсти-
тут инженерной физики и радиоэлектроники),
г. Красноярск.

Защита диссертации состоится «20» декабря 2016 г. в 09 час. 00 мин. на заседа-
нии диссертационного совета Д 212.268.01 при Томском государственном уни-
верситете систем управления и радиоэлектроники по адресу: г. Томск, пр. Ле-
нина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР по адресу: г. Томск,
ул. Красноармейская, 146 и на сайте ТУСУР: <https://tusur.ru/ru/nauka-i-innovatsii/podgotovka-kadrov-vysshey-nauchnoy-kvalifikatsii/ob-yavleniya-o-zaschitah-dissertatsiy/dissertatsiya-vliyanie-elektrofizicheskikh-i-geometricheskikh-parametrov-na-chastotnye-harakteristiki-poloskovykh-napravlennykh-otvetviteley-soslaby-svyazyu>

Автореферат разослан «__» ноября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.268.01
доктор физ.-мат. наук



Мандель А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Направленные ответвители (НО) со слабой связью являются важными элементами современной радиоэлектроники, как в качестве самостоятельных устройств в передающих линиях, так и в качестве составных частей радиоизмерительной аппаратуры. Как самостоятельное устройство их можно применять в качестве разветвителей или делителей сигнала и для контроля параметров сигнала в линии и её согласования. Кроме того, они являются неотъемлемой частью радиоизмерительного оборудования – СВЧ ваттметров, векторных и скалярных анализаторов цепей, рефлектометров и ряда других приборов. Поэтому разработка направленных ответвителей является важной задачей. Актуальность выбранной темы обусловлена рядом факторов:

Во-первых, существующие методы разработки направленных ответвителей требуют высоких затрат вычислительных ресурсов, поскольку в большинстве случаев основаны на численном анализе. Отсутствие аналитических методов, адекватно описывающих частотные характеристики направленных ответвителей, не позволяет сократить время разработки и объём используемых вычислительных ресурсов при проектировании направленных ответвителей.

Во-вторых, влияние конструктивных особенностей на частотные характеристики НО исследовано слабо, а наличие воздушной полости, образующейся в результате послойной сборки устройства, относят скорее к нежелательному последствию, нежели к средству коррекции частотных характеристик направленных ответвителей.

В-третьих, влияние предельной частоты на частотные характеристики НО подробно не рассматривалось и не принималось во внимание при разработке направленных ответвителей.

Цель работы. исследование влияния геометрических параметров и конструктивных особенностей на частотные характеристики симметричных направленных ответвителей на нерегулярных полосковых линиях с комбинированной связью, а также разработка квазистатической модели направленного ответвителя с использованием метода декомпозиции.

Задачи исследования. Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Выявить, как и какие из геометрических параметров НО в наибольшей степени влияют на его частотные характеристики, на основании чего сформулировать критерий оптимального выбора этих параметров, учитывающий влияние предельной частоты направленного ответвителя на характеристики устройства.

2. Провести оценку влияния воздушной полости вдоль области связи, образующейся в результате сборки НО, на его частотные характеристики и исследовать возможность использования этой полости в качестве элемента коррекции этих характеристик.

3. Разработать квазистатическую модель направленного ответвителя с использованием метода декомпозиции, учитывающей влияние неоднородностей и предельной частоты на его частотные характеристики.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись методы теории линейных электрических цепей, матричной алгебры, вычислительной математики, специализированные системы автоматизированного проектирования и электродинамического моделирования, экспериментальные исследования с использованием сертифицированного измерительного оборудования.

Научная новизна.

1. Исследованы основные геометрические параметры, определяющие предельную частоту направленного ответвителя, влияющую на его частотные характеристики.

2. Впервые исследовано влияние предельной частоты на направленность симметричных направленных ответвителей на нерегулярных полосковых линиях с комбинированной слабой связью.

3. Впервые сформулирован критерий оптимального выбора высоты камеры связи и толщины полосковых проводников симметричного направленного ответвителя на нерегулярных полосковых линиях с комбинированной связью.

4. Исследовано влияние объёма воздушной полости, образующейся в результате послонной сборки полосковых направленных ответвителей, на их частотные характеристики.

5. Предложен способ улучшения частотных характеристик симметричных направленных ответвителей на нерегулярных полосковых линиях с комбинированной связью путём добавления тонких полосок диэлектрика в воздушную полость, образующуюся в результате сборки устройства.

6. Разработана квазистатическая модель, построенная с использованием метода декомпозиции, позволяющая учесть влияние предельной частоты на частотные характеристики симметричных направленных ответвителей на нерегулярных полосковых линиях с комбинированной слабой связью.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Показано, что посредством уменьшения высоты камеры связи и увеличения толщины полосковых проводников можно добиться увеличения предельной частоты НО и уменьшить её влияние на частотные характеристики устройства.

2. Применение полученной квазистатической модели позволяет сократить общее время разработки направленного ответвителя в сравнении с непосредственным применением САПР, использующих численные методы электродинамического моделирования.

3. Показано, что настройка направленного ответвителя путём подбора расстояния от полосковых линий до подстроечных элементов в виде тонких полосок диэлектрика позволяет улучшить направленность устройства.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Улучшение частотных характеристик симметричных направленных ответвителей со слабой связью на нерегулярных полосковых линиях достигается посредством уменьшения высоты камеры связи и увеличения толщины полосковых линий, удовлетворяющих условию, согласно которому верхняя граничная частота рабочего диапазона $f_{\text{верх}}$ должна быть не менее, чем в три раза меньше его предельной частоты $f_{\text{пр}}$, рассчитанной по полученной эмпирической формуле.

2. Воздушная полость, образуемая в результате сборки симметричных направленных ответвителей со слабой связью на нерегулярных полосковых линиях, может быть использована как средство улучшения направленности устройства посредством применения подстроечных элементов в виде тонких узких полосок диэлектрика, размещённых вдоль области связи.

3. Разработанная с использованием методов декомпозиции и конечных разностей квазистатическая модель симметричного полоскового направленного ответвителя на нерегулярных линиях со слабой связью, учитывает влияние предельной частоты на его частотные характеристики и позволяет описать поведение устройства в заданном частотном диапазоне.

Достоверность и обоснованность полученных результатов диссертационной работы основывается на применении физически обоснованных экспериментальных методик, современного высокоточного оборудования, САПР и других прикладных программ, применении общеизвестных методов численного и аналитического анализа, воспроизводимости полученных результатов и их качественным согласием с результатами электродинамического моделирования. Некоторые результаты диссертационного исследования получены в рамках государственного задания № 8.909.2014/К (номер в ТУСУРе: КНИ-4).

Апробация результатов работы. Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- 6-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики», Томск, 2015 г.;
- Международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи SIBCON – 2105, Красноярск, 2015 г.;

- Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления – 2015», Томск, 2015 г.

Публикации. Содержание диссертации отражено в 6 научных работах, из них 3 работы опубликованы в рекомендованных ВАК РФ изданиях и 1 в электронной реферативной базе Scopus.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы были использованы при сборке и настройке направленных ответвителей НО16А-2-20-12Р-12Р производства АО «НПФ «Микран» (г. Томск), которые применяются в скалярных анализаторах цепей Р2М-18. Также результаты исследований используются в учебном процессе кафедры сверхвысоко-частотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) ТУСУР для подготовки студентов по направлениям 11.03.01 и 11.04.01 – «Радиотехника».

Личный вклад автора состоит в разработке квазистатической модели симметричного направленного ответвителя на нерегулярных полосковых линиях с комбинированной связью с использованием метода декомпозиции; в проведении исследования влияния геометрических параметров и конструктивных особенностей на частотные характеристики НО методом электродинамического моделирования в САПР; в разработке методики настройки симметричного направленного ответвителя на нерегулярных полосковых линиях с комбинированной связью путём изменения размеров воздушной полости, образующейся в результате послойной сборки устройства. Часть результатов была получена совместно с соавторами научных публикаций. Автор принимал непосредственное участие в экспериментальных исследованиях.

Структура и объём диссертации.

Структурно диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, общих выводов и заключения, списка источников и трёх приложений. Работа изложена на 117 страницах машинописного текста и содержит 86 рисунков и 3 таблицы. Список использованных источников насчитывает 109 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; описаны методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации работы, структуре диссертации и внедрении результатов.

В **первом разделе** проведён обзор существующих типов направленных ответвителей, которые можно классифицировать по следующим признакам:

1. По направлению отбора мощности: противонаправленные, сонаправленные и транснаправленные ответвители.

2. По расположению связанных линий относительно продольного сечения: симметричные и несимметричные (рис. 1).

3. По типу связи: лицевая, боковая и комбинированная связи (рис. 2).

4. По силе связи: слабая и сильная.

Рассмотрены такие основные характеристики НО, как направленность:

$$D = 10 \lg \frac{P_3}{P_4}, \quad (1)$$

где в случае противонаправленного ответвителя P_3 – выходная мощность на ненагруженном порту; P_4 – мощность на нагруженном порту.

Переходное ослабление:

$$C = 10 \lg \frac{P_1}{P_3}, \quad (2)$$

где P_1 – мощность на входном порту НО.

Потери в основном канале:

$$L = 10 \lg \frac{P_1}{P_2}. \quad (3)$$

Отражение от входного порта:

$$RL = 10 \lg \frac{P_1^{nad}}{P_1^{omp}}, \quad (4)$$

где P_1^{nad} – мощность падающей волны; P_1^{omp} – мощность отражённой волны.

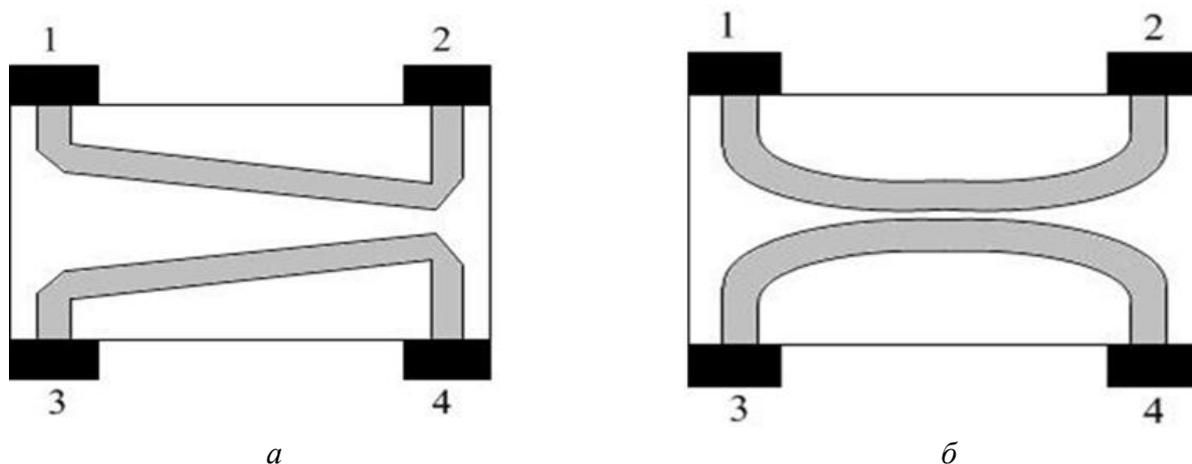


Рис. 1. Топология несимметричного (а) и симметричного (б) направленных ответвителей

Был проведён обзор математического моделирования СВЧ устройств, которые разделяют на аналитические, численные и комплексные. Представлен аппарат расчёта частотных характеристик направленных ответвителей, основанный на квазистатическом анализе методом конечных разностей с использо-

ванием методов декомпозиции и матричной алгебры. На основе проведённого анализа ставятся цель и задачи исследования.

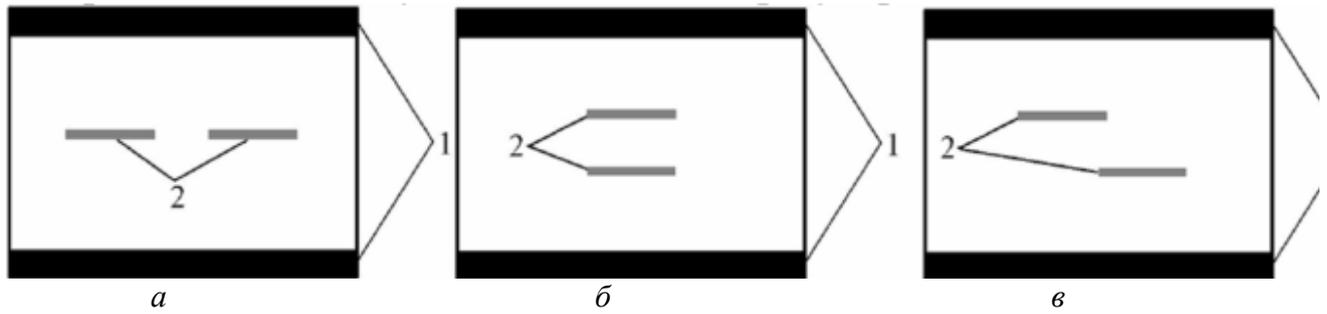


Рис. 2. Классификация НО по типу связи: *a* – боковая связь; *б* – лицевая связь, *в* – комбинированная связь; 1 – металлические стенки корпуса устройства, 2 – связанные линии

Второй раздел посвящён исследованию влияния геометрических параметров на частотные характеристики симметричных полосковых направленных ответвителей на нерегулярных линиях с комбинированной связью (рис. 3).

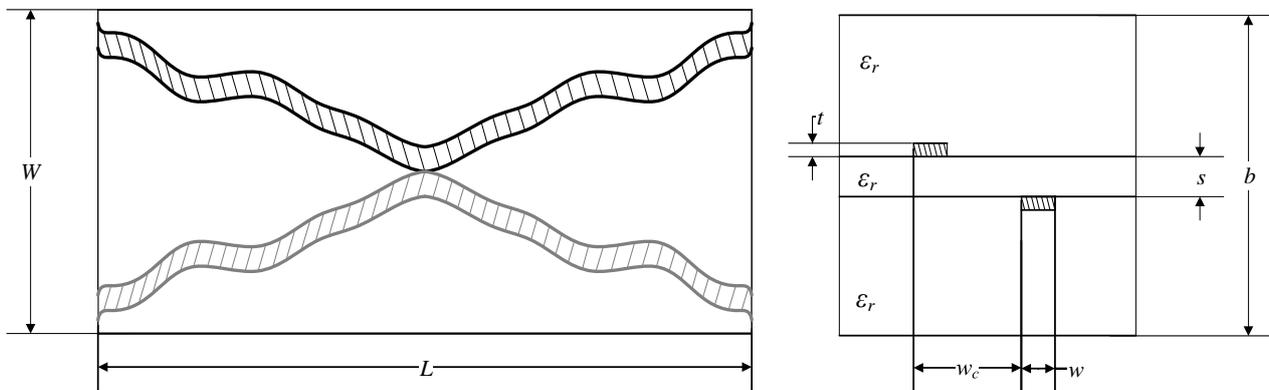


Рис. 3. Симметричные нерегулярные полосковые линии с комбинированной связью

Проведено электродинамическое моделирование ряда НО с изменением таких параметров, как высота b и ширина W камеры связи, толщина полосковых линий t , а также топология подводящих к камере связи линий (рис. 4).

Приведён алгоритм разработки направленного ответвителя, состоящий из трёх этапов: расчёта весовых коэффициентов аппроксимации коэффициента связи; аппроксимации зависимостей ширины полосковых линий w и расстояния между ними w_c от коэффициента связи; электро-

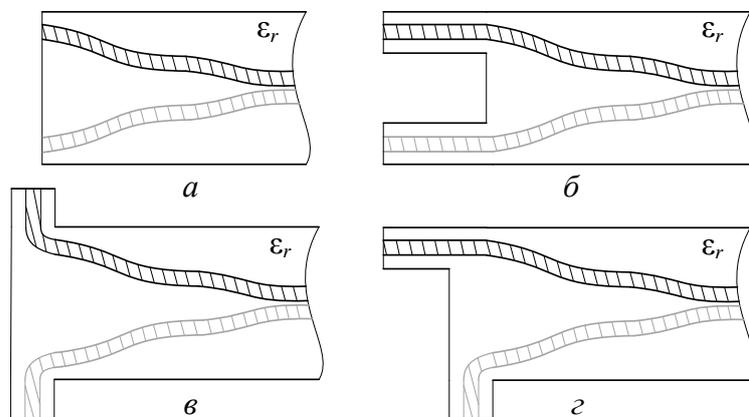


Рис. 4. Варианты топологий подводящих линий к камере связи: *a* – без подводящих линий; *б* – прямые линии; *в* – линии, плавно изогнутые под прямым углом; *г* – комбинация прямых и изогнутых линий

динамическое моделирование направленного ответвителя.

Результаты моделирования показали, что влияние топологии подводящих линий и ширины камеры связи в большей степени влияет только на модуль коэффициента отражения от портов устройства. При этом влияние высоты камеры связи и толщины проводников заключается, преимущественно, в ухудшении направленности НО.

На рисунках 5-6 представлены результаты электродинамического моделирования НО для модуля коэффициента ответвления в нагруженный порт устройства для разных высот камеры связи и толщин проводников. Как видно, эти параметры влияют на значение предельной частоты направленного ответвителя. Данная частота является граничной частотой НО и обычно определяется из соотношения:

$$f_{np} = \frac{300}{\sqrt{\epsilon_r} \left(2 \cdot w + \frac{\pi}{2} \cdot b \right)}, \quad (5)$$

где f_{np} в ГГц, b – толщина среднего слоя диэлектрика в мм, w – ширина полосковой линии в мм; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала. Данная формула является эмпирической и не учитывает такие параметры, как толщины полосковых линий t и среднего слоя диэлектрика s . Для их учёта была получена новая формула:

$$f_{np} = \frac{300}{\sqrt{\epsilon_r} \left(2 \cdot w + \frac{\pi}{2} \cdot \left(b - \frac{s-t}{2} \right) \right)}. \quad (6)$$

В таблице 1 представлено сравнение расчётных данных и результатов электродинамического моделирования для направленных ответвителей различной конфигурации до и после коррекции формулы расчёта предельной частоты устройства.

В целях экспериментального подтверждения влияния

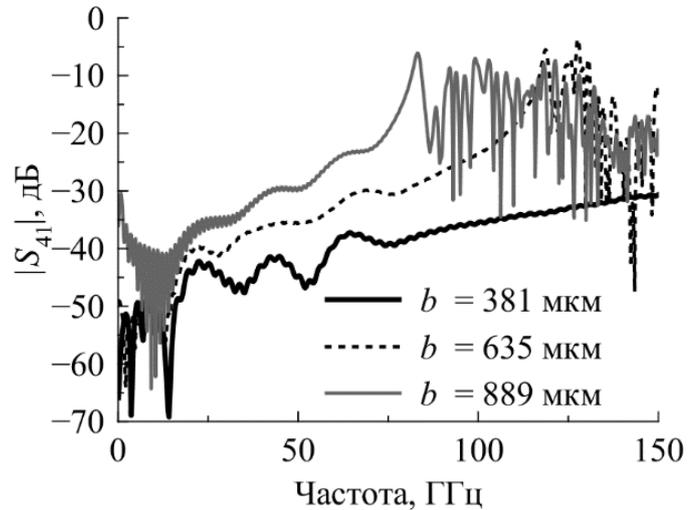


Рис. 5. Влияние высоты камеры связи на модуль коэффициента ответвления в нагруженный порт

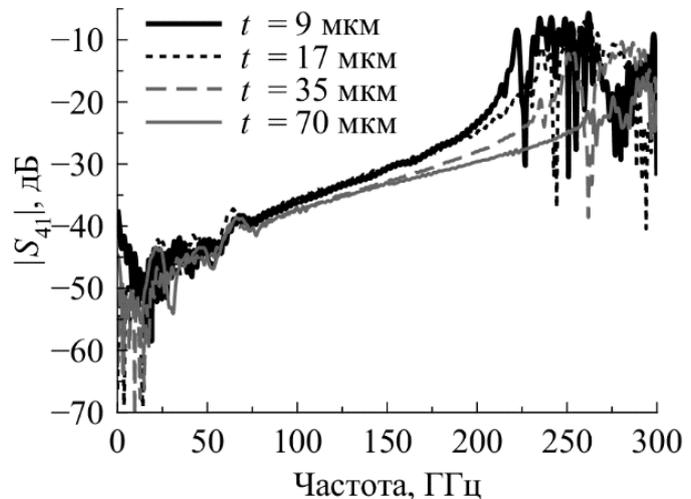


Рис. 6. Влияние толщины полосковых линий на модуль коэффициента ответвления в нагруженный порт

граничной частоты на частотные характеристики НО были разработаны и изготовлены направленные ответвители с различной высотой камеры связи (6 мм и 10 мм) диапазона 1-4 ГГц на основе материала Флан с диэлектрической проницаемостью 2,8 (рис. 7).

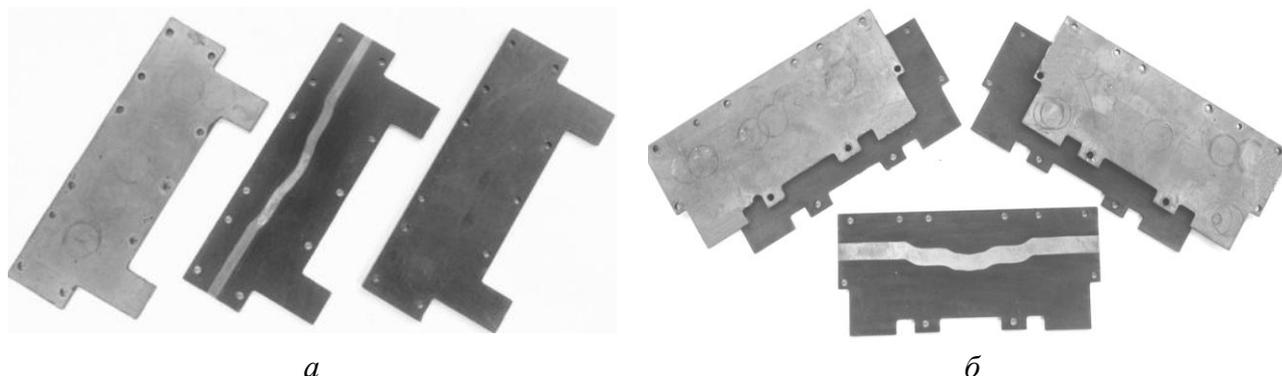


Рис. 7. Платы направленных ответвителей с высотой камеры связи 6 мм (а) и 10 мм (б)

Таблица 1. Сравнение предельных частот направленного ответвителя до и после коррекции

w , мм	s , мм	b , мм	t , мм	ε_r	$f_{\text{пр}}(\text{САПР})$, ГГц	Расчётная $f_{\text{пр}}$ до коррекции, ГГц (разница с моделью, %)	Расчётная $f_{\text{пр}}$ после коррекции, ГГц (разница с моделью, %)
0,210025	0,127	0,381	0,017	2,2	236,4	198,6 (19 %)	223,4 (6 %)
0,448990	0,127	0,635	0,017	2,2	118,7	106,7 (11,1 %)	113,5 (4,5 %)
0,660066	0,127	0,889	0,017	2,2	82,7	74,5 (11,2 %)	77,7 (6,4 %)
0,210025	0,127	0,381	0,035	2,2	254,6	213,3 (19,4 %)	246,3 (3,3 %)
0,087942	0,127	0,381	0,070	2,2	332,7	261,2 (27,4 %)	326,4 (2 %)
0,245028	0,127	0,381	0,009	2,2	220,7	185,8 (18,8 %)	204,6 (7,9 %)

Результаты экспериментального исследования показали минимальное влияние предельной частоты на модули коэффициентов отражения от портов и ответвления в ненагруженный порт НО. При этом модуль коэффициента ответвления в нагруженный порт увеличился, что привело к уменьшению направленности устройства (рис. 8).

В результате исследования также выяснилось, что предельная частота НО оказывает минимальное влияние на частотные характеристики направленного ответвителя, если верхняя граничная частота рабочего диапазона устройства

более чем в 3 раза меньше его предельной, т.е. если выполняется условие $3f_{\text{верх}} \leq f_{\text{пр}}$.

В **третьем разделе** приведены результаты экспериментального исследования влияния воздушной полости (рис. 9), образующейся в результате послойной сборки НО, на его частотные характеристики.

Результаты электродинамического моделирования в САПР (рис. 10) показали, что воздушная полость определённой ширины (*a*) может быть использована для улучшения направленности устройства.

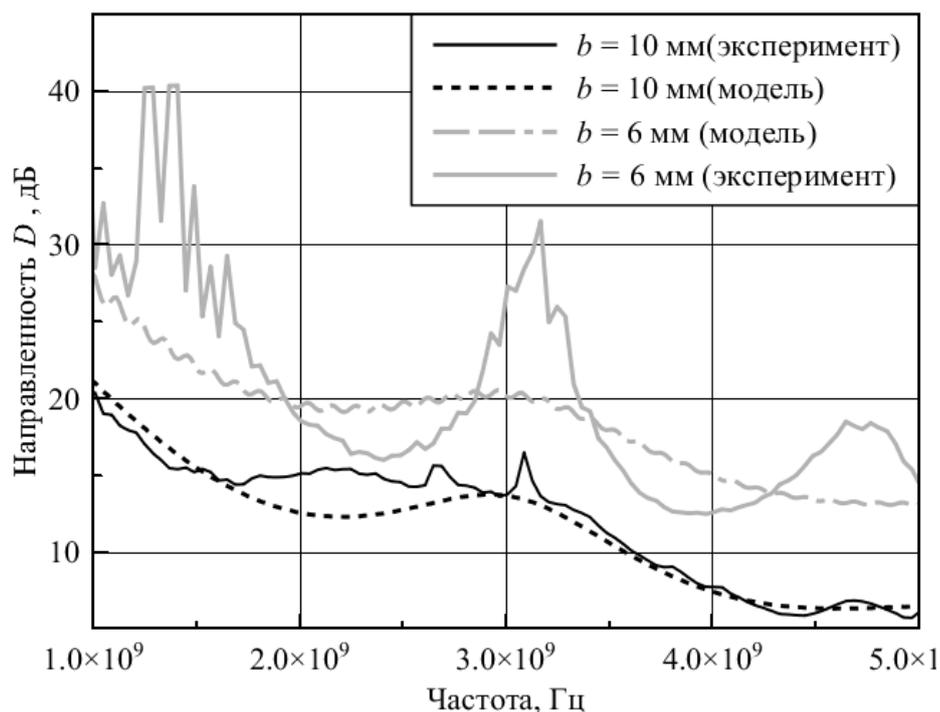


Рис. 8. Частотная характеристика направленности НО с высотой камеры связи 6 мм и 10 мм

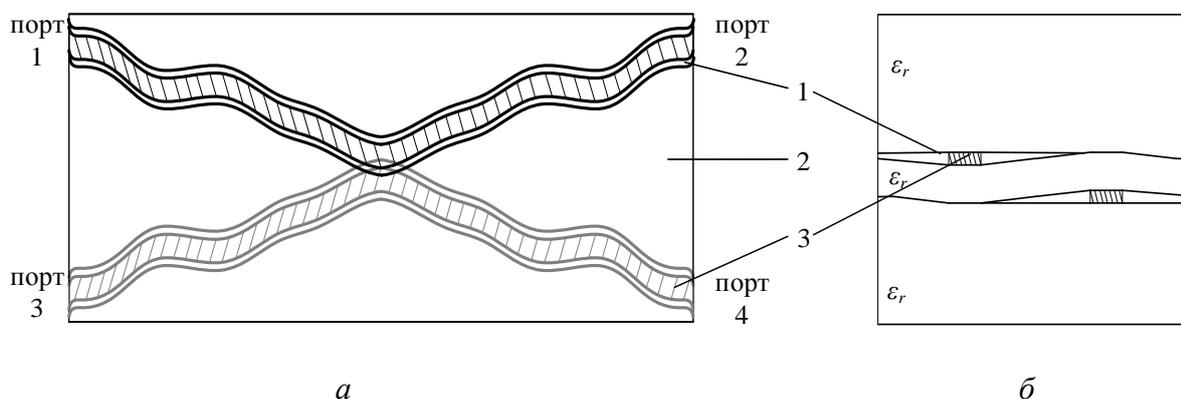


Рис. 9. Топология полосковых связанных линий с комбинированной связью, учитывающая воздушную полость между слоями диэлектрика:

вид сверху (*a*), поперечное сечение (*б*);

1 – воздушная полость, 2 – диэлектрик, 3 – линия передачи

Для экспериментального подтверждения возможности использования воздушной полости с целью улучшения характеристик использовались симметричные направленные ответвители производства АО «НПФ «Микран» диапазона 2–20 ГГц на основе диэлектрического материала *Rogers RT/Duroid 5880*. Регулировка воздушной полости обеспечивалась положением подстроечных эле-

ментов в виде тонких узких полосок диэлектрика, близких по своим свойствам к Rogers RT/Duroid 5880 (рис. 11).

Величина воздушной полости слабо влияет на такие характеристики как модуль коэффициента отражения от портов, модуль ответвления в ненагруженный порт и модуль коэффициента передачи в основном канале. Модуль коэффициента ответвления в нагруженный порт, а значит и направленность устройства имеет значительные отличия в зависимости от используемого материала (таблица 2).

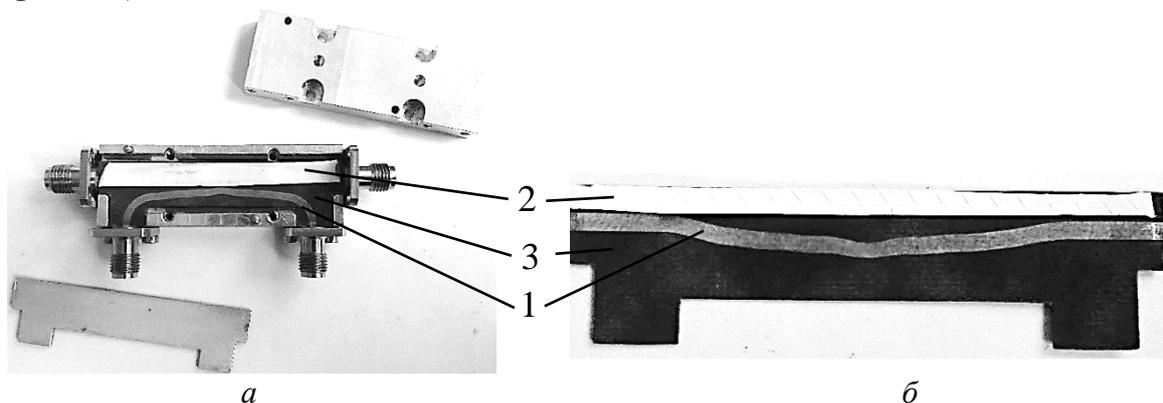


Рис. 11. Расположение первого (а) и второго (б) подстроечных элементов на среднем слое диэлектрика (вид сверху): 1 – полосковые линии; 2 – подстроечный элемент; 3 – диэлектрик

Результаты экспериментальных измерений направленных ответвителей с одним (рис. 12) и двумя (рис. 13) подстроечными элементами показали, что наилучшим материалом для коррекции частотных характеристик НО является фторопластовая лента с толщиной 110 мкм и относительной диэлектрической проницаемостью 2.

Кроме того, было проведено экспериментальное исследование влияние расстояния a от полосковой ли-

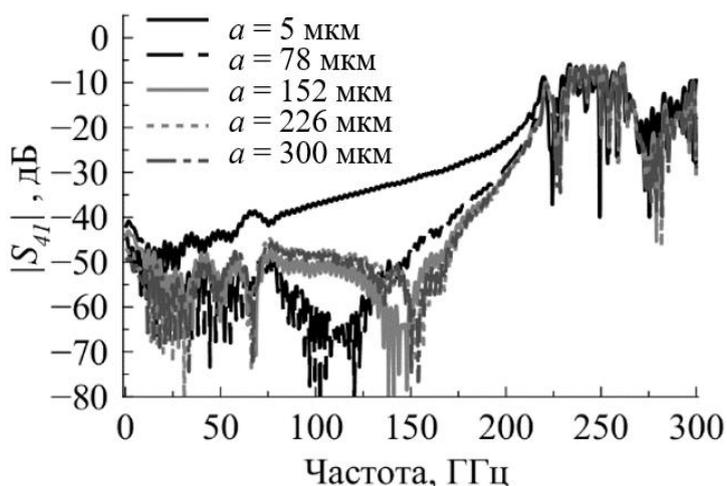


Рис. 10. Модуль коэффициента ответвления в нагруженный порт НО при различной ширине воздушной полости

Таблица 2. Перечень исследуемых материалов и их параметры

№ п.п.	Материал	Диэлектрическая проницаемость	Толщина, мкм
1	Полипропилен	2,0	300
2	Полистирол	2,7	200
3	Полиэтилен	2,0	30
4	Поливинилхлорид	2,2	120
5	Поливинилхлорид	2,4	100
6	Фторопласт	2,0	110
7	Фторопласт	2,0	200
8	Воздух	1,0	-

нии до подстроечного элемента на частотные характеристики НО (рис. 14). Результаты экспериментальных измерений (рис. 15) показали, что при определённом размере этого параметра наблюдается значительное улучшение направленности устройства.

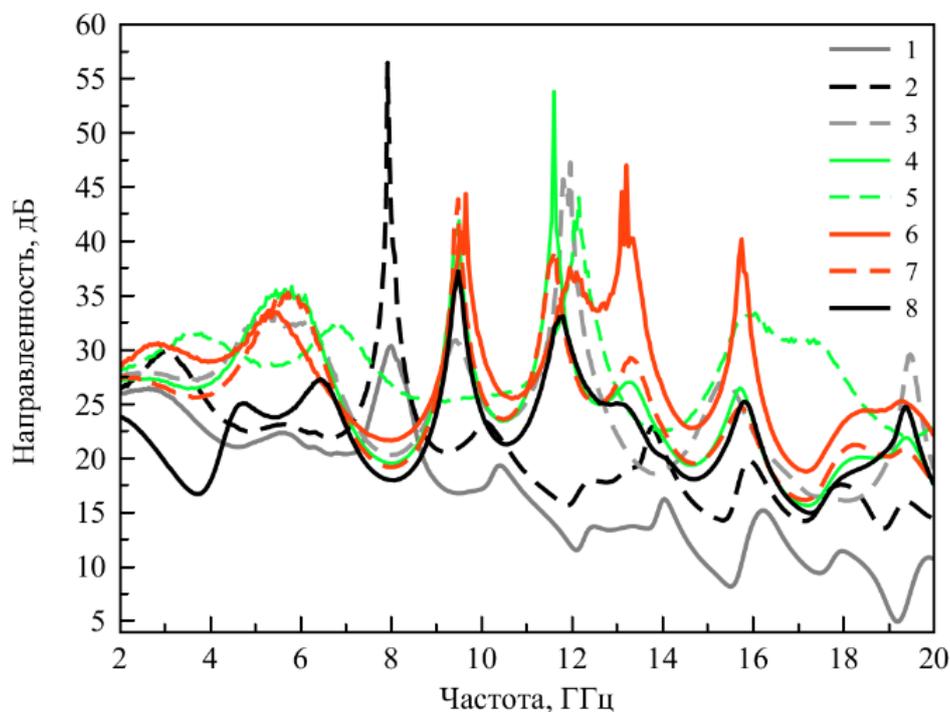


Рис. 12. Направленность НО с одним подстроечным элементом (нумерация зависимостей совпадает с приведённой в таблице 2)

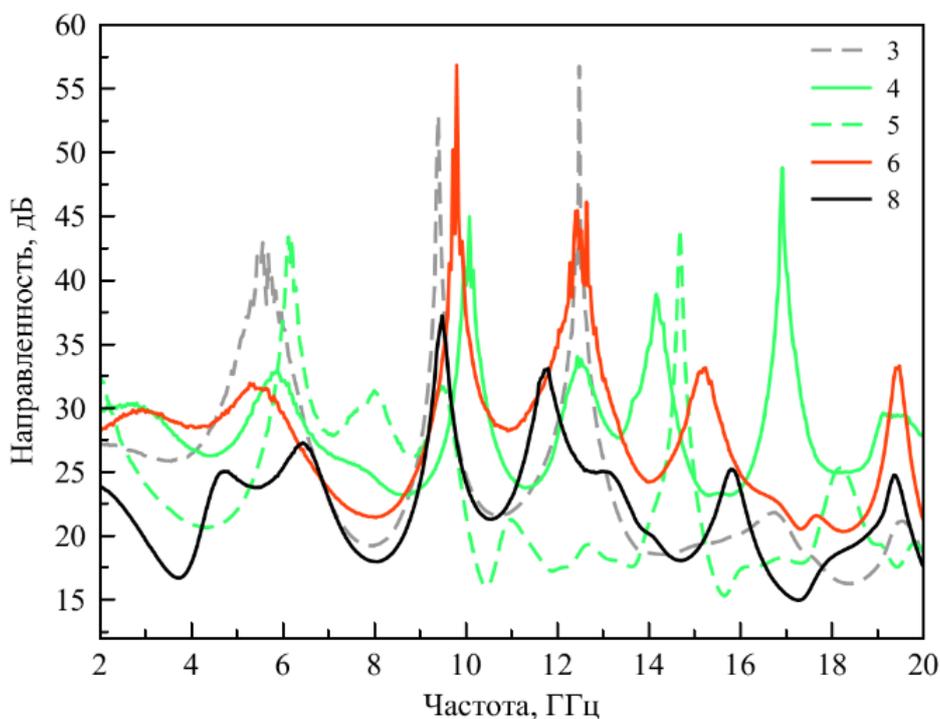


Рис. 13. Направленность НО двумя подстроечными элементами (нумерация зависимостей совпадает с приведённой в таблице 2)

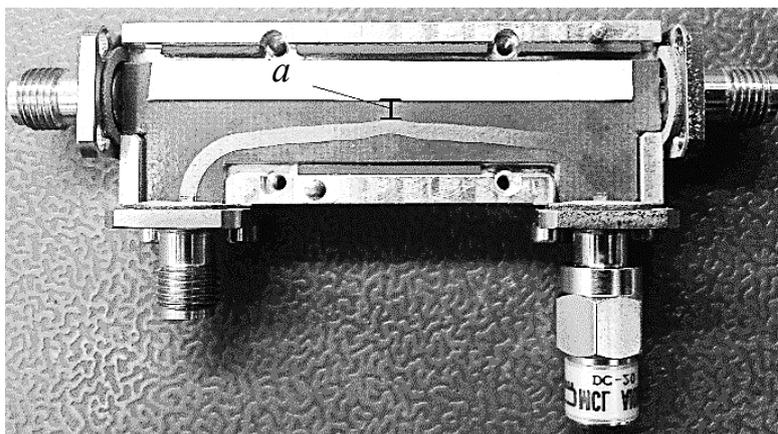


Рис. 14. Топология платы направленного ответвителя с фторопластовой лентой

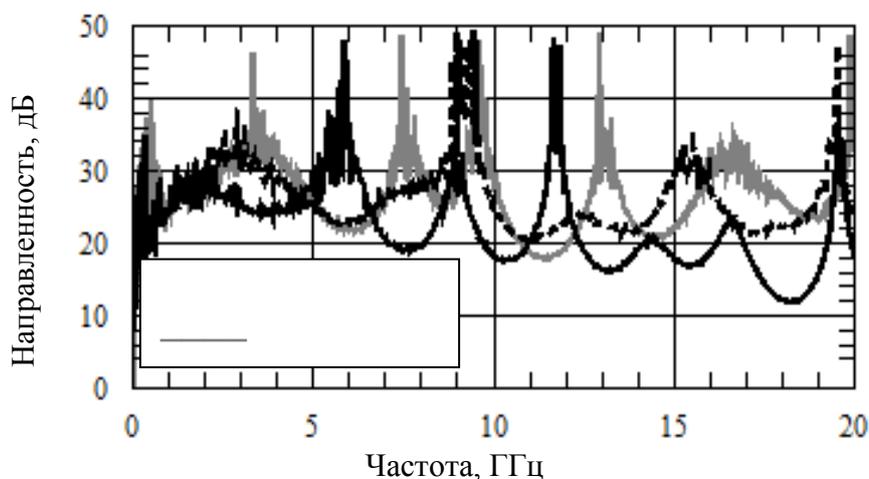


Рис. 15. Частотная характеристика направленности НО при различных размерах воздушной полости

В четвёртом разделе представлена квазистатическая модель направленного ответвителя, основанная на методе декомпозиции с использованием матричного алгоритма, учитывающая влияние предельной частоты при разработке устройства.

Суть метода сводится к разбиению области связи НО на n (рисунок 15) элементов конечной длины, каждый из

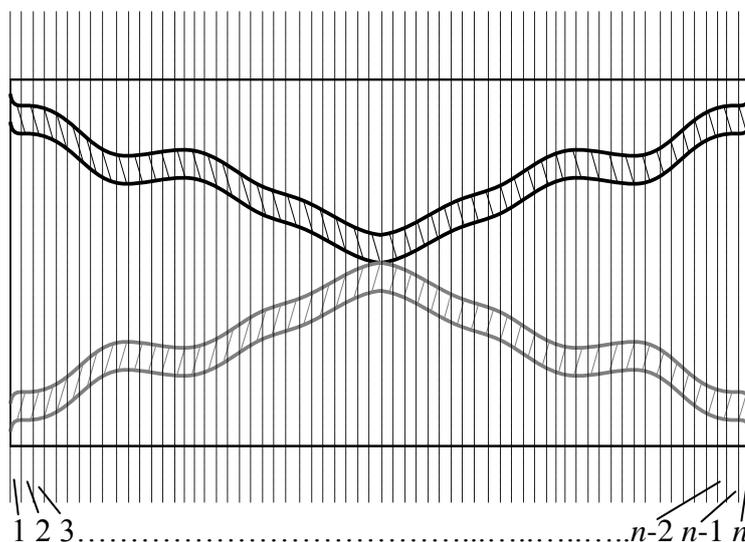


Рис. 16. Разбиение направленного ответвителя на отрезки равной длины

которых имеет свои волновое сопротивление и электрическую длину. После чего находятся $ABCD$ матрицы каждого элемента, которые перемножаются для определения общей матрицы, описывающей НО. Полученная матрица далее

переводится в матрицу рассеяния с целью определения частотных характеристик устройства.

Учёт предельной частоты заключается в аппроксимации её влияния экспоненциальной зависимостью в той области, где заданная функция экспоненты выше исходных характеристик, рассчитанных без учёта предельной частоты. Сравнение результатов электродинамического моделирования в САПР и квазистатической модели представлено на рисунках 17-20.

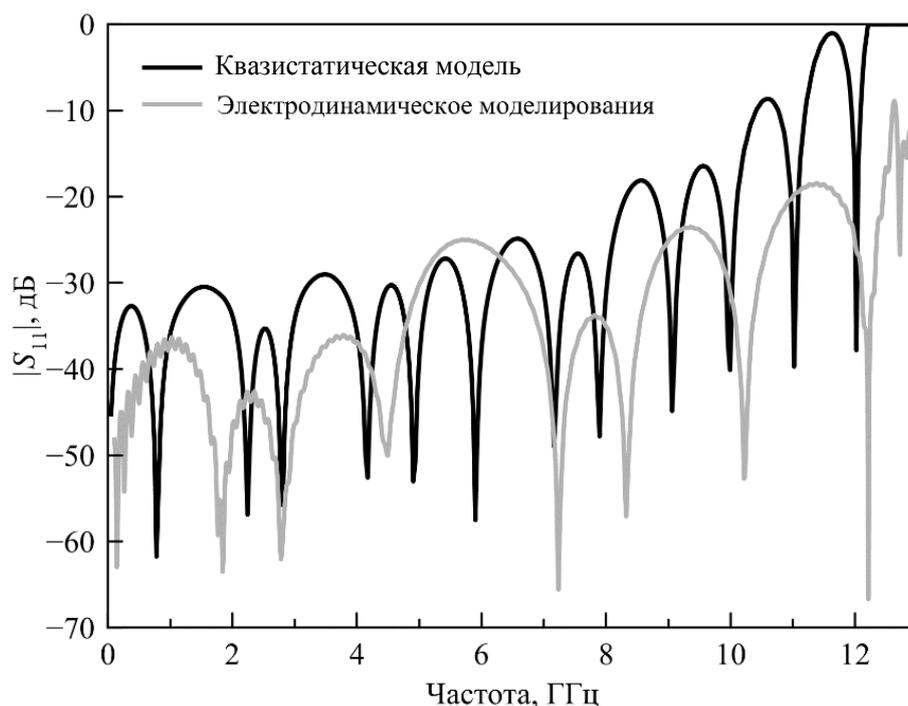


Рис. 17. Модуль коэффициента отражения от входного порта направленного ответвителя с высотой камеры связи 6 мм

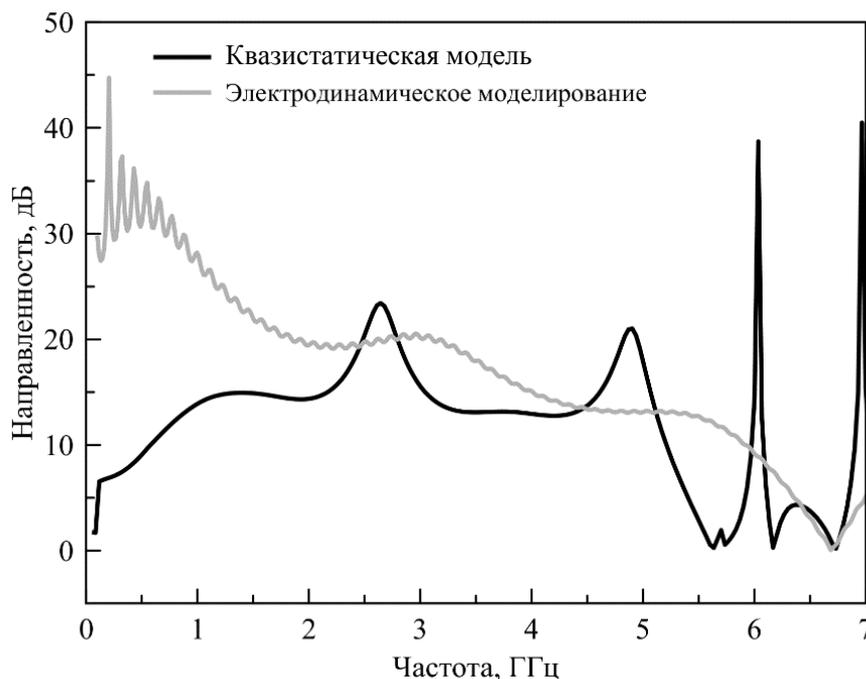


Рис. 18. Направленность ответвителя с высотой камеры связи 6 мм

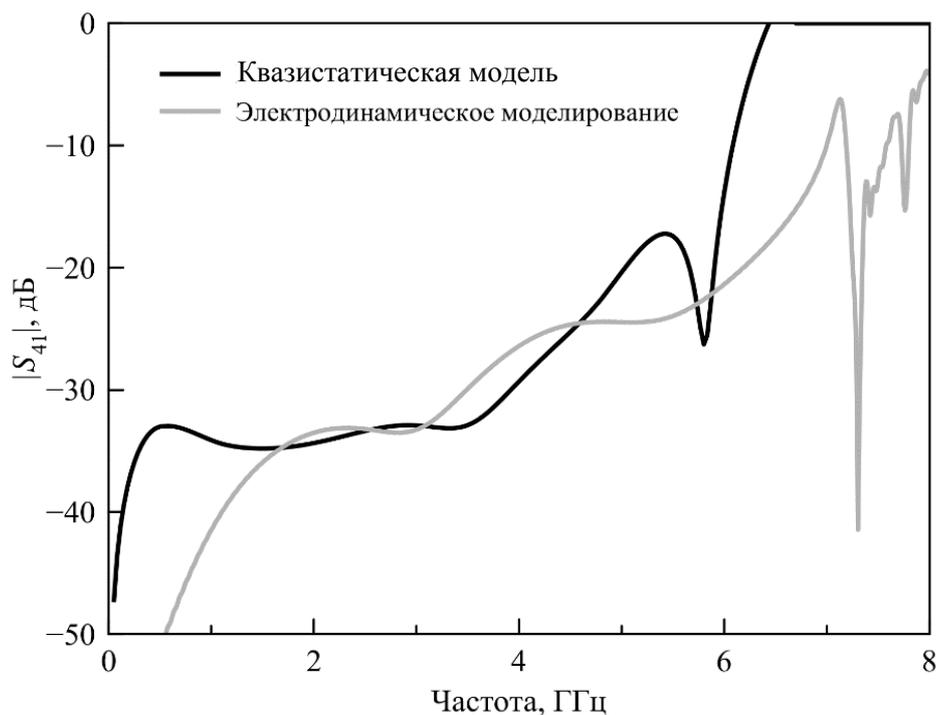


Рис. 19. Модуль коэффициента ответвления в нагруженный порт направленного ответвителя с высотой камеры связи 6 мм

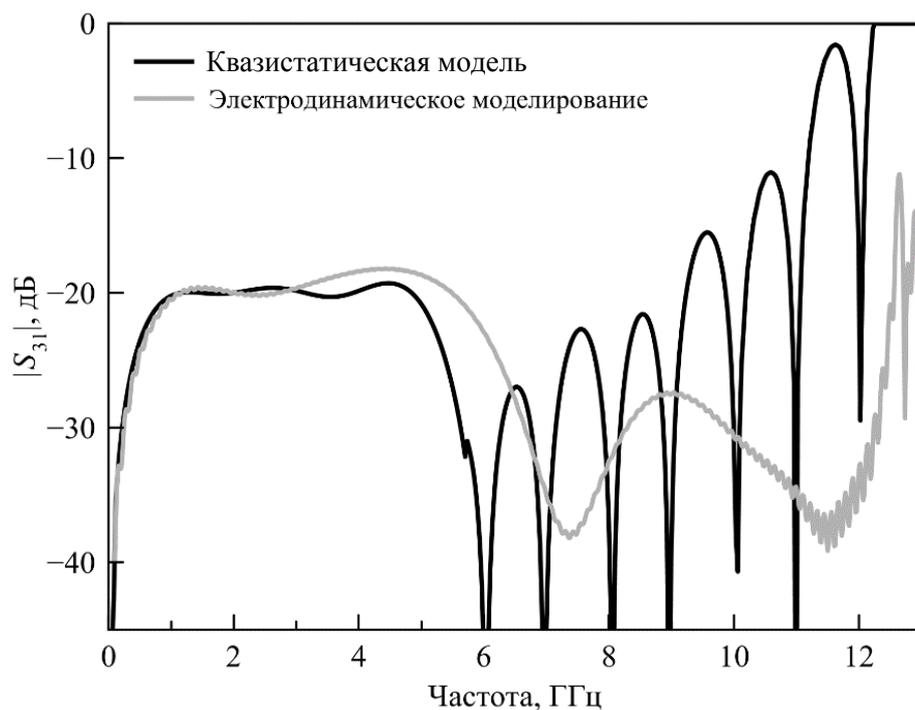


Рис. 20. Модуль коэффициента ответвления в ненагруженный порт направленного ответвителя с высотой камеры связи 6 мм

Сравнение результатов показало, что полученная модель на основе квазистатического подхода на основе метода конечных разностей с использованием методов декомпозиции и матричной алгебры может быть использована с целью получения предварительных характеристик и последующего их уточнения посредством электродинамического моделирования разрабатываемого направленного ответвителя.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведено исследование влияния геометрических параметров на частотные характеристики симметричного направленного ответвителя на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной слабой связью.

2. Экспериментально подтверждено влияние предельной частоты на направленность НО.

3. Установлен критерий, позволяющий минимизировать влияние предельной частоты на частотные характеристики НО.

4. Экспериментально подтверждена возможность использования воздушной полости, образующейся в результате послойной сборки НО, для улучшения направленности устройства, путём регулировки ширины этой полости посредством узких тонких полосок диэлектрика, расположенных вдоль связанных линий.

5. Разработана квазистатическая модель симметричного направленного ответвителя на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной слабой связью, учитывающая влияние предельной частоты на его частотные характеристики.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. К вопросу о повышении направленности широкополосных направленных ответвителей / Г.Г. Гошин, **А.Ю. Попков**, А.В. Фатеев, С.А. Подлиннов // Известия вузов. Физика. Томск, ТГУ. – 2015. – Т. 58, №8/2. – С.104–108.

2. Анализ модели направленного ответвителя на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной связью / **А.Ю. Попков**, Г.Г. Гошин, С.А. Подлиннов, А.В. Фатеев // Доклады ТУСУРа. – 2015. – №4(38). – С.5-11.

3. Исследование способов увеличения направленности симметричных направленных ответвителей диапазона 2 - 20 ГГц / Г.Г. Гошин, А.В. Зорин, **А.Ю. Попков** и др. // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т.19, №3. – С. 5–7.

4. *Podlinnov S.A.* Design of the directional coupler based on offset coupled striplines / S.A. Podlinnov, **A.Y. Popkov**, A.V. Fateev // Proc. of the International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2015. – P.1–5.

5. **Попков А.Ю.** Исследование влияния воздушного заполнения вдоль связанных полосковых линий на частотные характеристики направленного ответвителя / А.Ю. Попков, С.А. Подлиннов, А.В. Фатеев // XI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления»: Материалы докладов в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2015. – С. 150–153.

6. **Попков А.Ю.** Исследование влияния геометрических параметров широкополосного направленного ответвителя на его характеристики / А.Ю. Попков, Г.Г. Гошин // XI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления»: Материалы докладов в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2015. – С. 153–159.