

На правах рукописи

Капитанова Полина Вячеславовна

МИНИАТЮРНЫЕ СВЧ УСТРОЙСТВА С РАСШИРЕННЫМИ  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
МНОГОСЛОЙНОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Специальность: 05.12.07 – Антенны и СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина)

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук, профессор Вендик Ирина Борисовна

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, Головков Александр Алексеевич  
кандидат технических наук, Плескачев Владимир Владимирович

**Ведущая организация:**       ОАО Холдинговая компания «Ленинец»

Защита состоится «    »        20   г. в        часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «    »        20   г.

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций

С.А. Баруздин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Современные приемопередающие модули, применяемые в радиолокации и радионавигации, космической технике, мобильной связи, содержат пассивные устройства сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, такие как фильтры, направленные ответвители, делители-сумматоры мощности и др. В связи с быстрым развитием и постоянным усовершенствованием телекоммуникационных систем к СВЧ устройствам в их составе применяются жесткие требования: малые размеры, низкая себестоимость и высокая степень интеграции с использованием современных интегральных технологий.

Для поддержки множества различных стандартов передачи данных физического уровня необходимы миниатюрные пассивные СВЧ устройства с расширенными функциональными возможностями или принципиально новыми характеристиками. Актуален анализ и разработка многополосных, перестраиваемых СВЧ устройств с произвольными центральными частотами для эффективной работы в нескольких некротных частотных диапазонах.

Распространение электромагнитной волны вдоль наиболее широко используемых на практике длинных линий характеризуется положительной дисперсией. Фазовая и групповая скорости в таких длинных линиях сонаправлены. В дальнейшем будем их называть линиями с положительной дисперсией (ЛПД). В последнее время возрос интерес к применению длинных линий с отрицательной дисперсией (ЛОД) для разработки СВЧ устройств. Фазовая и групповая скорости в отрезке ЛОД имеют противоположное направление. Отрезки ЛОД можно выполнять как искусственные длинные линии на сосредоточенных элементах. В данной работе предлагается использовать комбинацию искусственных отрезков ЛПД и ЛОД вместо использования исключительно распределенных ЛПД в составе СВЧ устройств. Это позволит управлять законом дисперсии и открывает новые возможности для обеспечения уникальных свойств пассивных СВЧ устройств. В работе исследуются дисперсионные характеристики отрезков искусственных ЛОД. Представлены уникальные топологии и результаты экспериментального исследования многополосных перестраиваемых СВЧ устройств, выполненных на основе отрезков ЛОД.

Приоритетной целью диссертационной работы является разработка СВЧ устройств по современным многослойным интегральным технологиям, обеспечивающих низкую себестоимость, компактность и простоту производства устройств.

**Цель диссертационной работы** – разработка миниатюрных многослойных СВЧ устройств с расширенными функциональными возможностями или принципиально новыми свойствами для применения их в современных системах телекоммуникаций.

Цель диссертационной работы была достигнута решением следующих задач:

- 1) Исследование частотных характеристик отрезков искусственных ЛОД.

- 2) Разработка новых методов проектирования многополосных СВЧ устройств с учётом уникальных свойств отрезков искусственных ЛОД, используемых для их построения.
- 3) Моделирование характеристик миниатюрных многослойных и перестраиваемых направленных ответвителей и СВЧ фильтров, выполненных на основе комбинации отрезков искусственных ЛПД и ЛОД по многослойным интегральным технологиям.
- 4) Экспериментальная верификация характеристик разработанных устройств.

**Научная новизна работы:**

- 1) Предложено использовать многослойную сэндвич технологию для разработки миниатюрных СВЧ устройств.
- 2) Предложен метод проектирования перестраиваемого гибридного кольца на сосредоточенных элементах и метод оценки ширины полосы перестройки его характеристик.
- 3) Предложено включить отрезок ЛОД в центр разомкнутого полуволнового резонатора для создания многомодовой структуры с произвольным распределением резонансов.
- 4) Предложен метод создания многомодового резонатора и двухполосного СВЧ фильтра на его основе с произвольными резонансными частотами двух соседних полос пропускания и возможностью подавления паразитных полос пропускания.
- 5) Показана возможность совместной или индивидуальной частотной перестройки полос пропускания двухполосного полосно-пропускающего СВЧ фильтра.

**Основные методы исследования:**

- а) Теоретические: методы теории цепей, компьютерное моделирование.
- б) Экспериментальные.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- 1) Относительный диапазон перестройки гибридного кольца на отрезках искусственных ЛПД и ЛОД, определенный отношением верхней и нижней центральных частот полос пропускания, ограничен допустимым уровнем рассогласования на крайних центральных частотах диапазона перестройки и равен КСВН.
- 2) Использование комбинации отрезков ЛПД и ЛОД вместо использования исключительно отрезков ЛПД в плечах направленных ответвителей приводит к изменению закона дисперсии вдоль плеч и позволяет разработать двухполосные устройства с произвольными центральными частотами полос пропускания.
- 3) При изменении параметров управляющих элементов в составе отрезков искусственных ЛПД и ЛОД перестраиваемого двухполосного фильтра можно обеспечить различные варианты перестройки верхней и нижней полос пропускания. Изменение параметров управляющих элементов в составе отрезка искусственной

ЛОД, включенного в центр разомкнутого полуволнового резонатора, приводит к перестройке только нижней полосы пропускания, при этом положение верхней полосы пропускания остается постоянным.

**Практическая значимость результатов работы:**

- 1) Предложенные в работе методы проектирования могут быть использованы для разработки многополосных СВЧ устройств систем сотовой и спутниковой радиосвязи, локальных беспроводных сетей Bluetooth и WLAN и Интернет по технологии Wi-Fi и Wi-MAX.
- 2) Многослойная сэндвич технология может эффективно применяться для разработки миниатюрных устройств в нижней части СВЧ диапазона (до 5 ГГц).
- 3) Использование управляющих элементов в составе отрезков ЛПД и/или ЛОД может быть использовано для разработки перестраиваемых устройств, рабочие полосы которых перестраиваются индивидуально или совместно.

**Апробация работы:**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

На международных конференциях: 11<sup>th</sup>, 12<sup>th</sup>, 13<sup>th</sup>, 15<sup>th</sup>, 16<sup>th</sup> International Student Seminar «Microwave Application of Novel Physical Phenomena» (2004, 2005, St. Petersburg, Russia; 2006, Rovaniemi, Finland; 2008, St. Petersburg, Russia; 2009, Oulu, Finland); 15 и 16 международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (2005 г., 2006г., Севастополь, Украина); 16<sup>th</sup> International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (2006, Krakow, Poland); Microwave Materials And Their Applications Conference (2006, Oulu, Finland); 37<sup>th</sup>, 38<sup>th</sup>, 39<sup>th</sup> European Microwave Conference (2007, Munich, Germany; 2008, Amsterdam, The Netherlands; 2009, Rome, Italy); International IEEE Conference EUROCON (2009, St. Petersburg, Russia); 3<sup>rd</sup> International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (2009, London, UK);

На семинарах: профессорско-преподавательского состава СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» 2007, 2008, 2009, 2010г, научно-технические семинары «Современные проблемы техники и электроники СВЧ» 2008, 2009, 2010г.

Часть работы проводилась в рамках международного проекта «Network of Excellence METAMORPHOSE (Metamaterials Organised for Radio Frequency and Photonics Superlattice Engineering)»/ 6-th Framework Program of the European Commission - Project No. 500252, 2004 – 2008 гг.

Изготовление тестовых образцов устройств и их экспериментальное исследование было возможно благодаря стипендии 14-го всероссийского открытого конкурса на стипендии президента Российской Федерации для обучения за рубежом в 2007-2008 гг. (приказ №816 от 10.05.2007)

**Публикации:** Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 41 научной работе, из них по теме диссертации 41, в том числе: 6 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендо-

ванных в действующем перечне ВАК; 1 публикация в других журналах; 1 глава книги, 33 публикации в материалах международных и всероссийских научно-технических конференциях. Доклады обсуждались и получили одобрение на 20 международных и всероссийских научно-технических конференциях

**Структура и объем диссертации:** Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами, заключения. Работа изложена на 130 страницах машинописного текста, включает 76 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 105 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертационной работы посвящена обзору литературы по теме работы.

В главе рассмотрены традиционные длинные линии, которые характеризуются положительной дисперсией. Отсюда возникает термин длинные линии с положительной дисперсией (ЛПД). Отрезки ЛПД могут быть выполнены как длинные линии с распределенными параметрами, так и искусственные длинные линии на сосредоточенных элементах, состоящие из последовательно включенных индуктивностей и параллельно включенных емкостей.

Следуя принципу дуальности, рассмотрена длинная линия с последовательно включенными емкостями и параллельно включенными индуктивностями. Показано, что распространение электромагнитной волны вдоль такой линии подчиняется левой тройке векторов  $\vec{E}, \vec{H}, \vec{P}$ , фазовая и групповая скорости имеют противоположное направление. Закон дисперсии в линии отрицателен и имеет обратную зависимость от частоты. Принято называть такие длинные линии линиями с отрицательной дисперсией (ЛОД). Отрезки ЛОД могут быть исполнены только в виде искусственных длинных линий. Удобно использовать элементарные Т или П – ячейки на сосредоточенных элементах. Найдены аналитические выражения, устанавливающие на центральной частоте связь между номиналами сосредоточенных элементов Т и П-ячеек отрезков искусственных ЛПД и ЛОД и волновым сопротивлением и электрической длиной их распределенных аналогов.

Вторая глава посвящена разработке миниатюрных направленных ответвителей (НО) и делителей мощности СВЧ для систем беспроводной связи Bluetooth и WLAN (2,4-2,5 ГГц) с использованием современных многослойных интегральных технологий и экспериментальному исследованию характеристик тестовых образцов устройств.

В нижней части СВЧ диапазона размеры НО, традиционно исполняемых на отрезках ЛПД, достаточно велики, что затрудняет их использование в миниатюрных приемопередающих модулях систем беспроводной связи. Значи-

тельного уменьшения размеров НО можно достичь путем эквивалентной замены распределенных отрезков ЛПД в плечах устройства отрезками искусственных ЛПД или ЛОД на сосредоточенных элементах и исполнением схем по многослойным интегральным технологиям.

В главе представлены эквивалентные схемы квадратурных и дифференциальных НО на сосредоточенных элементах. Эквивалентная схема квадратурного НО (рис. 1) получена после замены шлейфов в горизонтальных плечах шлейфного НО отрезками искусственных ЛПД в виде сосредоточенных П-ячеек, а шлейфов в вертикальных плечах устройства - отрезками искусственных ЛОД в виде емкостных П-ячеек инверторов проводимости. Отрицательные емкости в составе инверторов на входах устройства суммировались с положительными емкостями П-ячеек и представлены емкостями  $C_2$ . В случае дифференциального делителя мощности СВЧ на основе гибридного кольца длинная линия электрической длиной  $270^\circ$  в составе устройства может быть представлена как отрезок ЛОД с электрической длиной  $-90^\circ$ . На рис. 2 показана эквивалентная схема гибридного кольца, полученная после замены отрезков ЛПД и ЛОД эквивалентными П-ячейками на сосредоточенных элементах. Параллельные контуры на входах 1 и 4 настроены в резонанс на центральной частоте  $f_0$  и были исключены из схемы с полным сохранением поведения последней на частоте  $f_0$ . Параллельные емкости на входах 2 и 3 устройства суммировались и представлены емкостями  $C_2$ .

Для практической реализации схем НО на сосредоточенных элементах

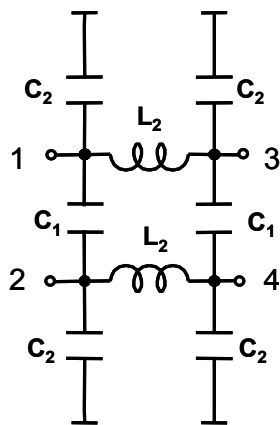


Рис. 1.

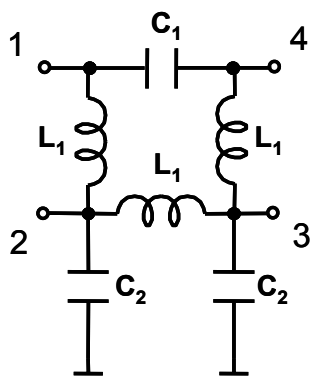


Рис. 2.

удобно использовать многослойные интегральные технологии. Рассмотрены две интегральные технологии: многослойная технология на основе керамики с низкой температурой обжига (КНТО) и многослойная технология изготовления керамических плат с многоуровневой коммутацией, так называемая сэндвич технология. КНТО технология хорошо известна и давно применяется для разработки СВЧ устройств. В отличие от нее, сэндвич технология ранее применялась на низких частотах (до 100 МГц) для многоуровневой коммутации плат и впервые была использована для разработки устройств СВЧ диапазона. По многослойным технологиям емкостные элементы схем выполнялись как плоско-параллельные конденсаторы, индуктивные элементы как витковые индуктивности, обкладки и витки которых располагались в разных слоях структуры.

По схеме рис. 1 были разработаны и экспериментально исследованы 3 дБ, 4,5 дБ и 10 дБ НО. Многослойная реализация 10 дБ НО по сэндвич технологии показана на рис. 3. Размер интегральной схемы составил  $6,5 \text{ мм} \times 7,2 \text{ мм} \times 1,1 \text{ мм}$ , что

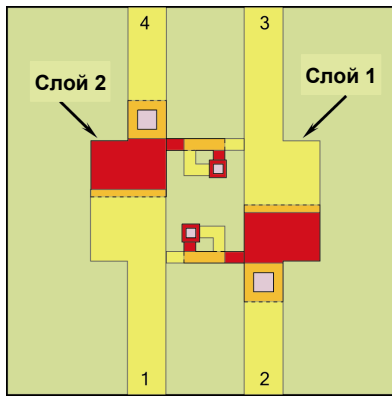


Рис. 3

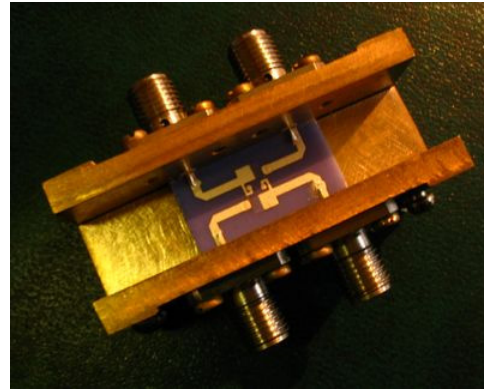


Рис. 4

соответствует линейным размерам в длинах волн:  $0,15 \lambda_g \times 0,16 \lambda_g \times 0,01 \lambda_g$ . Фотография тестового образца устройства приведена на рис. 4.

Измеренные АЧХ и ФЧХ 10 дБ НО показаны на Рис. 5 в сравнении с результатами схемотехнического моделирования. В рабочей полосе частот 2,4-2,5 ГГц измеренные коэффициент отражения и развязка лучше -20 дБ. Неравномерность деления мощности между выходными плечами не хуже  $\pm 1,5$  дБ. Неравномерность разности фаз выходных сигналов составляет  $\pm 1,5^\circ$ . Измеренные характеристики НО повторяют результаты схемотехнического моделирования, что подтверждает возможность широкого применения сэндвич технологии на СВЧ.

Далее рассмотрены многослойные реализации миниатюрных делителей мощности СВЧ на основе гибридного кольца (рис. 2), разработанных по сэндвич и КНТО технологиям. Многослойная реализация и фотография тестового образца сверхминиатюрного гибридного кольца, выполненного по КНТО технологии, представлены на рис. 6 и рис. 7. Размеры разработанного устройства составили  $2,4 \text{ мм} \times 2,4 \text{ мм} \times 1,3 \text{ мм}$ , что соответствует линейным размерам в длинах волн:  $0,055 \lambda_g \times 0,055 \lambda_g \times 0,03 \lambda_g$ . Таких компактных размеров удалось достичь благодаря использованию пасты с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_r=30$ ) между пластинами плоскопараллельных конденсаторов, что позволило значительно уменьшить занимаемую ими площадь. Измеренные характеристики устройства сравниваются с характеристиками, полученными в ходе электродинамического моделирования структуры с учетом потерь на рис. 8. В рабочей полосе частот устройства 2,4-2,5 ГГц измеренные коэффициент отражения и развязка лучше -18 дБ. На центральной частоте 2,45 ГГц устройство обеспечивает равное деление мощности между выходными плечами. Неравномерность деления мощности составляет  $\pm 0,2$  дБ. Измерен-

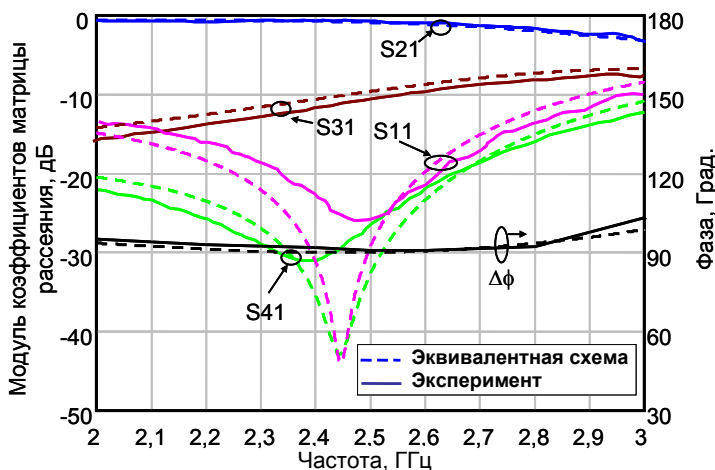


Рис. 5

ного устройства с учетом потерь на рис. 8. В рабочей полосе частот устройства 2,4-2,5 ГГц измеренные коэффициент отражения и развязка лучше -18 дБ. На центральной частоте 2,45 ГГц устройство обеспечивает равное деление мощности между выходными плечами. Неравномерность деления мощности составляет  $\pm 0,2$  дБ. Измерен-



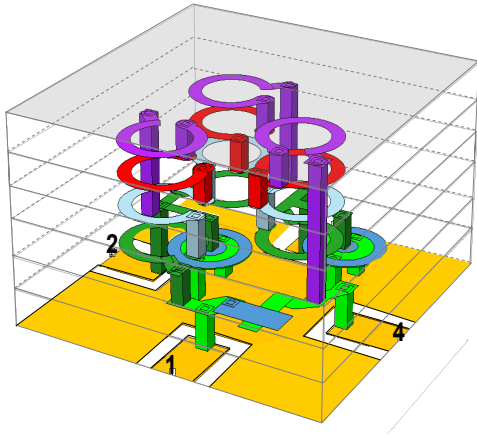


Рис. 6

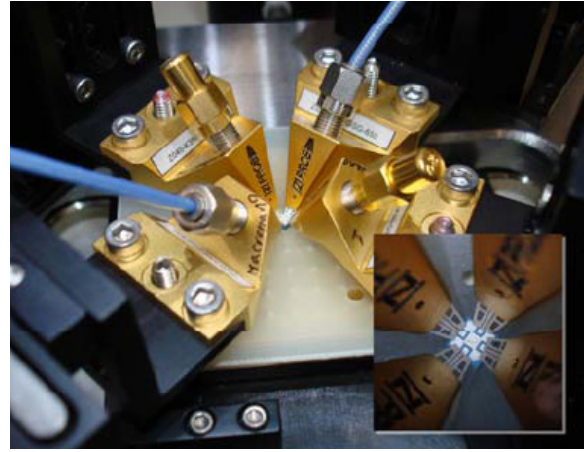


Рис. 7

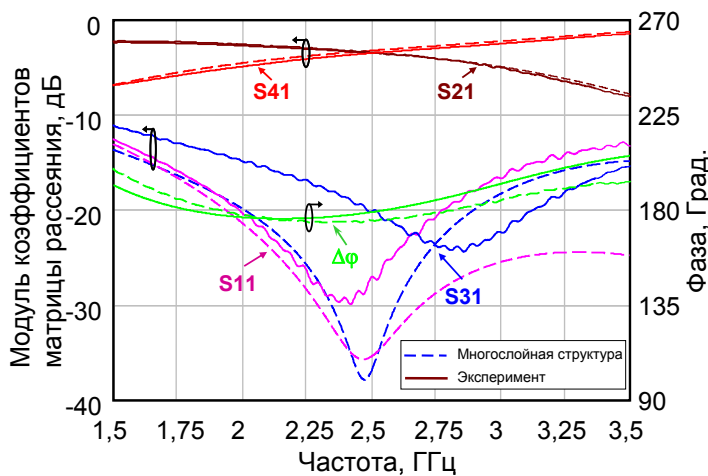


Рис. 8

Исследованы перестраиваемые искусственные отрезки ЛПД и ЛОД, в которых перестраиваются только емкостные элементы, а индуктивные остаются постоянными. Аналитически показано, что относительный диапазон перестройки гибридного кольца на отрезках искусственных ЛПД и ЛОД, определенный отношением верхней и нижней центральных частот полос пропускания, ограничен допустимым уровнем рассогласования на крайних центральных частотах диапазона перестройки и равен КСВН:

$$\frac{f_{02}}{f_{01}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} = KСВН, \quad (1)$$

где  $f_{01}$  и  $f_{02}$  – нижняя и верхняя центральные частоты в полосе пропускания.

Произведена предварительная оценка ширины полосы перестройки гибридного кольца на сосредоточенных элементах при условии, что допустимый уровень рассогласования на центральной частоте равен  $\Gamma_{\text{доп}} = \pm 0,18$ , что соответствует коэффициенту отражения -15 дБ. Центральная частота полосы пропускания гибридного кольца в исходном состоянии (до перестройки)  $f_0 = 1,8$  ГГц. По формуле (1) получено  $f_{02} = 1,5 \cdot f_{01}$ . Прогнозируемые значения центральных частот полос пропускания гибридного кольца в полосе перестройки, на которых отражение будет не хуже -15 дБ, составляют  $f_{01} = 1,4$  ГГц и  $f_{02} = 2,1$  ГГц.

ная разность фаз между выходными сигналами равна  $180 \pm 3^\circ$ .

Третья глава диссертации посвящена разработке перестраиваемого гибридного кольца на основе перестраиваемых отрезков искусственных ЛПД и ЛОД и экспериментальному исследованию его характеристик. В качестве схемы-прототипа использована схема рис. 2.

На рис. 9 показана эквивалентная схема перестраиваемого гибридного кольца с варикапами в качестве перестраиваемых емкостей и цепями подачи управляющего напряжения. Фотография тестового образца устройства, выполненного по КНТО технологии, представлена на рис. 10. Индуктивности  $L_1$  выполнены в объеме КНТО структуры. Для реализации остальных элементов схемы использовались промышленные компоненты, смонтированные на поверхность КНТО модуля по средствам поверхностного монтажа.

АЧХ и ФЧХ устройства, измеренные при значениях управляющего напряжения 1 В, 3 В и 5 В показаны на Рис. 11. Согласно измерениям, на центральных частотах полос пропускания устройство обеспечивает равное деление мощности между выходными плечами при всех приложенных напряжениях. Вносимые потери на центральных частотах не превышают 1.3 дБ. Неравномерность деления мощности между выходными плечами в полосе 200 МГц на каждой центральной частоте не хуже  $\pm 1$  дБ. Измеренные развязка и коэффициент отражения лучше -15 дБ на частотах  $f_{01}=1,4$  GHz и  $f_{02}=2,2$  GHz, что соответствует результатам аналитического расчета и электродинамического моделирования.

В четвертой главе предложен и апробирован метод проектирования двухполосных НО с произвольно выбранными центральными частотами полос пропускания на основе отрезков искусственных ЛПД и ЛОД.

Частоты полос пропускания традиционных НО строго фиксированы и определяются частотными свойствами четвертьволновых отрезков ЛПД в плечах устройства. Предложенный метод основан на том, что для проектирования двухполосного НО с произвольными центральными частотами полос пропускания необходимо изменение закона дисперсии отрезков длинных линий в плечах устройства. Для этого в каждом плече устройства вместо четвертьволнового отрезка ЛПД предлагается использовать комбинацию отрезков ЛПД и ЛОД. При условии равенства волновых сопротивлений отрезков ЛПД и ЛОД фазовый набег вдоль плеча можно суммировать:  $\varphi_{\Sigma}(f) = \varphi_L(f) + \varphi_R(f)$ . В соответствии с законами дисперсии, частотно-

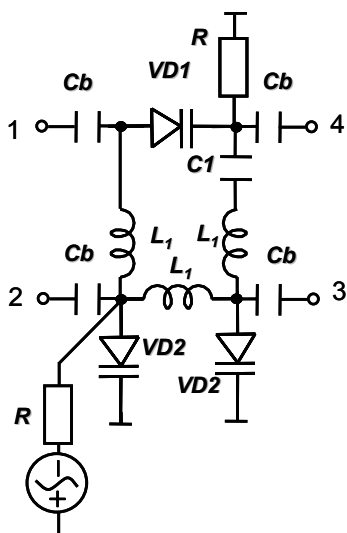


Рис. 9

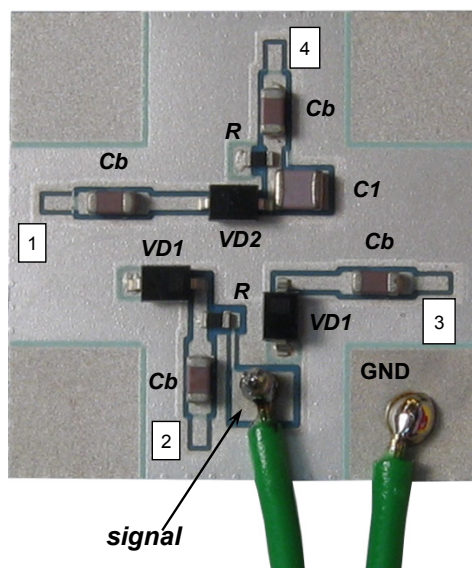


Рис. 10

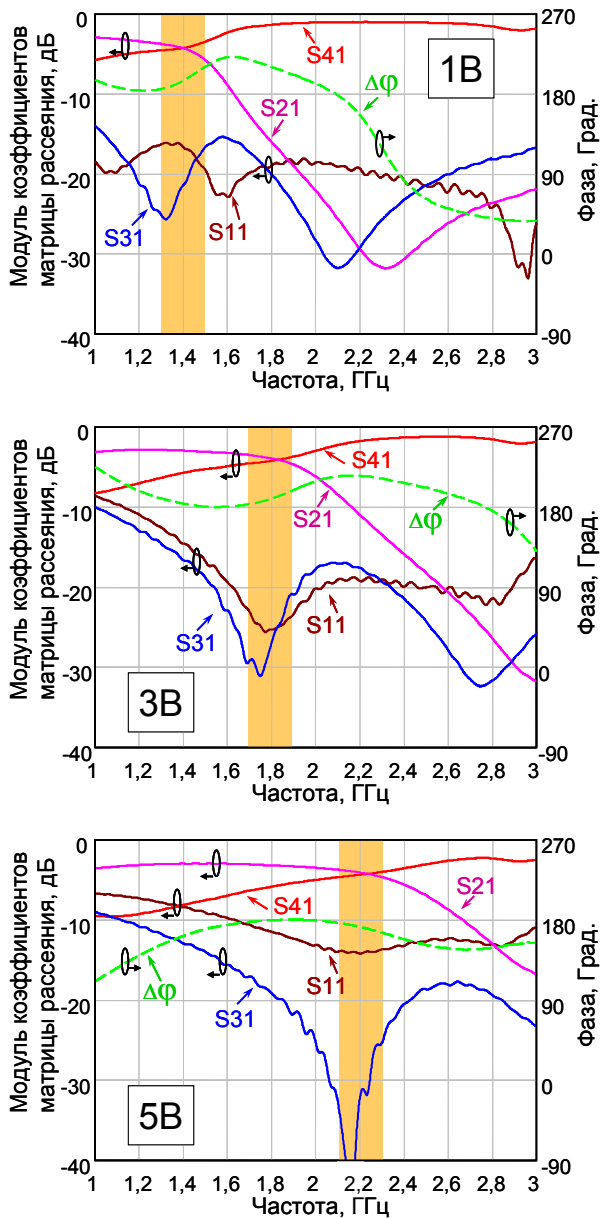


Рис.11

На рис. 12 показана эквивалентная схема моста Уилкинсона с центральными частотами  $f_0 = 0,9$  ГГц и  $f_1 = 1,8$  ГГц. Из системы уравнений (2) были найдены электрические длины отрезков ЛПД и ЛОД ( $\varphi_R(f_0)$ ) и ЛОД ( $\varphi_L(f_0)$ ) на частоте  $f_0$ . Далее отрезки ЛОД были представлены в виде искусственных Т-ячеек на сосредоточенных элементах. Отрезки ЛПД выполнены как элементы с распределенными параметрами. Устройство было изготовлено на диэлектрической подложке с использованием навесных элементов для реализации искусственных ЛОД (рис. 13). Размер устройства составил  $35 \text{ мм} \times 20 \text{ мм}$ .

Результаты экспериментального исследования характеристик двухполосного моста Уилкинсона с центральными частотами  $f_0 = 0,9$  ГГц и  $f_1 = 1,8$  ГГц показаны на рис. 14. Устройство обеспечивает равное деление мощности между выходными плечами на заданных частотах. Неравномерность деления мощности между выходными плечами составляет  $\pm 0,6$  дБ в полосе частот 100 МГц на центральных частотах. Коэффициент отражения по входу и развязка выходных плеч лучше  $-15$  дБ и  $-10$  дБ на частотах  $f_0$  и  $f_1$

зависимые фазовые набегивы вдоль отрезков ЛПД и ЛОД могут быть записаны, как  $\varphi_R(f) = \varphi_R(f_0) \cdot f/f_0$  и  $\varphi_L(f) = \varphi_L(f_0) \cdot f_0/f$  соответственно.  $\varphi_R(f_0)$  и  $\varphi_L(f_0)$  – значения фазовых набегов отрезков ЛПД и ЛОД на частоте  $f_0$ . Предположив, что необходимо обеспечить работу устройства на частотах  $f_0$  и  $f_1$ , можно записать систему уравнений:

$$\begin{cases} \varphi_L(f_0) + \varphi_R(f_0) = \varphi_\Sigma(f_0) \\ \varphi_L(f_0)/m + \varphi_R(f_0) \cdot m = \varphi_\Sigma(f_1) \end{cases} \quad (2)$$

где  $m = f_1/f_0$ . Следует помнить, что устройство обеспечивает деление мощности между выходными плечами, когда суммарный набег фазы вдоль плеч  $\varphi_\Sigma$  составляет  $\pm 90^\circ$  или  $\pm 270^\circ$ . Решив систему уравнений (2), для выбранного отношения частот  $m$ , можно найти значения фазовых набегов для отрезков ЛПД ( $\varphi_R(f_0)$ ) и ЛОД ( $\varphi_L(f_0)$ ) на частоте  $f_0$ .

В главе представлены практические реализации и результаты экспериментального исследования двухполосных НО с центральными частотами  $f_0 = 0,9$  ГГц и  $f_1 = 1,8$  ГГц ( $m=2$ ). В качестве схем-прототипов послужили шлейфный НО и мост Уилкинсона.

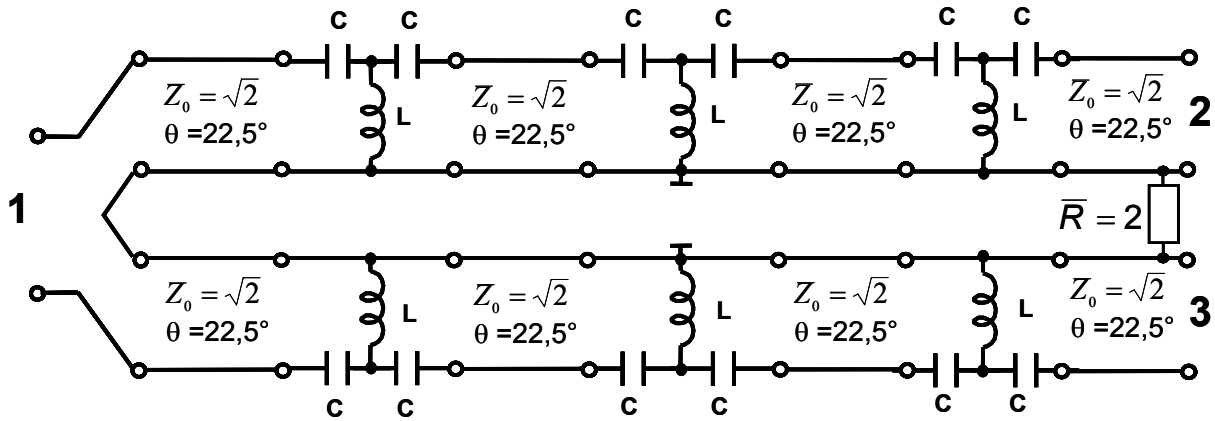


Рис. 12

соответственно. Небольшое рассогласование характеристик устройства вблизи полосы пропускания на частоте  $f_1 = 1,8$  ГГц можно объяснить достаточно большим разбросом номиналов навесных элементов ( $\pm 10\%$ ).

Пятая глава диссертации посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию характеристик нового типа многомодового резонатора на основе отрезков ЛПД и ЛОД, пригодного для получения многополосного фильтра с произвольно заданными частотами двух соседних полос пропускания. Оценивается возможность частотной перестройки полос пропускания фильтра за счет включения управляющих элементов в состав отрезков искусственных ЛПД и ЛОД. Приводятся результаты моделирования и экспериментального исследования характеристик устройств.

Формулируется и решается задача проектирования многомодового резонатора с произвольно заданными резонансными частотами соседних резонансов и с подавлением резонансов высших гармоник. Для решения этой задачи предлагается рассматривать резонатор со скачком волнового сопротивления при симметричном включении отрезков ЛПД и ЛОД. При этом отрезки ЛОД находятся в центре структуры резонатора, как показано на рис. 15. Для анализа резонатора использован аппарат ABCD-матриц. Для резонатора рис. 15 ABCD-матрица имеет вид:

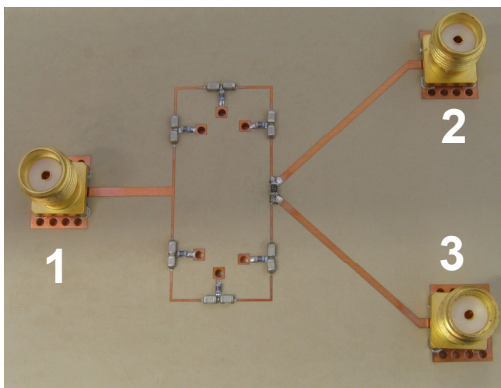


Рис. 13

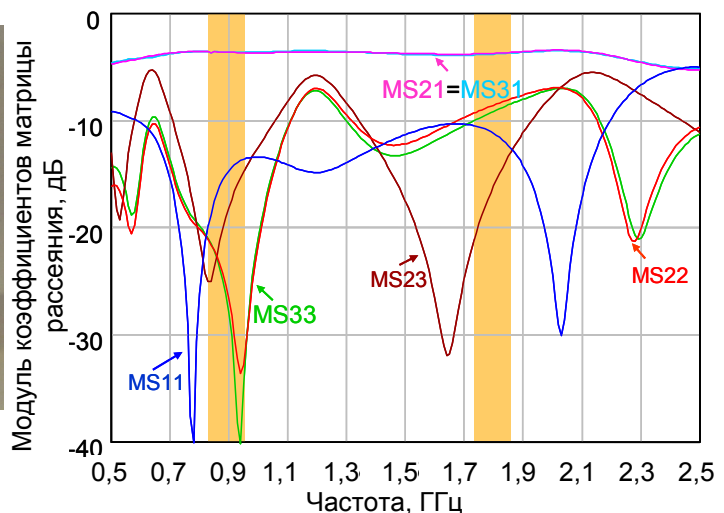


Рис. 14

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_R & iZ_R \sin \theta_R \\ iZ_R^{-1} \sin \theta_R & \cos \theta_R \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_L & -iZ_L \sin \theta_L \\ -iZ_L^{-1} \sin \theta_L & \cos \theta_L \end{bmatrix} \times \\ &\times \begin{bmatrix} \cos \theta_L & -iZ_L \sin \theta_L \\ -iZ_L^{-1} \sin \theta_L & \cos \theta_L \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_R & iZ_R \sin \theta_R \\ iZ_R^{-1} \sin \theta_R & \cos \theta_R \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $Z_R$  и  $Z_L$  – волновые сопротивления отрезков ЛПД и ЛОД;  $\theta_R = \theta_R(f_0) f_0/f$  и  $\theta_L = \theta_L(f_0) f/f_0$  – частотно-зависимые электрические длины отрезков ЛПД и ЛОД;  $\theta_R(f_0)$  и  $\theta_L(f_0)$  – значения электрических длин отрезков ЛПД и ЛОД, определенные на частоте  $f_0$ . Электрическая длина отрезка ЛПД положительна, а отрезка ЛОД – отрицательна. В случае, когда они компенсируют друг друга, т.е. эффективная электрическая длина резонатора  $\theta_{eff} = 0$ , можно говорить о резонансе нулевого порядка ( $n=0$ ), которого не существует в традиционном резонаторе на отрезке длинной линии с распределенными параметрами. Также следует отметить, что на частотах, больших частоты нулевого резонанса ( $f_0$ ), будут возбуждаться резонансы высших гармоник ( $f_{+1}, f_{+2} \dots f_{+n}$ ), обусловленные большим вкладом отрезка ЛПД, а на частотах, меньших частоты нулевого резонанса – резонансы высших гармоник ( $f_{-1}, f_{-2} \dots f_{-n}$ ), обусловленные большим вкладом отрезка ЛОД.

Перемножив матрицы в (3) найдем элементы полной ABCD-матрицы:

$$\begin{cases} A = D = \cos 2\theta_R \cos 2\theta_L + 0.5(Z_{RL}^{-1} + Z_{RL}) \sin 2\theta_R \sin 2\theta_L \\ B = iZ_R (\sin 2\theta_R \cos 2\theta_L + 0.5 \sin 2\theta_L (Z_{RL} - Z_{RL}^{-1}) - 0.5 \sin 2\theta_L \cos 2\theta_R (Z_{RL}^{-1} + Z_{RL})) \\ C = iZ_R^{-1} (\sin 2\theta_R \cos 2\theta_L + 0.5 \sin 2\theta_L (Z_{RL}^{-1} - Z_{RL}) - 0.5 \sin 2\theta_L \cos 2\theta_R (Z_{RL}^{-1} + Z_{RL})) \end{cases} \quad (4)$$

где  $Z_{RL} = Z_R/Z_L$ .

Условия резонанса в общем виде определяются выражениями:

$$\begin{cases} |S_{21}(f_n)| = |2/(A + B/Z_0 + CZ_0 + D)| = 1 \\ \arg(S_{21}(f_n)) = n\pi \end{cases} \quad (5)$$

где  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Перепишем систему уравнений (5), подставив в нее значения элементов матрицы из (4) и пронормировав к  $Z_R$ :

$$\begin{cases} (\cos 2\theta_R(f_0) f_n/f_0 \cos 2\theta_L(f_0) f_0/f_n + 0.5(Z_{RL}^{-1} + Z_{RL}) \sin 2\theta_L(f_0) f_0/f_n \sin 2\theta_R(f_0) f_n/f_0)^2 + \\ (\sin 2\theta_R(f_0) f_n/f_0 \cos 2\theta_L(f_0) f_0/f_n - 0.5(Z_{RL}^{-1} + Z_{RL}) \sin 2\theta_L(f_0) f_0/f_n \cos 2\theta_R(f_0) f_n/f_0)^2 = 1 \\ \arctan\left(\frac{-\sin 2\theta_R(f_0) f_n/f_0 \cos 2\theta_L(f_0) f_0/f_n + 0.5(Z_{RL}^{-1} + Z_{RL}) \sin 2\theta_L(f_0) f_0/f_n \cos 2\theta_R(f_0) f_n/f_0}{\cos 2\theta_R(f_0) f_n/f_0 \cos 2\theta_L(f_0) f_0/f_n + 0.5(Z_{RL}^{-1} + Z_{RL}) \sin 2\theta_L(f_0) f_0/f_n \sin 2\theta_R(f_0) f_n/f_0}\right) = \\ = n\pi \end{cases} \quad (6)$$

Используя условия резонанса, можно выполнить синтез многомодового

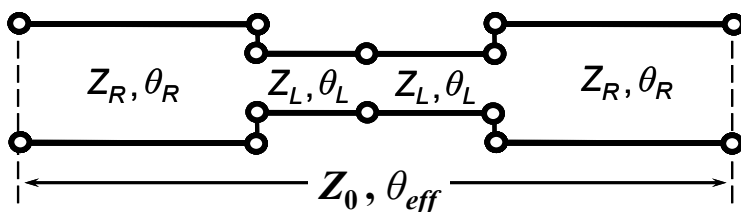


Рис. 15

резонатора с произвольно заданными резонансными частотами. Исходными данными служат требуемые резонансные частоты. Из системы уравнений (6) определяются



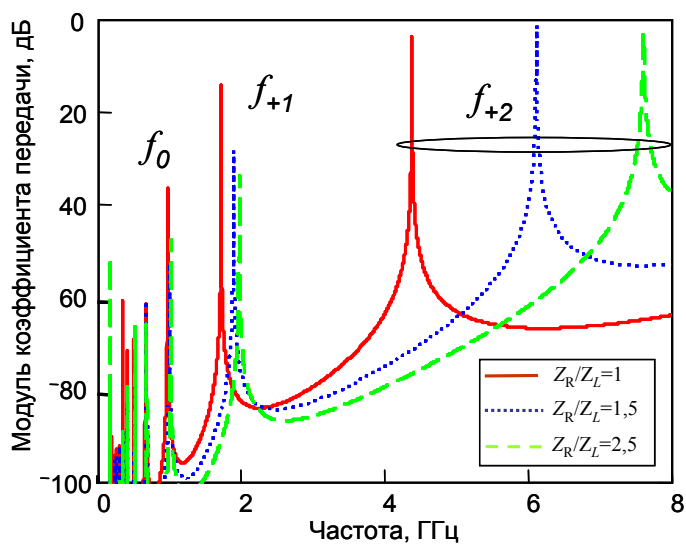


Рис. 16

зитными, или настроить их на нужную частоту при необходимости их использования.

По описанной выше методике произведен синтез резонатора с некрратными резонансными частотами  $f_{+1}=2$  ГГц и  $f_{+2}=3$  ГГц, разработана его многослойная КНТО структура. Измеренные характеристик пяти тестовых образцов резонатора показали наличие резонансных откликов на требуемых частотах 2 ГГц и 3 ГГц и подавление резонансов высших гармоник по уровню -30 дБ до 8 ГГц.

На основе двухмодового резонатора с некрратными резонансными частотами  $f_{+1}=2$  ГГц и  $f_{+2}=3$  ГГц был синтезирован двухполосный ППФ. Измеренные АЧХ 5 тестовых образцов ППФ, выполненного по КНТО технологии, представлены на рис. 17 в сравнении с АЧХ, полученными в ходе электродинамического моделирования многослойной структуры фильтра. Измеренные вносимые потери не превышают -2,5 дБ и -4 дБ на центральных частотах устройства. Обеспечено согласование лучше -15 дБ в полосах пропускания. Паразитные резонансы высших гармоник подавлены по уровню -35 дБ и не наблюдаются до 10 ГГц.

Перестраиваемый двухполосный ППФ был получен путем включение

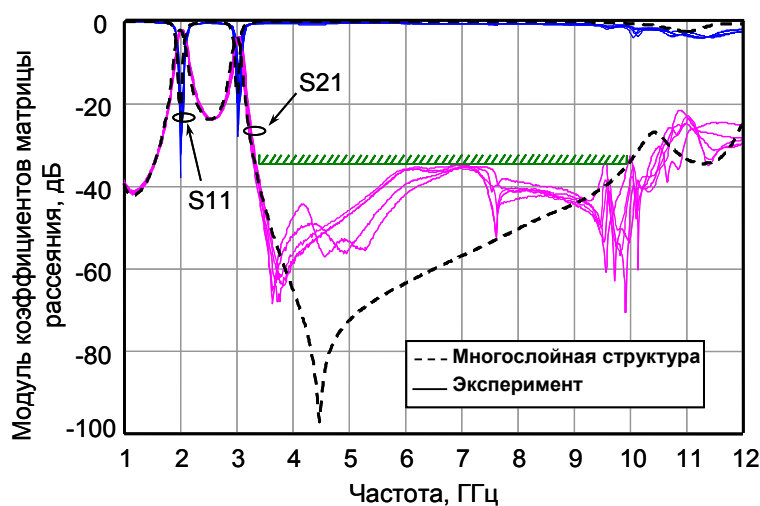


Рис. 17

электрические длины отрезков ЛПД ( $\theta_R(f_0)$ ) и ЛОД ( $\theta_L(f_0)$ ) на частоте  $f_0$ . В этом случае отношение волновых сопротивлений отрезков ЛПД и ЛОД ( $Z_{RL}$ ) является подгоночным параметром, который эффективно влияет на положение резонансов, что проиллюстрировано на рис. 16. А именно, изменяя значение  $Z_{RL}$ , можно подавить резонансы высших гармоник ( $f_{+2}, f_{+3} \dots f_{+n}$ ), если они являются пара-

управляющих элементов вместо постоянных емкостей отрезков искусственных ЛПД и ЛОД. На рис. 18 представлена фотография тестового образца перестраиваемого ППФ, в котором управляющие элементы включены только в состав искусственных ЛОД. В ходе экспериментального исследования характеристик фильтра было показано, что при изменении управляющего

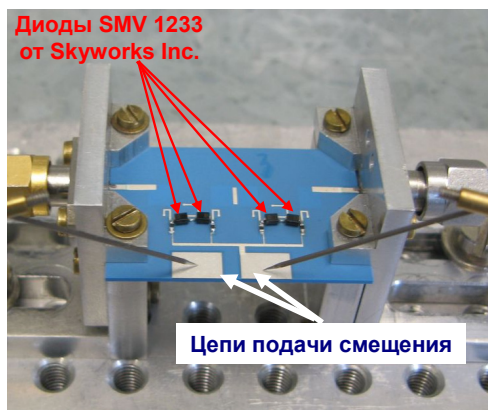


Рис. 18

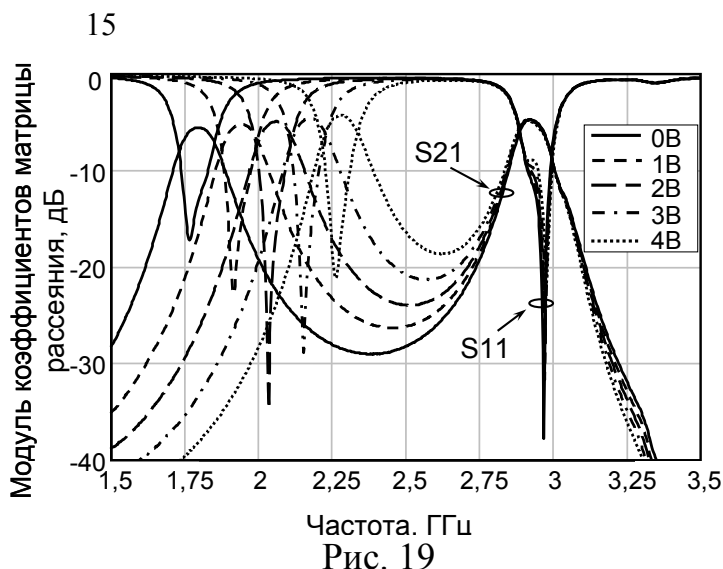


Рис. 19

напряжения изменяется положение только нижней полосы пропускания (рис. 19). Положение верхней полосы пропускания остается неизменным. Нижняя полоса пропускания перестраивается в частотном интервале 1,75-2,25 ГГц (28%). Такое поведение характеристик перестраиваемого двухполосного ППФ объясняется распределением тока и напряжения вдоль резонатора.

Был рассмотрен перестраиваемый двухполосный ППФ, в котором управляющие элементы были включены как в отрезки искусственных ЛОД, так и в отрезки искусственных ЛПД. Показано, что, выбирая определенные значения напряжений на управляющих элементах отрезков искусственных ЛПД и ЛОД, можно обеспечить различные варианты перестройки верхней и нижней полос пропускания фильтра, в частности, с сохранением относительной полосы пропускания или с сохранением абсолютного значения полосы пропускания для обеих частотных полос.

В Заключении сформулированы основные результаты, полученные в рамках диссертационной работы.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

- [1] Vendik, I. B. Digital Phase Shifters Based on Right- and Left-Handed Transmission Lines (Цифровой фазовращатель на длинных линиях с положительной и отрицательной дисперсией) [текст] / I. B. Vendik, O. G. Vendik, D. V. Kholodnyak, E. V. Serebryakova, and P. V. Kapitanova // Journal of the European Microwave Association. - 2006. - V. 2. – P. 30-37.
- [2] Vendik, I. Microwave devices based on transmission lines with positive/negative dispersion (СВЧ устройства выполненные на основе длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией) [текст] / I. Vendik, D. Kholodnyak, I. Kolmakova, E. Serebryakova, and P. Kapitanova // Microwave and Optical Technology Letters. - 2006. – V. 48, № 12. – P. 2632 – 2638.
- [3] Kapitanova, P. V. Multilayer thick-film technology as applied to design of microwave devices (Многослойная толсто пленочная технология в применении к СВЧ устройствам) [текст] / P. V. Kapitanova, A. V. Simine, D. V. Kholodnyak,

and I. B. Vendik // Journal of the European Ceramic Society. - 2007. - № 27.- P. 2941–2944.

[4] Vendik, I. Miniature microwave devices based on a combination of natural right-handed and metamaterial left-handed transmission lines (Миниатюрные СВЧ устройства основанные на комбинации длинных линий с положительной дисперсией и метаматериальных длинных линий с отрицательной дисперсией) [текст]/ I. Vendik, D. Kholodnyak, E. Serebryakova, and P. Kapitanova // The European Physical Journal Applied Physics. -2009. - V. 46, № 3. - pp. 45-48.

[5] Kapitanova, P. Right- and left-handed transmission line resonators and filters for dual-band applications (Резонаторы и фильтры для двухполосного применения на основе длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией) [текст] / P. Kapitanova, D. Kholodnyak, S. Humbla, R. Perrone, J. Müller, M.A. Hein, and I. Vendik // Microwave and Optical Tech. Lett. – 2009. – V. 51, № 3, pp. 629-633.

[6] Kapitanova, P. Tuneable Microwave Devices Based on Left/Right-Handed Transmission Line Sections in Multilayer Implementation (Перестраиваемые СВЧ устройства с использованием длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией в многослойном исполнении ) [текст] / P. Kapitanova, D. Kholodnyak, S. Humbla, R. Perrone, J. Mueller, M. A. Hein, and I. Vendik // Int. Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2009. – V. 1, № 4. – P. 323-329.

#### Глава книги

[7] Vendik, I.B. Microwave phase sifters and filters based on a combination of left-handed and right-handed transmission lines (СВЧ фазовращатели и фильтры основанные на комбинации отрезков длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией) [текст]/ I.B. Vendik, D.V. Kholodnyak, P.V. Kapitanova// Metamaterial Handbook, Applications of Metamaterials. - New York, 2009. – V. 13. – P. 13-1 – 13-21.

#### Другие статьи и материалы конференций:

[8] Капитанова, П.В. Исследование параметров пассивных СВЧ компонентов, выполненных по многослойной интегральной технологии [текст] / П.В. Капитанова, А.В. Симин, Д.В. Холодняк // Известия ВУЗов России, серия "Радиоэлектроника". - 2005, Вып. 1. – С. 75-81.

[9] Kapitanova, P.V. Investigation of microwave passive components based on multilayer “Sandwich” technology [текст] / P.V. Kapitanova, A.V. Simine, and D.V. Kholodnyak // Proc. of 11th Int. Student Seminar on Microwave Application of Novel Physical Phenomena. – 2004. - P. 48–50.

[10] Симин, А. В. Пассивные компоненты интегральных схем СВЧ, выполненные по многослойной ”сэндвич”-технологии [текст] / А. В. Симин, П.В Капитанова., Д.В. Холодняк, И.Б. Вендик // Сб. трудов 15 международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». - 2005. – С. 508-510.

[11] Kapitanova, P. Application of Sandwich Multilayer Technology to MICs Design [текст] / P.Kapitanova, A. Simine, D. Kholodnyak, and I. Vendik // Proc. Of 35th European Microwave Conf. – 2005. – P. 389-392.

[12] Vendik, I.B. Passive microwave devices based on LTCC and Sandwich multilayer technologies [текст] / I.B. Vendik, D.V. Kholodnyak, A.V. Simine, P.V. Kapitanova, P.A. Turalchuk, and I.A. Fischuk // Proc. of the 5th IEEE-Russia Conf. MEMIA. – 2005. – P. 70-75.

[13] Vendik, I.B. Potential benefits for left/right-handed transmission lines for microwave applications [текст] / I.B. Vendik, O.G. Vendik, D.V. Kholodnyak, E.V. Serebryakova, and P.V. Kapitanova // Proc. Of the 5th IEEE-Russia Conference MEMIA. - 2005. – P. 76-81.



- [14] Kapitanova, P. Multilayer passive microwave devices using the sandwich technology [текст] / P. Kapitanova, A. Simin, and D. Kholodnyak // Proc. of 12th Int. Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena. - 2005. – P. 74-76.
- [15] Kapitanova, P. Design of quasi-lumped-element filters and directional couplers using multilayer technologies [текст] / P. Kapitanova, P. Turalchuk, I. Fischuk, A. Simine, D. Kholodnyak, and I. Vendik // Proc. of 16-th Int. Conf. on Microw., Radar, Wireless Comm. – 2006.-V. 2 – P. 604-607.
- [16] Kapitanova, P. Multilayer thick-film technology as applied to design of microwave devices [текст] / P. Kapitanova, A. Simine, D. Kholodnyak, and I. Vendik // Proc. of Microwave Materials and Their Applications Conference. – 2006. – P. 92.
- [17] Капитанова, П. В. Микроэлектронные СВЧ-устройства на основе искусственных линий передачи с отрицательной дисперсией [текст] / П. В. Капитанова, Е. В. Серебрякова, Д. В. Холодняк, И. Б. Вендик // Сб. трудов 16 международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». - 2006. – С. 610-612.
- [18] Kapitanova, P.V. Design of miniaturized directional couplers using Right/Left-Handed transmission lines [текст] / P.V. Kapitanova, D.V. Kholodnyak // Proc. of 13th Int. Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena. - 2006. – P. 55-57.
- [19] Vendik, I.B. Applications of right/left handed and resonant left handed transmission lines for microwave circuit design [текст] / I.B. Vendik, D.V. Kholodnyak, I.V. Kolmakova, E.V. Serbryakova, P.V. Kapitanova, F. Martin, J. Bonache, J. Garcia, I. Gil, and M. Gil // Proc. of 36-th European Microwave Conf. – 2006. – P. 955-958.
- [20] Vendik, I. Design of miniature microwave devices based on a combination of natural right-handed and metamaterial left-handed transmission lines [текст] / I. Vendik, O. Vendik, D. Kholodniak, and P. Kapitanova // Proc. of First Int. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. - 2007. – P. 87-90.
- [21] Kholodnyak, D. Design of directional couplers using fully-integrated left-handed transmission lines [текст] / D. Kholodnyak, P. Kapitanova, and I. Vendik // Proc. of First Int. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. – 2007. – P. 91-94
- [22] J. García Miniaturization and optimization of planar microwave circuits based on metamaterials [текст] / J. García, I. B. Vendik , B. Sans, D. Kholodnyak, P. Kapitanova, J. Bonache, F. Martín // Proc. of 37th European Microwave Conf. – 2007. –P. 500-503.
- [23] Piatnitsa, V. Right/Left-Handed Transmission Line LTCC Directional Couplers [текст] / V. Piatnitsa, D. Kholodnyak, P. Kapitanova, I. Fischuk, T. Tick, J. Jantti, H. Jantunen, and I Vendik // Proc. of 37th European Microwave Conf. – 2007. – P.636-639.
- [24] Kholodnyak, D. 180° power dividers using metamaterial transmission lines [текст] / D. Kholodnyak, P. Kapitanova, S. Humbla, R. Perrone, J. Mueller, M.A. Hein, and I. Vendik // Proc. of 14-th Conf. on Microwave Techniques. – 2008. – P. 169-172.
- [25] Kapitanova, P. Miniaturized Antenna Decoupling Network Using Left-Handed Transmission Line Sections [текст] / P. Kapitanova, C. Volmer, S. Humbla, R. Perrone, J. Müller, and M. A. Hein // Proc. of 15-th Anniversary Int. Student Seminar on Microwave and Optical Applications of Novel Physical Phenomena. - 2008. – P. 28-30.
- [26] Kholodnyak, D. Tunable and reconfigurable microwave devices based on metamaterial transmission lines [текст] / D. Kholodnyak, P. Kapitanova, and I. Vendik // Proc. of 2-nd Int. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. – 2008. – P. 380-382.
- [27] Vendik, I. Tunable dual-band microwave devices based on a combination of left/right-handed transmission lines [текст] / I. Vendik, D. Kholodnyak, P. Kapitanova, M.A. Hein, S. Humbla, R. Perrone, J. Mueller // Proc. of 38th European Microw. Conf. – 2008. – P. 273-276.
- [28] Kholodnyak, D. Novel Wilkinson-type power dividers based on metamaterial transmission lines [текст] / D. Kholodnyak, P. Kapitanova, I. Vendik, S. Humbla, R. Perrone, J. Müller, and M.A. Hein // Proc. of 38-th European Microwave Conf. – 2008. – P. 341-344.

- [29] Kapitanova, P. Multi-band and tunable multi-band microwave resonators and filters based on cascaded left/right-handed transmission line sections [текст]/P. Kapitanova, D. Kholodnyak, S. Humbla, R. Perrone, J. Müller, M.A. Hein, and I. Vendik // Proc. of Int. IEEE Conf. EUROCON. -2009. – P. 60-66.
- [30] Müller, J. Highly integrated passive LTCC device with embedded high-k capacitors [текст] / J. Müller, R. Perrone, P. Kapitanova, D. Kholodnyak, I. Vendik, S. Humbla, and M.A. Hein // Proc. of IMAPS/ACerS 5th Int. Conf. on Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies. – 2009.
- [31] Perrone, R. Miniaturisation of a LTCC High-Frequency Rat-Race-Ring by Using 3-Dimensional Integrated Passives and Embedded High-K Capacitors [текст] / R. Perrone, P. Kapitanova, D. Kholodnyak, I. Vendik, S. Humbla, M. Hein, J. Müller // Proc. of 17th European Microelectronics and Packaging Conf. – 2009.
- [32] Kapitanova, P. The Dual-band and Reconfigurable Wilkinson Power Dividers Based on Metamaterial Transmission Lines [текст] / P. Kapitanova and D. Kholodnyak // Proc. of 16th Int. Student Seminar “Microwave and optical applications of novel phenomena and techn.” – 2009. – P. 19-28.
- [33] Munina, I. Miniaturized Broadband LTCC Directional Coupler Using Right/Left-Handed Transmission Lines [текст]/I. Munina, P. Kapitanova, and D. Kholodnyak // Proc. of the 16th Int. Student Seminar “Microwave and Optical Application of Novel Phenomena and Technologies”.– 2009. – P. 29-38.
- [34] Kapitanova, P. Application of right and left-handed transmission lines to design of highly integrated and tuneable directional couplers [текст] / P. Kapitanova, D. Kholodnyak, I. Vendik, R. Perrone, S. Humbla, J. Mueller, and M. A. Hein // Proc. of 3rd Int. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics – 2009. – P. 193-195.
- [35] Vendik, I. Multiband tuneable microwave resonators and filters on a combination of right/left-handed transmission line sections [текст] / I. Vendik, D. Kholodnyak, P. Kapitanova, and K. Zemlyakov // Proc. of 3rd Int. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. – 2009. – P. 591-593.
- [36] Kapitanova, P. Tuneable Lumped Element Directional Coupler Using Metamaterial Transmission Lines [текст] / P. Kapitanova, D. Kholodnyak, and I. Vendik // Proc. of 39th European Microwave Conf. – 2009. – P. 1247-125.
- [37] Vendik, I. Multifunctional microwave devices based on metamaterial transmission lines [текст] / I. Vendik, D. Kholodnyak, P. Kapitanova, K. Zemlyakov // in Proc. of IEEE Int. Conf. on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems. - 2009. – P. 1-5.
- [38] Turalchuk, P. Broadband small-size LTCC directional couplers [текст] / P. Turalchuk, I. Munina, P. Kapitanova, D. Kholodnyak, D. Stoepel, S. Humbla, J. Mueller, M. A. Hein, and I. Vendik // Proc. Of 40th European Microwave Conf. – 2010. – P. 1162-1165.
- [39] Kholodnyak, D. Broadband directional couplers and power dividers based on metamaterial transmission lines [текст] / D. Kholodnyak, I. Munina, P. Kapitanova, V. Turgaliev, A. Rusakov, P. Turalchuk, I. Vendik, D. Stoupele, S. Humbla, J. Mueller, and M.A. Hein // Proc. of 4-th Int. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microw. and Optics. - 2010. – P. 591-593.
- [40] Вендик, И.Б. Линии передачи с положительной и отрицательной дисперсией и СВЧ-устройства на их основе [текст] / И.Б. Вендик, Д.В. Холодник, П.В. Капитанова // материалы научно-технич. семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ».–2008. – С.14.
- [41] Холодник, Д.В. Направленные ответвители и СВЧ делители-сумматоры мощности на комбинации искусственных линий перелачи с положительной и отрицательной дисперсией [текст] / Д.В. Холодник, П.В. Капитанова, И.Б. Вендик // материалы научно-технического семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2009. – С.28.