УДК 621.396.67

МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ С ИНВЕРТОРАМИ

А. Р. Кубалова, аспирант СПбГУТ; kubalovaap@mail.ru
А. П. Максимов, инженер СПбГУТ
С. В. Томашевич, зав. кафедрой технической электродинамики и антенн СПбГУТ, проф., д.т.н.
Р. И. Кубалов, доцент кафедры технологий и микроэлектроники СПбГУТ, к.т.н.

Ключевые слова: *эллиптический фильтр, инвертор, характеристика затухания, АЧХ, ФЧХ, ГВЗ, плотность тока, напряженность электрического поля, оптимизация, четвертьволновые линии передачи, параметры рассеяния.*

Введение. Эллиптические фильтры (ЭФ) часто оказываются более экономичными, а при реализации на СВЧ и более компактными по сравнению с полиномиальными, что, естественно, привлекает к ним внимание разработчиков. Характеристика затухания, аппроксимируемая дробью Золотарева и имеющая равноволновый характер изменения в полосе пропускания и полосе задерживания, называется эллиптической, поскольку значения нулей и полюсов дроби Золотарева выражаются через эллиптические функции Якоби.

Еще одно преимущество эллиптического фильтра — высокая избирательность, что особенно важно в случаях, когда требуется обеспечить значительное затухание при узкой полосе перехода. Одну и ту же крутизну затухания в переходной области в ЭФ можно получить при меньшем количестве элементов, чем в полиномиальных фильтрах, а следовательно, при одинаковой добротности резонаторов эллиптические фильтры будут иметь более низкое затухание в полосе пропускания.

В настоящее время существует несколько способов реализации эллиптических фильтров СВЧ-диапазона. Одним из возможных вариантов печатных ЭФ являются фильтры с четвертьволновыми инверторами с реализацией на симметричной полосковой линии (СПЛ) [1, 2].

Включение инверторов в схему ЭФ. Точный синтез фильтров СВЧ можно свести к синтезу цепи с сосредоточенными параметрами и в дальнейшем, с помощью частотного преобразования Ричардса, перейти к цепи с распределенными параметрами. Последний этап проектирования заключается в реализации найденной цепи с использованием тождеств Куроды–Леви [3]. Однако в большинстве случаев применимы различные приближенные методы синтеза. В частности, при расчете узкополосных фильтров обосновано применение идеальных инверторов. Кроме того, если затухание полосно-пропускающего фильтра (ППФ) в нижней и верхней полосах задерживания имеет примерно геометрическую симметрию, то задачу синтеза можно упростить, используя для получения ППФ нормированный эллиптический фильтр-прототип нижних частот и соответствующее частотное преобразование [1].

При разработке фильтров СВЧ широко применяются инверторы, что позволяет перейти от лестничной схемы к схемам только с последовательными или только с параллельными ветвями, а произвольный выбор параметров инверторов дает возможность выполнить требования физической реализуемости. Поскольку идеальный инвертор не имеет физической реализации, используются либо четырехполюсники с отрицательными элементами, которые уже после ввода инвертора в электрическую схему компенсируются положительными схемными элементами фильтра, либо четырехполюсники, обладающие свойствами инверторов в ограниченном диапазоне частот. Реализуя инверторы четвертьволновыми линиями передачи, а параллельные ветви — полуволновыми и четвертьволновыми разомкнутыми отрезками, можно получить простую структуру фильтра (без входной и выходной цепей) [3].

Исследуем и смоделируем эллиптический полосно-пропускающий фильтр с инверторами, выполненный на основе СПЛ с помощью программы High Frequency System Simulation (HFSS) [4], и проведем его оптимизацию.

Исходная модель. *Данными* для анализа полосковой структуры в программе HFSS являются начальная топология структуры, материалы подложки и проводников, требования технического задания. Начальная топология фильтра, синтезированная при помощи конструктивного расчета, представлена на рис. 1 [2] (размеры указаны в миллиметрах).

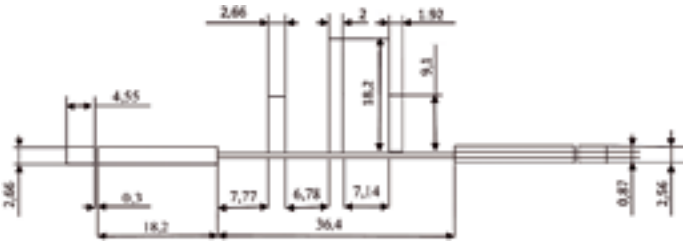

Рис. 1

Материал проводников — медь; материал подложки — диэлектрик СТ-3; диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_r = 3$; толщина подложки $B = h \cdot 2 = 4$ мм.

Параметры, предусмотренные техническим заданием [2, 5]:

- эллиптический ППФ на СПЛ;
- центральная частота $f_0 = 4{,}85$ ГГц;
- полоса пропускания $2\Delta f^* = 30$ МГц ($w = 0{,}6\%$);
- потери в полосе пропускания $A_{\max} \le 3$ дБ.

Моделирование. *Конфигурация проекта* определяется выбором типа решения электромагнитной задачи. Так как рассматриваемый фильтр представляет собой устройство с двумя портами на основе симметричной полосковой линии, подходящим типом решения будет Driven Modal.

3D-чертеж фильтра (рис. 2) реализуется с помощью двух видов примитивов 3D-конструктора HFSS: «коробка» (подложка) и прямоугольник (области портов и отрезки линии).

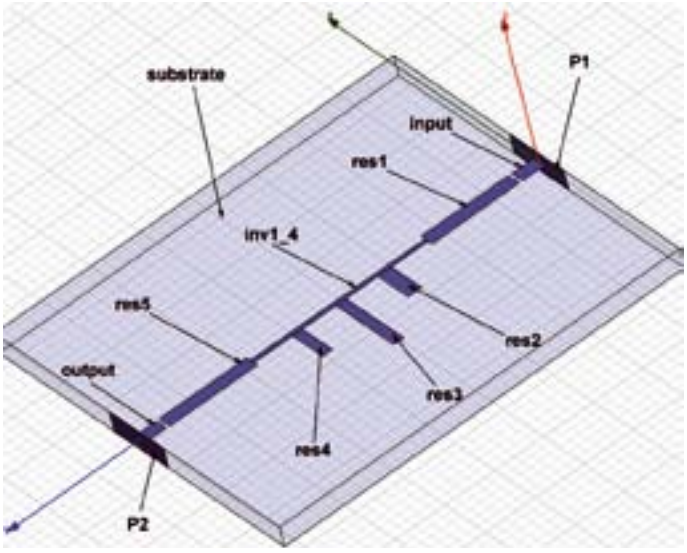

Рис. 2

Для удобства последующей оптимизации геометрической структуры фильтра все ее размеры следует задавать через переменные значения.

Назначение граничных условий. Диэлектрик подложки задается выбором материала с соответствующей ε_r из библиотеки материалов HFSS. Поскольку полоски передающей линии не имеют толщины (для экономии вычислительных ресурсов ЭВМ), ставится условие, что совокупность их областей станет границей сред металл–диэлектрик. Такое же требование предъявляется к верхней и нижней граням подложки.

Назначение устройств возбуждения. В качестве источника возбуждения используется волновой порт (команда Wave Port). Предполагается, что к порту данного типа подключен виртуальный полубесконечный волновод того же сечения, что и область порта.

Настройка решения. Указываются частота решения (для ППФ это центральная частота) и критерии остановки адаптивного анализа 3D-структуры, после которого HFSS приступает к вычислению матрицы рассеяния.

Анализ результатов. Исследование электрических характеристик (в частности, затухания и коэффициента отражения) неоптимизированной модели фильтра (рис. 3) показало, что полученные «вручную» расчетные электрические характеристики ЭФ не удовлетворяют требованиям технического задания. Так, центральная частота (f_0) оказалась на 7% меньше заявленной в ТЗ, а потери в полосе пропускания ($A_{\min}$) превысили 3 дБ.

Оптимизация. С помощью оптимизационного модуля HFSS Optimetrics было исследовано влияние ширины зазора

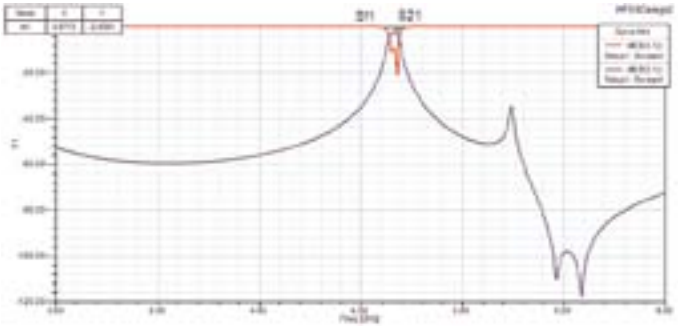

Рис. 3

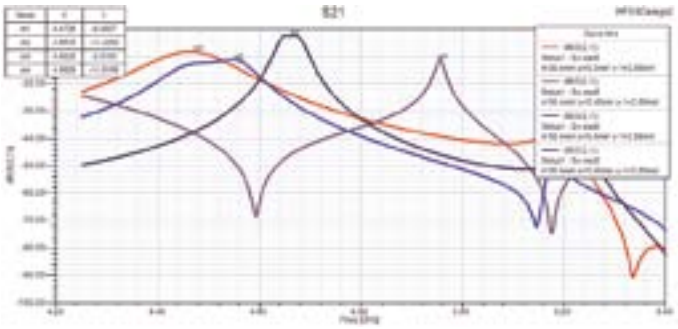

Рис. 4

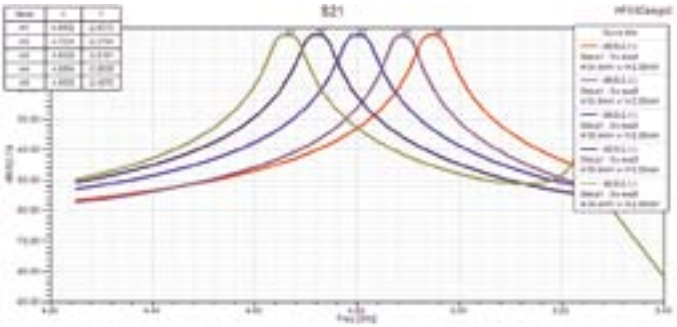

Рис. 5

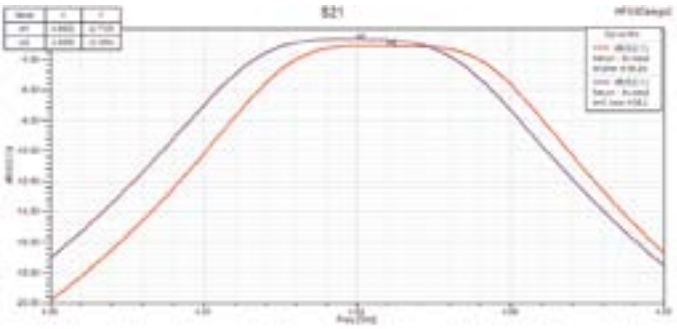

Рис. 6

(s) (рис. 4), длины резонаторов (l) (рис. 5) и толщины подложки (h) (рис. 6) на частотные характеристики фильтра. Результаты исследования затухания фильтра представлены на рис. 4—6.

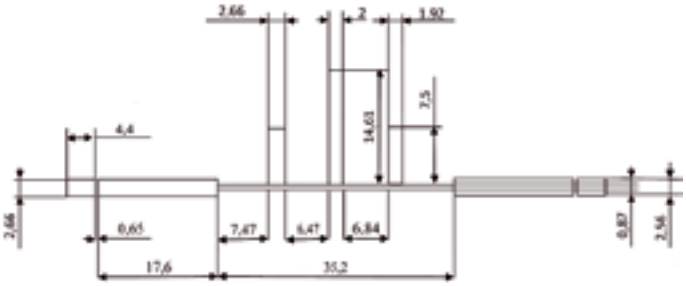

Рис. 7

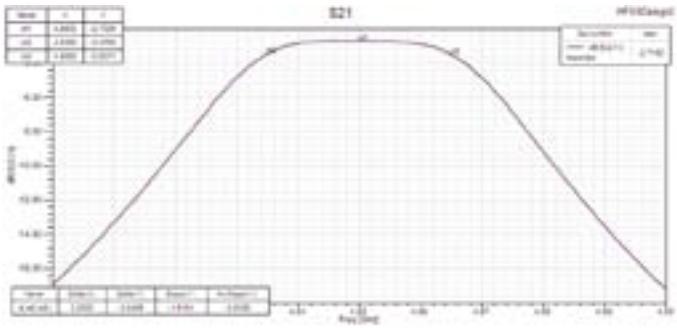

Рис. 8

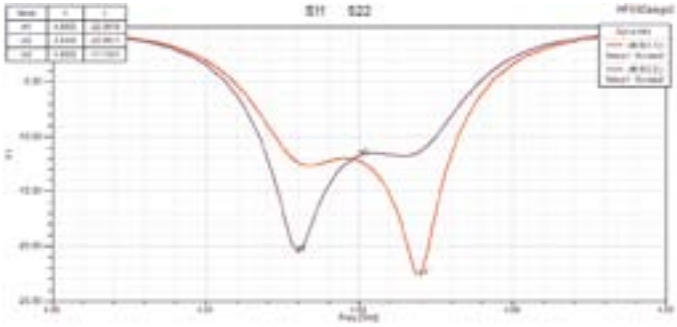

Рис. 9

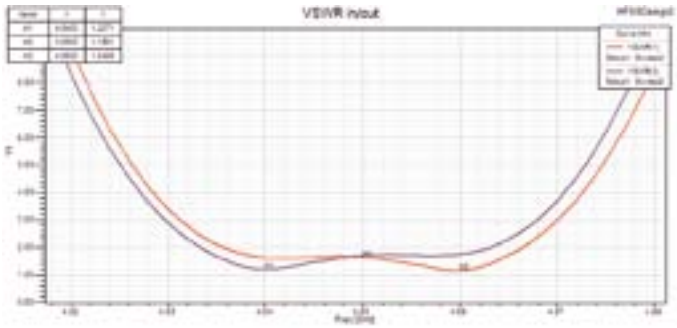

Рис. 10

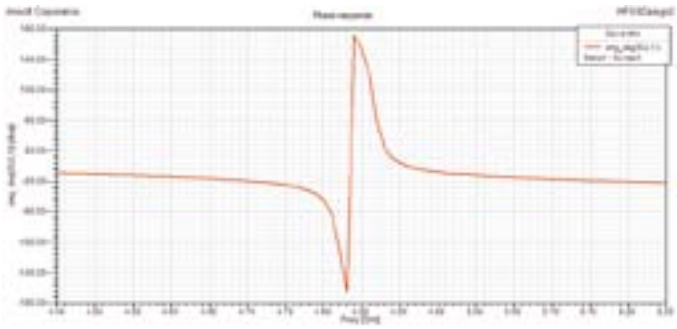

Рис. 11

На основе результатов исследований была оптимизирована топология фильтра (рис. 7) и вычислена толщина подложки СПЛ $B = h \cdot 2 = 4{,}2$ мм.

Как показано на рис. 8—12, электрические характеристики оптимизированного ЭФ: затухание (рис. 8), коэффициенты отражения входа и выхода (рис. 9), КСВН$_{вх/вых}$ (рис. 10), фазочастотная характеристика (рис. 11) и групповое время задерживания (ГВЗ) (рис. 12) — соответствуют требованиям технического задания.

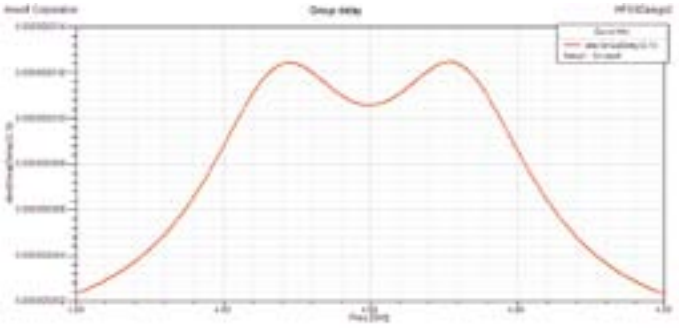

Рис. 12

Анимации распределений напряженности электрического поля в диэлектрике фильтра и плотности тока на поверхности металлического проводника фильтра (представленные соответственно на рис. 13 и 14) позволяют определять места возможного электрического пробоя.

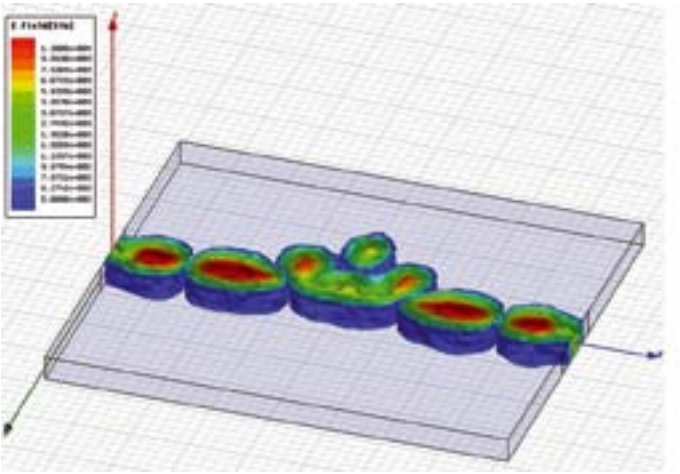

Рис. 13

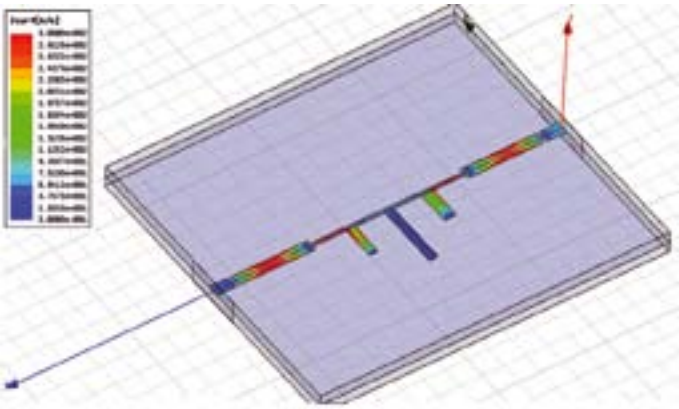

Рис. 14

Выводы. Таким образом, с помощью программы HFSS были проведены моделирование и оптимизация микроволнового эллиптического фильтра с инверторами, реализованного на симметричной полосковой линии. В результате удалось сконструировать новую топологию эллиптического ППФ с инверторами и рассчитать его оптимизированные электрические характеристики (затухание, АЧХ, ФЧХ, $КСВН_{вх/вых}$, ГВЗ и др.), а также построить распределения напряженности электрического поля в диэлектрике и плотности токов на поверхности проводников.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кубалова А.Р.** Приближенный метод синтеза узкополосного миниатюрного микроволнового эллиптического фильтра с четвертьволновыми инверторами сантиметрового диапазона//62-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава научных сотрудников и аспирантов: Тезисы докладов.— СПб.: СПбГУТ, 2010.— С. 278—284.
2. **Кубалова А.Р.** Синтез и конструирование микрополосковых узкополосных эллиптических фильтров СВЧ с четвертьволновыми инверторами//VIII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов»: Тезисы докладов.— СПб.: СПбГУТ, 2009.— С. 72.
3. **Матсумото А.** Фильтры и цепи СВЧ. Пер. с англ. Л.В. Алексеева.— М.: Связь, 1976.— 246 с.
4. **Банков С.Е., Курушин А.А.** Проектирование СВЧ-устройств и антенн с Ansoft HFSS.— М.: ЗАО «Родник», 2009.— 736 с.
5. **Kinayman N., Aksun M.I.** Modern Microwave Circuits.— London: Artech House, 2005.— 620 p.

Получено 05.08.10

ИНФОРМАЦИЯ

ПЕРСПЕКТИВЫ IP-КОММУНИКАЦИЙ И IP-СЕРВИСОВ В РОССИИ

Ассоциация документальной электросвязи при поддержке Министерства связи и массовых коммуникаций России провела 11-ю международную конференцию **«Состояние и перспективы развития IP-коммуникаций и IP-сервисов в России»**. Ее основные тематические направления — развитие инфокоммуникационной инфраструктуры, обеспечение безопасности и доверия при использовании ИКТ.

Заместитель генерального директора «Связьинвеста», советник министра связи и массовых коммуникаций России **В.Н. Бондарик** в выступлении на первом пленарном заседании сделал акцент на реорганизации холдинга, нацеленной на более широкое предоставление ИКТ-услуг населению страны. Если в 2007 г. «Связьинвест» обеспечивал доступ в Интернет 2,6 млн. пользователей, а в 2009—5 млн., то в текущем году планируется охватить более 7,5 млн. пользователей. Задача формулируется так: обеспечить доступ в Интернет 90% населения России, ШПД — 60%. В 2011 г. планируется освоение сетей беспроводного ШПД 4-го поколения.

Говоря о создании «Ростелекомом» инфраструктуры электронного правительства (запущен портал госуслуг, разработана концепция), В.Н. Бондарик справедливо подчеркнул: «Все только начинается».

Тема электронного правительства, государственных услуг и государственных функций в электронном виде была вынесена и на следующее пленарное заседание, в рамках которого обсуждались сервисная модель электронного правительства (**А.С. Нащекин**, заместитель генерального директора по федеральным программам ОАО «Ростелеком»), создание государственной телеграфно-почтовой системы России (**К.С. Терентьев**, генеральный директор ЗАО «ЦентрТелекомСервис»), использование потенциала технологических инструментов розничного банковского рынка для

решения задач предоставления государственных услуг населению (**А.В. Погудин**, член совета директоров Центра финансовых технологий). Теорию и практику реализации электронного государства подробно осветил ректор МТУСИ **А.С. Аджемов**. Руководитель рабочей группы АДЭ по телемедицине, глава Медицинского центра новых ИТ Московского НИИ педиатрии и детской хирургии **Б.А. Кобринский** свою традиционную тему электронного здравоохранения представил в новом ракурсе — как синтез инфокоммуникационных и телемедицинских технологий.

Секционные заседания проходили по трем параллельным потокам: сети будущего, новые инфокоммуникационные услуги и нормативное правовое обеспечение развития инфокоммуникаций.

Обеспечение конкурентоспособности отечественных компаний, тем более поставщиков услуг, обсуждалось на заседании по актуальным вопросам развития интернет-вещания в России, таким как нормы и пробелы в регулировании, предложения по реформированию существующего законодательства с учетом международного опыта в этой сфере, защита авторских и смежных прав при воспроизведении музыкальных и художественных произведений, лицензирование деятельности в рамках реализации проектов интернет-вещания. Рассматривался, в частности, опыт общенациональной интернет-радиотрансляции ФГУП МГРС.

На заседании, посвященном деятельности рабочих групп АДЭ «Внедрение шифровальных (криптографических) средств на сети связи общего пользования» и «Внедрение СОРМ на сетях электросвязи», обзор технологий и методов защиты информации и каналов управления в распределенных вычислительных сетях представил директор по технической политике «Интел Текнолоджиз» **Д.В. Ларюшин**, об открытой среде взаимодействия операторов связи и разработчиков СОРМ на сетях передачи данных рассказал генеральный директор ЗАО «Норси-Транс» **С.А. Овчинников**, современные IP-сервисы и новые угрозы для российских операторов связи со стороны глобальных интернет-компаний обрисовал генеральный директор ЗАО «ВидеоМост» **В.Б. Борилин**.

В рамках секции «Новые инфокоммуникационные услуги» состоялось заседание по облачным вычислениям и управляемым услугам. Переход на сервисные модели оказания услуг, развитие сервисно-ориентированных архитектур в направлении облачных вычислений позволяют, по словам генерального директора ЗАО «Стек Софт» **В.А. Кутукова**, операторам увеличивать доходы, а потребителям — оптимизировать расходы. Технология облачных вычислений, бизнес-модели управляемых услуг, методы их реализации, архитектура и практические аспекты обеспечения безопасности облачных вычислений — для анализа этих пока новых для российского рынка вопросов широко использовались примеры из практики не только мировых, но и отечественных компаний.

Памяти безвременно ушедшего **И.О. Масленникова**, постоянного ведущего конференции, было посвящено заседание «Отечественные разработки для IP-коммуникаций и IP-сервисов».