

ТЕОРИЯ ЦЕПЕЙ И ФИЛЬТРЫ

УДК 621.396.67

МИКРОВОЛНОВЫЙ ЧЕТЫРЕХПОРТОВЫЙ СТУПЕНЧАТЫЙ ЭЛЛИПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

А. П. Максимов, аспирант СПбГУТ; apmaksimov@gmail.com

Файз Салех Авгари, аспирант СПбГУТ; fsaleh28@yahoo.com

А. Р. Кубалова, старший преподаватель СПбГУТ, к.т.н.; kubalovaar@mail.ru

С. В. Томашевич, профессор, заведующий кафедрой СПбГУТ, д.т.н.; tomashevich.s.v@gmail.com

Эллиптические фильтры СВЧ обладают большей частотной избирательностью по сравнению с фильтрами Чебышева или Баттерворта. С помощью теории стержневых фильтров можно создать эллиптический фильтр СВЧ на основе параллельного соединения двух решёток связанных линий. Обычно вход и выход подобных фильтров расположены с одной стороны корпуса устройства, что является существенным ограничением при проектировании антенно-фидерных систем. Предложена четырёхпортовая структура с идентичными амплитудно-частотными характеристиками при всех четырёх способах включения фильтра в СВЧ-тракт.

Ключевые слова: эллиптический фильтр, СВЧ-тракт, СВЧ-устройства, электродинамическое моделирование, полосковая линия, многопроводная линия.

Введение. Одним из вариантов физической реализации полосно-пропускающего эллиптического фильтра (ЭФ) СВЧ является структура из двух параллельно соединенных решеток связанных многопроводных линий передачи со скачком волновой проводимости. В подобных фильтрах применяются решетки из параллельно соединенных стержней или микрополосков одинаковой, либо различной электрической длины. Если длины решеток разные, то резонаторы закорочены на землю с обеих сторон и могут иметь скачок волнового сопротивления в произвольном сечении. Такая структура позволяет удовлетворительно реализовать узкополосные характеристики (относительная ширина полосы пропускания $w \leq 5\%$).

Достоинство устройств на резонаторах различной длины заключается в дополнительной прочности, обеспечиваемой соединением обоих концов резонаторных стержней со стенками корпуса. Однако расположение входа и выхода с одной стороны вызывает трудности при включении такого устройства в тракт СВЧ. Обычно при проектировании СВЧ-аппаратуры данную проблему решают с помощью дополнительных отрезков соединительных линий, что влечет за собой увеличение веса, габаритов и ухудшение электрических характеристик частотно-разделительного устройства.

В разработанном фильтре предлагается предусмотреть альтернативный способ включения устройства в тракт с помощью использования четырёх, вместо обычных двух, трансформирующих секций и введения двух дополнительных портов.

В работе [1] Роудсом высказана мысль, что структура ступенчатого эллиптического фильтра на резонаторах различной электрической длины допускает два варианта двухпортовой реализации: когда входной и выходной порты расположены либо с одной, либо с противоположных сторон

устройства. Между тем, насколько известно авторам публикуемой статьи, получение четырёхпортовой структуры на основе фильтра Роудса до сих пор в литературе не освещалось. Ниже представлено теоретическое и экспериментальное исследование микроволнового ступенчатого эллиптического фильтра с четырьмя портами.

Методика расчёта четырёхпортового эллиптического фильтра. Расчёт полуволнового ступенчатого эллиптического фильтра на стержневых резонаторах представлен в работе [1]. По заданным техническим требованиям определяется фильтр-прототип нижних частот (ФНЧ) с помощью таблиц Заала [2]. Воспользовавшись частотным преобразованием от фильтра нижних частот (ФНЧ) к полосо-пропускающему фильтру (ППФ) и преобразованием Ричардса

$$\Omega_{НЧ} \rightarrow a \cdot \left(\frac{\operatorname{tg}(\theta)}{\operatorname{tg}(\theta_0)} - \frac{\operatorname{tg}(\theta_0)}{\operatorname{tg}(\theta)} \right),$$

(где $\operatorname{tg}(\theta)$ — новая частотная переменная, θ_0 — нормирующая электрическая длина линий, a — масштабный частотный коэффициент), переходим от ФНЧ на сосредоточенных элементах к ППФ из отрезков линий передачи одинаковой длины [3].

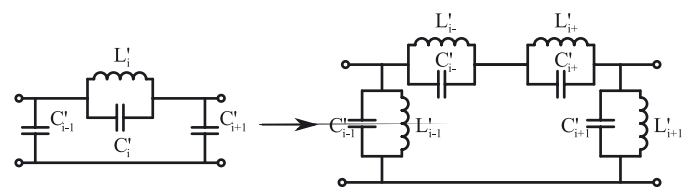


Рис. 1. Частотное преобразование Π -секции эллиптического ФНЧ в Π -секцию эллиптического ППФ

Масштабный коэффициент a зависит от полосы пропускания фильтра и θ_0 . При $w \leq 5\%$ можно применить узкополосный коэффициент

$$a = \frac{|\sin(2\theta_0)| f_0}{2\theta_0 \Delta f},$$

где f_0 — центральная частота фильтра, $\Delta f = f_2 - f_1$ — полоса пропускания фильтра.

В случае, если полная электрическая длина одного отрезка линии равна π , величину θ_0 можно задавать в пределах $\pi/6 \leq \theta_0 \leq \pi/3$. Задавая нормирующую электрическую длину линии, переходим от структуры из закороченных и разомкнутых отрезков линий к структуре из закорочен-

ных с обеих сторон полуволновых резонаторов различной длины со скачком волновой проводимости в сечении θ_0 (рис. 2) [1].

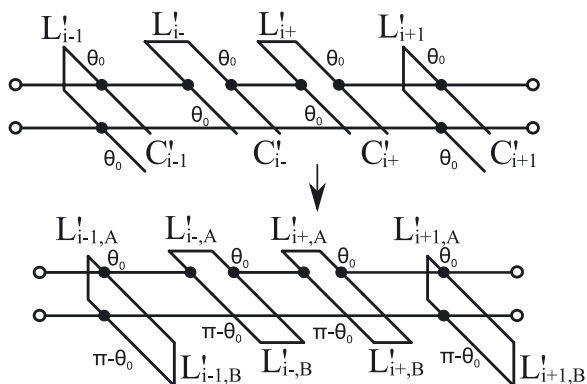


Рис. 2. Узкополосное преобразование Π -секции эллиптического ПФФ

Это преобразование можно провести путём решения системы уравнений (1) для L_A и L_B каждого резонатора:

$$\begin{cases} C' \operatorname{tg}^2(\theta_0) - \frac{1}{L'} = \frac{1}{L_A} - \frac{1}{L_B} \\ C' \operatorname{tg}^2(\theta_0) + \frac{1}{L'} = \frac{\pi - \theta_0}{\theta_0} \cdot \frac{1}{L_A} + \frac{1}{L_B} \end{cases} \quad (1)$$

Входные проводимости исходной и преобразованной структур хорошо совпадают только в узкой полосе частот ($w \leq 5\%$).

Полученную цепь можно представить как параллельное соединение двух лестничных цепей A и B из короткозамкнутых линий передачи. Элементы цепи A на центральной частоте имеют электрическую длину θ_0 , а элементы цепи B — $\pi - \theta_0$.

Подсхемы A и B реализуются закороченными на землю связанными линиями, которые соединяются параллельно в точке скачка волновой проводимости. Многопроводные линии передачи удобно характеризовать матрицами нормированных волновых проводимостей или нормированных погонных ёмкостей. Элементы матриц определяются по расчётным формулам [1, 3].

Обычно для подключения нагрузок по входу и выходу фильтра, с целью получения приемлемой с точки зрения физической реализуемости структуры, в подсхему A вносят единичные элементы. Они реализуются встречно-стержневой связанной линией электрической длины θ_0 , закороченной на землю в точке скачка проводимостей внутренних резонаторов и подключенной к нагрузке с разомкнутой стороны. Таким образом, с точки зрения теории многопроводных линий, в матрицу подсхемы A добавляются два узла. Например, для фильтра третьего порядка матрица нормированных проводимостей подсхемы A приобретает вид:

$$[Y_n] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 + Y_{11} & -Y_{12} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{21} & Y_{22} & -Y_{23} & 0 \\ 0 & 0 & -Y_{32} & Y_{33} + 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

В фильтрах с двумя портами количество узлов подсхемы B сохраняется неизменным. Такая структура позволяет включать фильтр в СВЧ-тракт единственным способом — когда вход и выход расположены с одной стороны. Однако благодаря тому, что в предлагаемом фильтре линии второй подсхемы также замкнуты на землю, открывается возможность внести в подсхему B два дополнительных единичных элемента электрической длины $\pi - \theta_0$. Тогда матрица подсхемы B также приобретает вид (2).

Полная схема предлагаемого фильтра с четырьмя портами изображена на рис. 3.

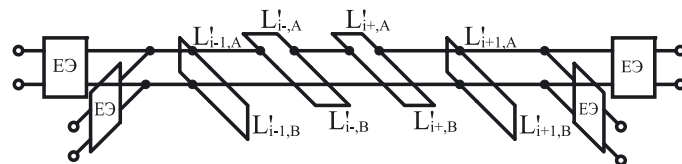


Рис. 3. Схема предлагаемого эллиптического фильтра с четырьмя портами

В исходных матрицах нормированных проводимостей подсхем A и B суммы нечётных столбцов равны нулю. Это — следствие отсутствия проводимостей на землю у единичных элементов, реализуемых встречно-стержневой связанной линией, и у центрального узла между элементами $L'_{i-1,A}$, $L'_{i-1,B}$ и $L'_{i+1,A}$, $L'_{i+1,B}$ (рис. 3). Добавить ненулевые проводимости на землю для указанных узлов можно с помощью преобразований матриц проводимостей, не меняющих входные и выходные характеристики всей структуры [4].

Для обеих матриц преобразование имеет вид:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k/\sqrt{a} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\sqrt{a} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot [Y_n] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k/\sqrt{a} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\sqrt{a} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где k — коэффициент преобразования, $n > 1$, a — масштабный частотный коэффициент.

В результате преобразований матриц схема может быть реализована связанными линиями передачи с ёмкостями на землю. Кроме того, частично устранена зависимость внутренних элементов фильтра от масштабного частотного коэффициента a . Данная зависимость в узкополосных фильтрах может привести к физически нереализуемой структуре.

Далее необходимо денормировать матрицы для нагрузки 50 Ом, умножив каждый элемент матрицы на $Y_0 = 1/50$ (См).

Геометрические размеры элементов матриц, реализованных прямоугольными связанными линиями в однородной диэлектрической среде, определяются по графикам Гетзингера [5] или с помощью электромагнитного моделирования. Для удобства применения графиков Гетзингера матрицы проводимостей следует перевести в матрицы нормированных погонных ёмкостей

$$[C/\varepsilon] = \eta_0 [Y],$$

где: $[C/\varepsilon]$ — матрица нормированных погонных ёмкостей, ε — полная диэлектрическая проницаемость среды, η_0 —

импеданс свободного пространства, $\eta_0 = 120\pi$, [Y] — матрица денормированных проводимостей.

На рис. 4 представлена топология четырёхпортового эллиптического ступенчатого фильтра СВЧ третьего порядка с центральной частотой 2154 МГц, полосой пропускания 20 МГц (относительная ширина полосы пропускания $w = 0,93\%$), $\theta_0 = \pi/4$.

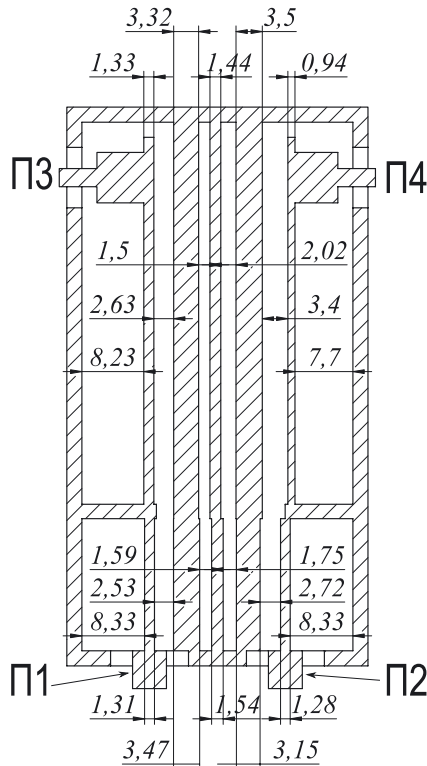


Рис. 4. Топология четырёхпортового эллиптического фильтра

Могут быть использованы следующие пары портов: П1-П2, П3-П4, П1-П4, П2-П3. При этом, если какой-либо из портов П1, П2 не используется, то он должен быть короткозамкнутым, а если не используется какой-либо из портов П3, П4, то он должен работать в режиме холостого хода.

Моделирование и экспериментальное исследование. Аналитическое исследование полученной структуры, которое бы учитывало зависимость электрической длины стержня от геометрии его сечения, все неоднородности и их

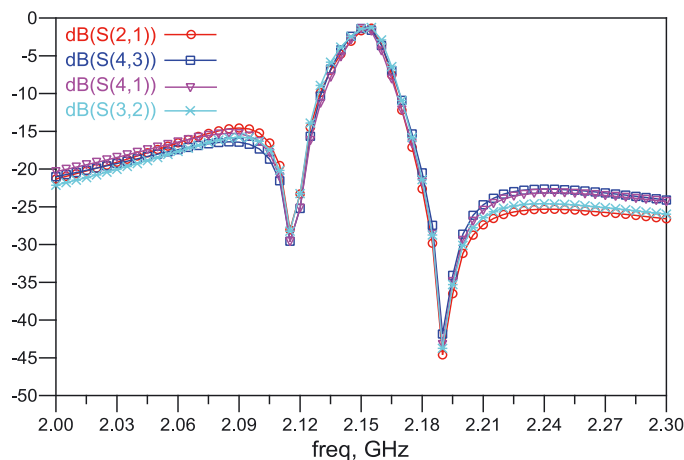


Рис. 5. Результаты электродинамического моделирования АЧХ фильтра

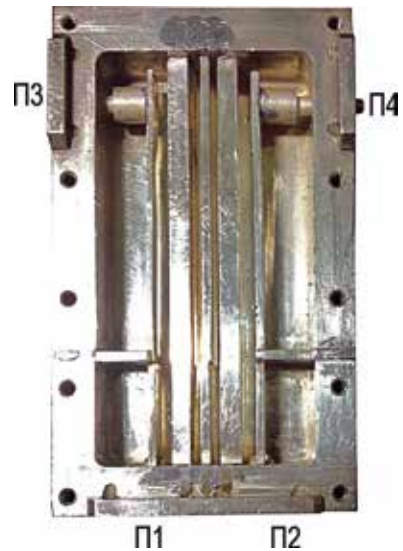


Рис. 6. Экспериментальный образец четырёхпортового эллиптического фильтра

взаимное влияние, не представляется возможным. Поэтому была построена 3D-модель для расчета с использованием метода конечных элементов в симуляторе электромагнитного поля. Результаты моделирования при всех четырех способах включения представлены на рис. 5.

Был изготовлен экспериментальный образец устройства (рис. 6).

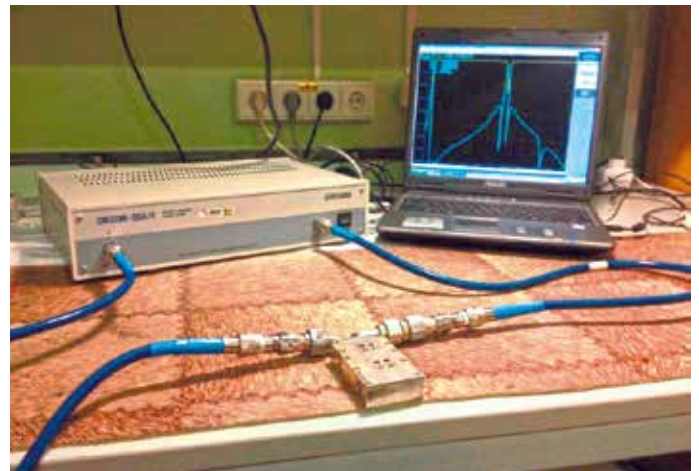


Рис. 7. Фотография стенда измерений

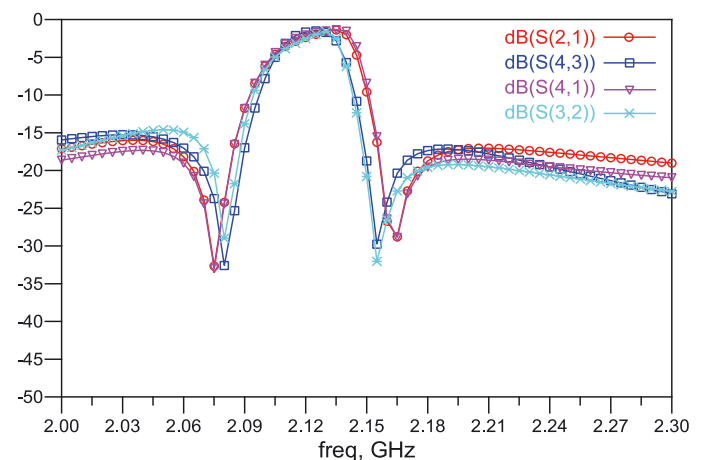


Рис. 8. Экспериментальные АЧХ фильтра

Стенд измерений представлен на рис. 7. Измерения проводились на анализаторе цепей Обзор 304/1. Измеренные АЧХ при четырёх способах включения фильтра в тракт представлены на рис. 8.

Заключение. Центральная частота экспериментального образца смещена в область нижних частот на 20 МГц и расширена на 0,3%. Скорректировать положение центральной частоты можно путём уменьшения электрической длины стержней. Заданную ширину полосы пропускания можно установить подстройкой ширины стержней. Положением нулей АЧХ можно независимо управлять, изменяя зазоры между внутренними стержнями.

Необходимость тонкой подстройки для достижения требуемых параметров характерна для всех микроволновых стержневых фильтров. Однако результаты теоретического и экспериментального исследований четырёхпортового ступенчатого эллиптического фильтра СВЧ показали, что

его АЧХ практически идентичны при всех четырёх способах включения фильтра в тракт.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rhodes J. D.** The Half-Wave Stepped Digital Elliptic Filter / J. D. Rhodes // *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on.*, 1969.— Т. 17.— С. 1102–1107.
2. **Зааль Р.** Справочник по расчету фильтров.— М.: Радио и связь, 1983.— 752 с.
3. **Кубалова А. Р., Томашевич С. В.** Анализ и синтез микроволновых эллиптических фильтров.— СПб.: Издательство СПбГУТ, 2013.— 368 с.
4. **Wenzel R. J.** Exact Theory of Interdigital Band-Pass Filters and Related Coupled Structures // *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on.*, 1965.— Т. 13.
5. **Getsinger W. J.** Coupled Rectangular Bars Between Parallel Plates / W. J. Getsinger // *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on.*— 1962.— Т. 10.— С. 65–72.

Получено 04. 06. 14

ИНФОРМАЦИЯ

«МФИ СОФТ»: ПЕРВАЯ DLP-СИСТЕМА НА БАЗЕ BIG DATA

В основу новой разработки «МФИ Софт» — DLP-системы следующего поколения «Гарда Предприятие» 3, положены логика Big Data, многоуровневая аналитика и простой веб-интерфейс.

На презентации нового продукта выступили ведущие специалисты компании. Анализируя парадигму развития DLP-систем, заместитель генерального директора по направлению «Информационная безопасность» **В. В. Пономарев** новым вектором их развития назвал большие данные как основу аналитики. Он подчеркнул необходимость дать пользователям DLP инструменты для оценки информационных рисков еще до того, как угрозы станут инцидентами. «Гарда Предприятие» 3, единственная сегодня DLP-система, основанная на принципах работы с большими данными, успешно решает задачу автоматического выявления потенциальных угроз, а значит, превентивной защиты информации.

Директор по продажам и маркетингу направления «Информационная безопасность» **Е. Д. Тетенькин** посвятил свое выступление будущему DLP-систем, подчеркнув, что работа с большими данными — основной тренд их продвижения.

Возможности системы продемонстрировал менеджер по разработке «Гарда Предприятие» 3 **А. К. Нейман**. Несомненные преимущества этого аппаратно-программного комплекса (АПК): удобный интерфейс, адаптированный под каждодневные запросы пользователей, визуализация аналитики, быстрый поиск по накопленному архиву. Система хранения данных в «Гарде



В. В. Пономарев: «Нам удалось создать систему, максимально упрощающую работу с поисковыми запросами»

Предприятие» 3 обеспечивает тотальную запись всех информационных объектов компании (интернет-серфинг сотрудников, электронная почта, интернет-мессенджеры, IP-телефония) и быстрый поиск по накопленной базе. Благодаря применению методики хранения и анализа Big Data в DLP-системе «Гарда Предприятие» 3 появились широкие возможности анализа накопленной информации: автоматическое построение картины информационного обмена, ретроспективный анализ любого инцидента, выявление статистических аномалий, построение drill-down-графиков по различным данным и т.д.

«Гарда Предприятие» 3 обеспечивает новое восприятие известного на российском рынке аппаратно-программного комплекса: DLP — это удобно. Впрочем, компания не скрывает планов продвижения своего продукта на международный рынок.

Э. Г. ОСТРОВСКИЙ НАЗНАЧЕН ВИЦЕ-ПРЕЗИДЕНТОМ «МФИ СОФТ»

Один из крупнейших специалистов в области телекоммуникаций, Э. Г. Островский стал первым в России работником отрасли связи, удостоенным Золотой Звезды Героя Российской Федерации. Его карьера как профессионального связиста неразрывно связана с армией. Выпускник Ульяновского военного училища связи им. Г. К. Орджоникидзе, в дальнейшем он окончил Военную академию связи им. С. М. Буденного. Принимал участие в Афганской войне в качестве советника начальника связи Афганской народной армии. Был заместителем начальника связи Вооруженных сил СССР, начальником связи — заместителем начальника штаба Объединенных Вооруженных сил СНГ. Военную карьеру закончил в звании генерал-лейтенанта.

Как крупный специалист в области связи, Э. Г. Островский занимал ведущие позиции в Правительстве РФ. В качестве заместителя министра связи РФ он руководил восстановлением и организацией связи в Чеченской республике. Благодаря его деятельности все райцентры Чечни были охвачены цифровыми радиорелейными станциями и станциями спутниковой связи, на всех районных узлах связи было установлено новейшее цифровое станционное и коммутационное оборудование, проложено более 500 км ВОЛС. Все это способствовало восстановлению социально-экономической сферы в республике.

Э. Г. Островский является членом Экспертного совета по инновациям Комитета ГД по наукоемким технологиям.