

**А.Э. Баскакова<sup>1</sup>, В.М. Тургалиев<sup>1</sup>, Д.В. Холодняк<sup>1</sup>, В. Радониц<sup>2</sup>,  
В. Црноевич-Бенгин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup>Университет г. Новый Сад, Сербия

## **СВЧ-фильтры и диплексеры на двухмодовых кольцевых резонаторах**

*Рассматривается применение СВЧ-фильтров на основе двухмодовых кольцевых резонаторах для создания диплексеров для систем телекоммуникаций. Анализируется влияние геометрии элементов возбуждения двухмодового кольцевого резонатора на положение нулей передаточной характеристики двухзвенного полосно-пропускающего фильтра. Представлены результаты электродинамического моделирования характеристик диплексеров, предназначенных для работы в частотных диапазонах 2.45 ГГц и 3.55 ГГц, реализованных в интегральном исполнении по технологии печатных плат и многослойной LTCC технологии.*

**Ключевые слова:** двухмодовые резонаторы, СВЧ-фильтры, диплексеры, LTCC технология

СВЧ-диплексеры применяются для разделения сигналов в полосах двух частотных каналов. В состав диплексера входят два фильтра, каждый из которых пропускает сигналы в полосе частот своего канала и обеспечивает непропускание (отражение) сигналов в полосе частот другого канала. Для эффективной развязки каналов целесообразно использовать фильтры с нулями передаточной характеристики в полосе частот соседнего канала [1, 2].

Двухмодовые кольцевые резонаторы (рис. 1-а) широко применяются для реализации полосно-пропускающих СВЧ-фильтров с дополнительными нулями передаточной характеристики [3-7]. Периметр резонатора, измеряемый по средней линии, равняется длине волны в линии передачи на резонансной частоте ( $\lambda_g$ ).

Наличие неоднородности в виде квадрата со стороной  $d$  обеспечивает возбуждение в резонаторе двух связанных мод, распределение тока для которых показано на рис. 1-б и 1-в. Коэффициент связи зависит от размера неоднородности (рис. 2-а). При  $d = 0$  возбуждается одна мода. Выбор надлежащего коэффициента связи позволяет на одном двухмодовом резонаторе реализовать полосно-пропускающий фильтр второго порядка.

Важным преимуществом фильтра на основе двухмодового кольцевого резонатора является наличие двух нулей передаточной характеристики, которые соответственно расположены выше и ниже полосы пропускания, что позволяет увеличить частотную избирательность фильтра.

На основе двухмодовых резонаторов, настроенных на разные частоты и соединенных параллельно по входу и выходу могут быть реализованы полосно-пропускающие фильтры с двумя полосами пропускания [6]. Применение технологии многослойных печатных плат или многослойной технологии LTCC [8] позволяет расположить кольцевые резонаторы в разных слоях друг над другом, уменьшив тем самым площадь, занимаемую двухполосным фильтром.

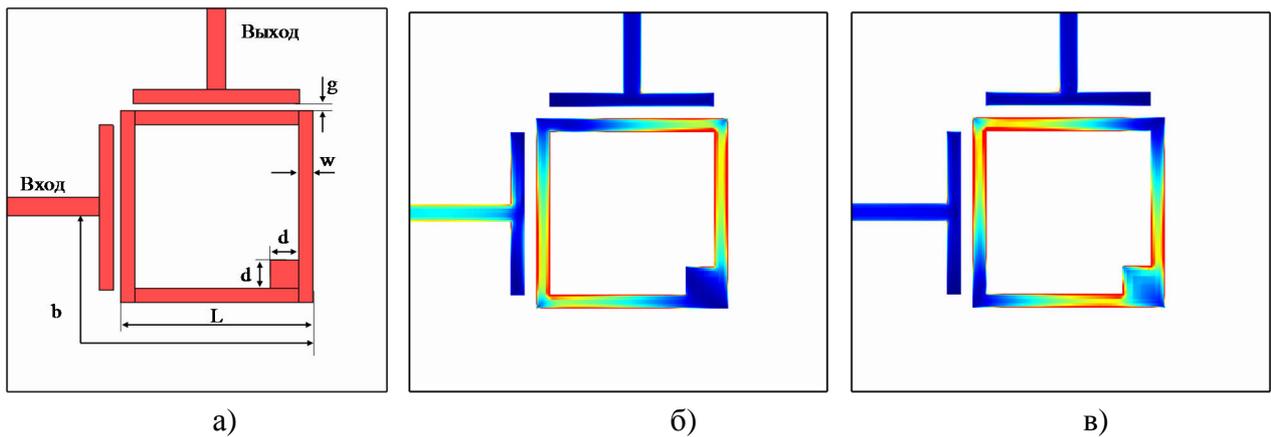


Рисунок 1.

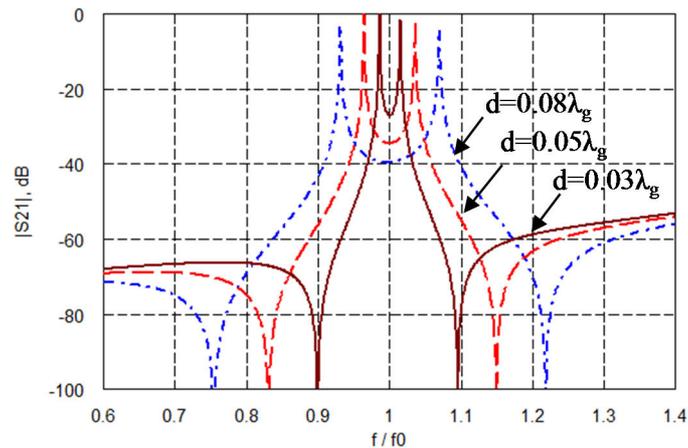


Рисунок 2.

На рис. 3-а показана топология микрополоскового диплексера на основе двухзвенных полосно-пропускающих фильтров на кольцевых двухмодовых резонаторах. Диплексер, предназначенный для работы в системах телекоммуникаций в диапазонах частот 2,45 ГГц и 3,55 ГГц, реализован на диэлектрической подложке Taconic CεR-10 ( $\epsilon_r = 10$ ,  $\text{tg}(\delta) = 0,0035$ ) толщиной 1,27 мм и площадью  $30 \times 40 \text{ мм}^2$ .

Для уменьшения паразитного взаимодействия между фильтрами, возникающего вследствие того, что каждый из них имеет большое реактивное входное сопротивление в полосе пропускания другого фильтра, к общему входу фильтры подключаются через согласующую цепь, состоящую из двух отрезков микрополосковой линии, которые имеют длину  $l_1$  и  $l_2$ , соответственно.

Частотные характеристики разработанного диплексера, полученные при помощи электродинамического моделирования, представлены на рис. 3-б. При моделировании учитывались потери в медных проводниках толщиной 18 мкм, а также в диэлектрической подложке. Вносимые потери в полосе пропускания каждого фильтра не превышают 2 дБ. Разработанный диплексер обеспечивает развязку частотных каналов на уровне 30 дБ.

Развязка может быть увеличена путем введения нуля передаточной характеристики одного фильтра, входящего в состав диплексера, в полосу пропускания другого фильтра. Для

этого необходимо проанализировать возможности управления положением нулей передачи кольцевого двухмодового резонатора.

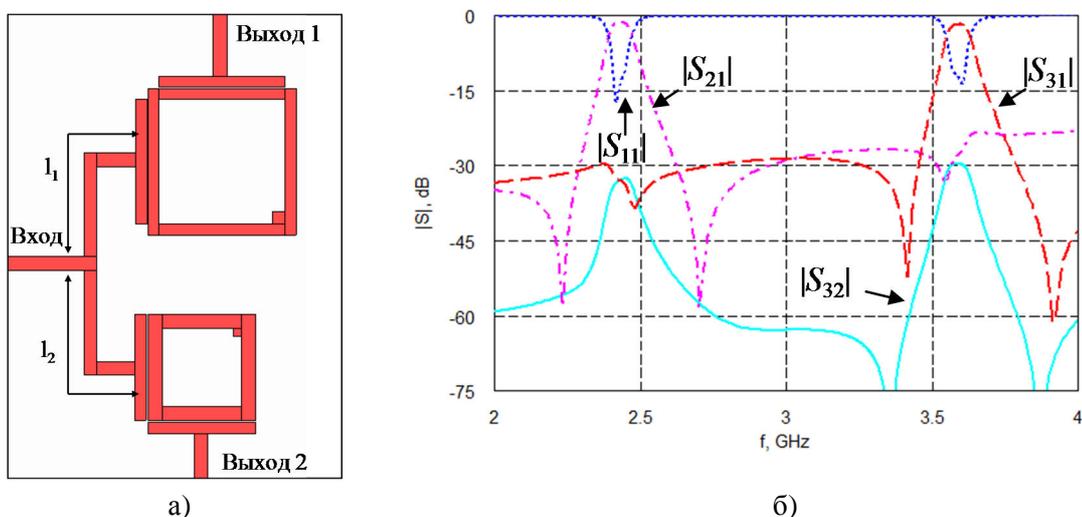


Рисунок 3.

Элементы возбуждения кольцевого двухмодового резонатора традиционно представляют собой четвертьволновые отрезки линий передачи (рис. 1-а). Место включения подводящих линий обычно выбирается в центре четвертьволновых элементов возбуждения [3-5], т.е на расстоянии  $b = 3/8 \lambda_g$  от сечения включения неоднородности, что приводит к симметричному расположению нулей передачи относительно резонансной частоты как показано на рис. 4 и рис. 3-б.

Изменение места включения подводящих линий позволяет изменять положение нулей передачи: увеличение расстояния  $b$  приводит к их смещению вниз по частоте, в то время как уменьшение расстояния между сечениями включения подводящих линий и неоднородности ведет к сдвигу нулей передачи вверх по частоте (рис. 4). При этом центральная частота и ширина полосы пропускания практически не изменяются.

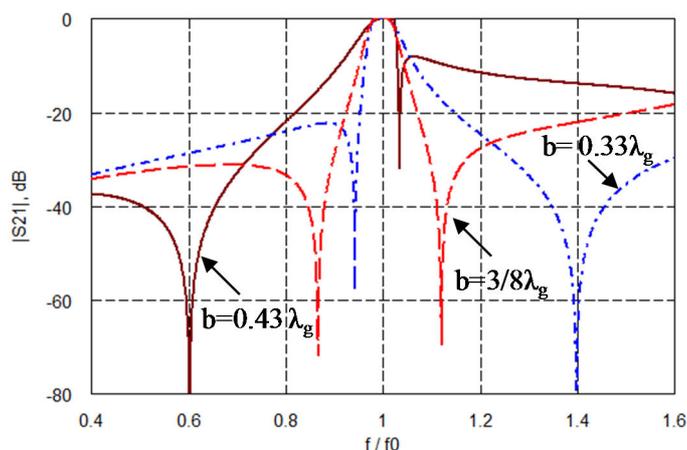


Рисунок 4.

Применение данного подхода позволило разработать два двухзвенных полосно-пропускающих фильтра с несимметричным положением нулей передачи для использования

в составе дуплексера. Для фильтра с полосой пропускания 2,4–2,5 ГГц и нулем передачи на частоте 3,4 ГГц расстояние до места включения подводящей линии составляет  $b = 0,34 \lambda_g$ . В свою очередь выбор  $b = 0,4 \lambda_g$  для фильтра с полосой пропускания 3,4–3,5 ГГц позволил получить нуль передачи на частоте 2,6 ГГц.

Оба фильтра реализованы на многослойной керамической подложке из LTCC Heraeus ST 802 ( $\epsilon_r = 8$ ,  $\text{tg}(\delta) = 0,0025$ ). Результаты электродинамического моделирования АЧХ разработанных фильтров приведены на рис. 5 для структур без потерь (пунктир) и с потерями (сплошные линии). Учитывались потери в диэлектрике и в проводниках, имеющих толщину 12 мкм. Поверхностное сопротивление проводников принималось равным 3,5 мОм/квадрат, что соответствует использованию проводящей пасты типа Heraeus TC 7303. Потери, вносимые каждым фильтром в своей полосе пропускания, не превышают 2 дБ. Уровень ослабления в полосе пропускания другого фильтра составляет не менее 35 дБ.

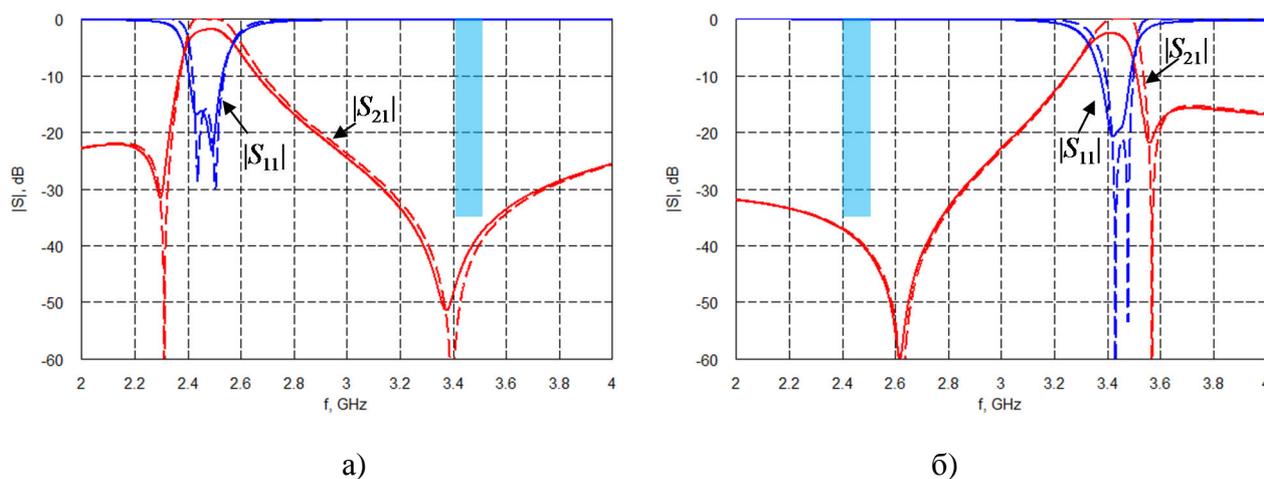
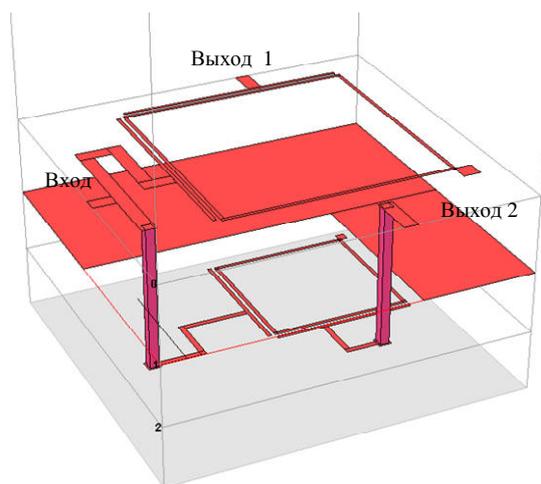


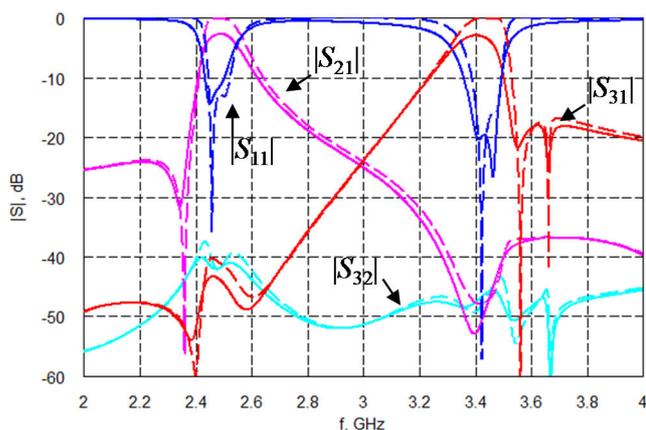
Рисунок 5.

Разработанные фильтры были объединены в составе дуплексера (рис. 6-а). С целью уменьшения площади, занимаемой устройством, фильтры расположены в разных слоях друг на другом. Для исключения паразитных связей между элементами фильтров, которые способны уменьшить уровень развязки между каналами, фильтры отделены при помощи металлизированного заземленного экрана, расположенного в одном из внутренних слоев многослойной интегральной схемы дуплексера. Часть промежуточного экрана на рис. 6-а удалена, чтобы был виден фильтр, расположенный ниже экрана. Для коммутации со входом и выходом этого фильтра используются переходные металлизированные отверстия диаметром 400 мкм. Габаритные размеры дуплексера составляют  $20 \times 21 \times 1,95 \text{ мм}^3$ .

АЧХ дуплексера, полученные путем электродинамического моделирования многослойной структуры без учета потерь (пунктир) и с потерями (сплошные линии), представлены на рис. 6-б. Использование фильтров с нулями передаточной характеристики вблизи полосы частот соседнего канала, позволило увеличить уровень развязки до 40 дБ.



а)



б)

Рисунок 6.

Библиографический список

1. Холодняк, Д.В. Синтез фильтров с несимметричными частотными характеристиками для антенных разделителей, реализуемых по технологии многослойных интегральных схем СВЧ / Д.В. Холодняк, А.В. Симин, А.В. Лапшин, И.Б. Вендик // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ", серия "Радиоэлектроника и телекоммуникации". – 2004. – В. 1. – С. 47-55.
2. Simine, A. Design of quasi-lumped-element LTCC filters and duplexers for wireless communications / A. Simine, V. Piatnitsa, A. Lapshine, E. Jakku, D. Kholodnyak, S. Leppävuori, and I. Vendik // Proc. of 33rd European Microwave Conference, Munich, Germany. – 2003. V. 3. – P. 911-914.
3. Hong, J.-S. Microstrip filters for RF-microwave applications / J.-S. Hong, M.J. Lancaster. – N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 2001. – 457 P.
4. Makimoto M. Microwave resonators and filters for wireless communication / M. Makimoto, S. Yamashita. – Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 162 P.
5. Görür A. Description of coupling between degenerate modes of a dual-mode microstrip loop resonator using a novel perturbation arrangement and its dual-mode bandpass filter applications // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2004. – V. 52, N. 2. – P. 671-677.
6. Radonic, V. Multilayer dual-mode dual-band filter using square loop resonators / V. Radonic, V. Crnojevic-Bengin // Proc. of 40th European Microwave Conference, Paris, France, – 2010. – P. 1245-1248.
7. Xu, W.Q. UMTS diplexer design using dual-mode stripline ring resonators / W.Q. Xu, M.H. Ho and C.G. Hsu // Electronics Letter/ – 2007 – V. 43, N. 13. – P. 721-722.
8. Симин, А. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига. Часть 1. Технология и элементная база / А. Симин, Д. Холодняк, И. Вендик // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5. – С. 190-196.