

Антенный модуль с интегрированным СВЧ-фильтром для применения в телекоммуникационных сетях

А.М. Сосунов, Т.К. Легкова, Д.Д. Спецакова, А.Г. Алтынников

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе представлена модель фильтрующей антенны с применением технологии интегрированного в подложку волновода (SIW), предназначенная для работы в S-диапазоне частот. Представлены результаты моделирования модели антенного модуля, состоящей из трехзвенного полосно-пропускающего фильтра и щелевой антенны. Приведена методика синтеза параметров фильтр-антенны с требуемой фильтрующей характеристикой.

Ключевые слова: фильтр-антенна, SIW-технология, базовая станция, антенная решетка

1. Введение

Стремительное развитие беспроводных систем связи и спутниковых систем приводит к необходимости создания малогабаритных устройств в планарном исполнении. Для классических систем связи характерно раздельное проектирование полосно-пропускающего фильтра (ППФ) и антенны, а затем объединение этих устройств с помощью 50-Омных цепей питания. Однако такой подход приводит к появлению дополнительных вносимых потерь в СВЧ-тракте, искажению сигнала, особенно на краях полосы пропускания, и увеличению массогабаритных показателей всего антенно-фидерного устройства. На практике, в качестве полосового фильтра наибольшее распространение получили волноводные фильтры, которые обладают большими размерами, особенно в низкочастотном диапазоне, что является существенным недостатком. Одним из решений данной проблемы является использование технологии интегрированного в подложку волновода (SIW-технологии). Главное преимущество такой технологии заключается в возможности интегрирования всех компонентов СВЧ-тракта на одну диэлектрическую подложку. Это позволит объединить фильтр и антенну в один модуль, т.е. выполнить слияние фильтрующих и излучающих свойств в одну конструкцию, что в свою очередь обеспечит минимизацию потерь, помех, размеров, увеличит частотную избирательность, повысит общую эффективность системы и снизит стоимость конечного продукта. За счет хорошего подавления излучения вне полосы пропускания такой модуль может использоваться в многочастотных антенных решетках (АР) базовых станций (БС) с общей апертурой для решения проблем взаимной связи благодаря высокой развязке между различными излучающими элементами без увеличения габаритов антенны [1]. Наибольшее распространение получили SIW фильтр-антенны на однослойных подложках [2–4], однако в литературе также встречаются SIW фильтр-антенны, выполненные на многослойных печатных платах [5–7]. Многослойность структуры позволяет уменьшить габаритные размеры устройства и упростить интеграцию в АР.

В работе представлена модель многослойной фильтр-антенны с использованием SIW-технологии, предназначенная для работы в диапазоне частот Band 7 телекоммуникационных сетей, с коэффициентом усиления 4,8 дБи на центральной частоте 2,655 ГГц и полосой пропускания 70 МГц.

2. Синтез фильтр-антенны

Синтез фильтр-антенны был проведен с применением метода эквивалентных цепей [8]. На рисунке 1 (а) представлена схема ППФ на основе SIW. Резонаторы фильтра представляют собой четвертьволновые отрезки линии передачи, которые отражены на схеме в виде $RnLnCn$ -цепочки, где $n=1, \dots, N$ – порядок фильтра. К-инверторы импеданса отображают связь между соседними резонаторами. На рисунке 1 (б) изображена эквивалентная схема фильтр-антенны, в которой щелевая антенна представлена в виде последовательного $RaLaCa$ -контура. Сопротивление Ra характеризует добротность контура, а индуктивность La и емкость Ca определяют резонансную частоту $f_0=0,5(LaCa)^{-0,5}$.

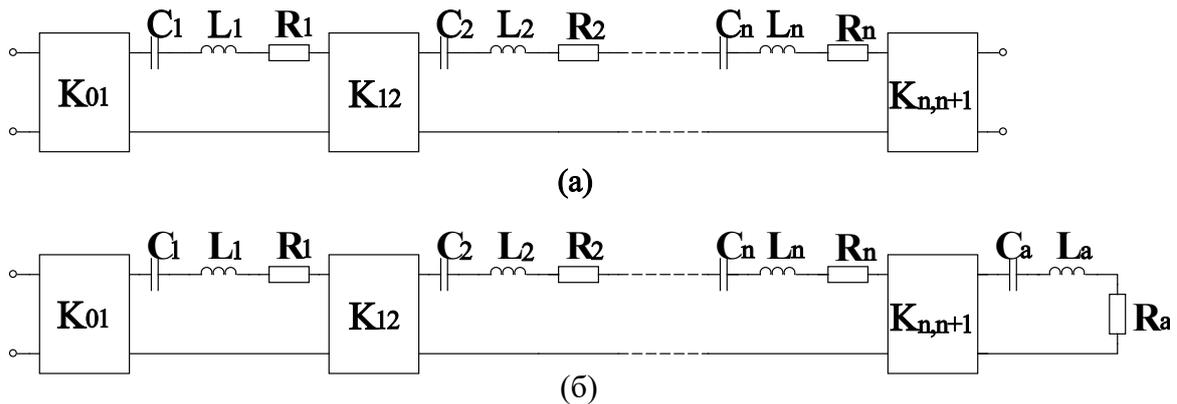


Рисунок 1. Эквивалентная схема: а) SIW-фильтра; б) фильтр-антенны

ППФ был разработан с использованием стандартной методики синтеза фильтров [8] на центральную частоту 2,655 ГГц с полосой пропускания 70 МГц. Внешняя связь первого и последнего резонатора с нагрузкой рассчитывается следующим образом:

$$Q_{ext} = \frac{g_0 g_1 f_0}{f_2 - f_1} = \frac{g_N g_{N+1} f_0}{f_2 - f_1}, \quad (1)$$

где f_0 – центральная частота, f_1 и f_2 – верхняя и нижняя частоты полосы пропускания соответственно, g_N – g-параметры фильтра-прототипа нижних частот. Замещение щелевой антенной одного из портов фильтра не должно исказить его фильтрующую характеристику. Внешняя связь антенны с последним резонатором должна быть такая же, как внешняя связь порта фильтра с первым резонатором. Топология антенны определяют значение Q_{ext} , которое связано с входным сопротивлением структуры $Z_{in}(f)$ соотношением:

$$Q_{ext} = \frac{f_0}{2Z_{in}(f_0)} \left. \frac{d(\operatorname{Im}(Z_{in}))}{df} \right|_{f=f_0}. \quad (2)$$

Для расчета внешней связи с входным портом используется выражение (1). Затем, определив из модели входное сопротивление последнего резонатора с щелевой антенной, вычисляются требуемые параметры для удовлетворения равенства внешних связей с использованием выражения (2).

Трехмерная модель фильтр-антенны и топология каждого из слоев с указанием основных размеров показаны на рисунках 2 (а) и 2 (б) соответственно. Многослойная конструкция состоит из трех диэлектрических подложек WL-CT338 ($\epsilon_r=3,38$) толщиной $H_1=2,4$ мм, $H_2=0,5$ мм и $H_3=0,5$ мм. Стенки резонаторов сформированы с помощью полых металлизированных отверстий. Для минимизации потерь в SIW-

структуре радиус отверстий r и период их следования p должны удовлетворять условиям $r=\lambda_g/10$ и $p=4r$, где λ_g – длина волны в SIW-структуре. С учетом сказанного радиус отверстий и период их следования p равны 0,5 мм и 1 мм соответственно. Внешняя связь осуществляется по магнитному полю за счет короткозамкнутого коаксиального разъема с $D_1=4,22$ мм и $D_2=1,27$ мм. Значение связи регулируется изменением расстояния S_1 . Чем больше значение S_1 , тем сильнее связь. Внутренняя связь между соседними резонаторами осуществляется за счет щелей в общей стенке резонаторов, значение которой регулируется параметрами l_1, w_1, S_2, l_2, w_2 и S_3 . Так как максимум магнитного поля концентрируется вдоль металлических стенок резонаторов, для усиления связи необходимо увеличивать значения l_1, l_2 и уменьшать значения S_2, S_3 .

Щелевая антенна расположена на верхнем слое третьего резонатора. Связь между последним резонатором и антенной регулируется изменением S_4, l_3 и w_3 . Из-за нагрузки последнего резонатора на щелевую антенну вместо порта появляется асимметричность, которая проявляется в разности длин $l_{эфф1}$ и $l_{эфф3}$ резонаторов. Значения параметров разработанной модели в миллиметрах приведены в таблице 1.

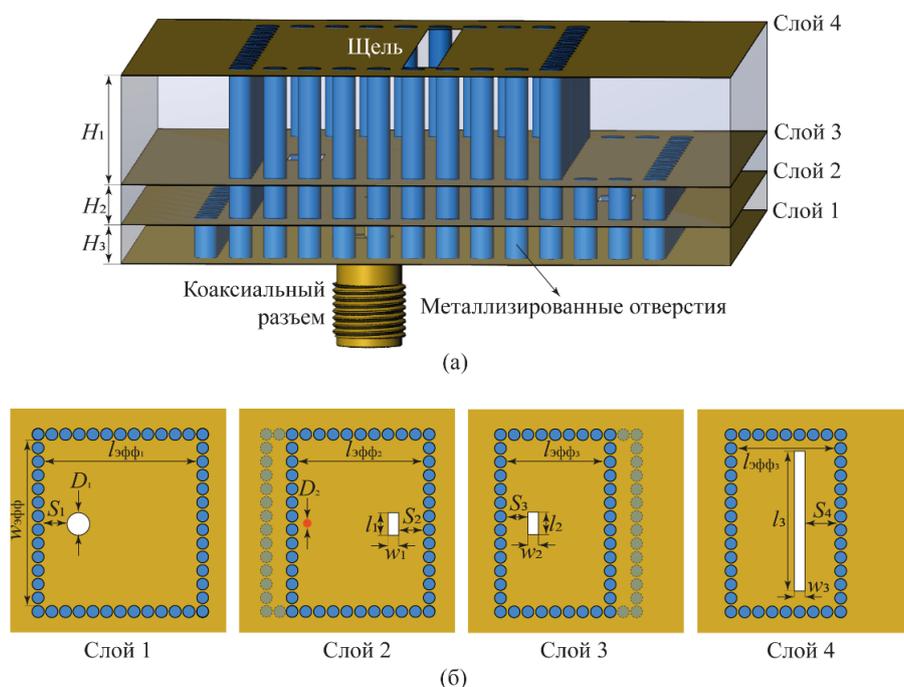


Рисунок 2. Схематичное представление структуры фильтр-антенны: а) трехмерная модель; б) топология каждого из слоев

Таблица 1. Параметры модели фильтр-антенны, значения в мм

S_1	S_2	S_3	S_4	w_1	w_2	w_3	l_1	l_2	l_3	$l_{эфф1}$	$l_{эфф2}$	$l_{эфф3}$	$w_{эфф}$
16,9	2	2	6,5	3	2	3	6,3	6,5	46	37,8	36,2	27,4	47,8

3. Результаты моделирования

Фильтр и фильтр-антенна были разработаны на центральную частоту 2,655 ГГц с полосой пропускания 70 МГц для диапазона частот Band 7 телекоммуникационных сетей. Результаты расчетов трехзвенного фильтра и фильтра-антенны, выполненные с помощью электродинамического моделирования методом конечных элементов,

представлены на рисунке 3. Вносимые потери фильтра составляют $\sim 1,35$ дБ при значении коэффициента отражения не более -15 дБ в полосе. Из рисунка 3 видно, что передаточные характеристики фильтра и фильтра-антенны сходятся. Из этого следует, что интеграция антенны в фильтр не искажает характеристики фильтра. Максимальный коэффициент усиления составляет $4,8$ дБи на центральной частоте, а неравномерность коэффициента усиления в полосе не превышает $0,4$ дБ. Диаграмма направленности в Е и Н-плоскостях нормированного коэффициента усиления фильтр-антенны представлена на рисунке 4.

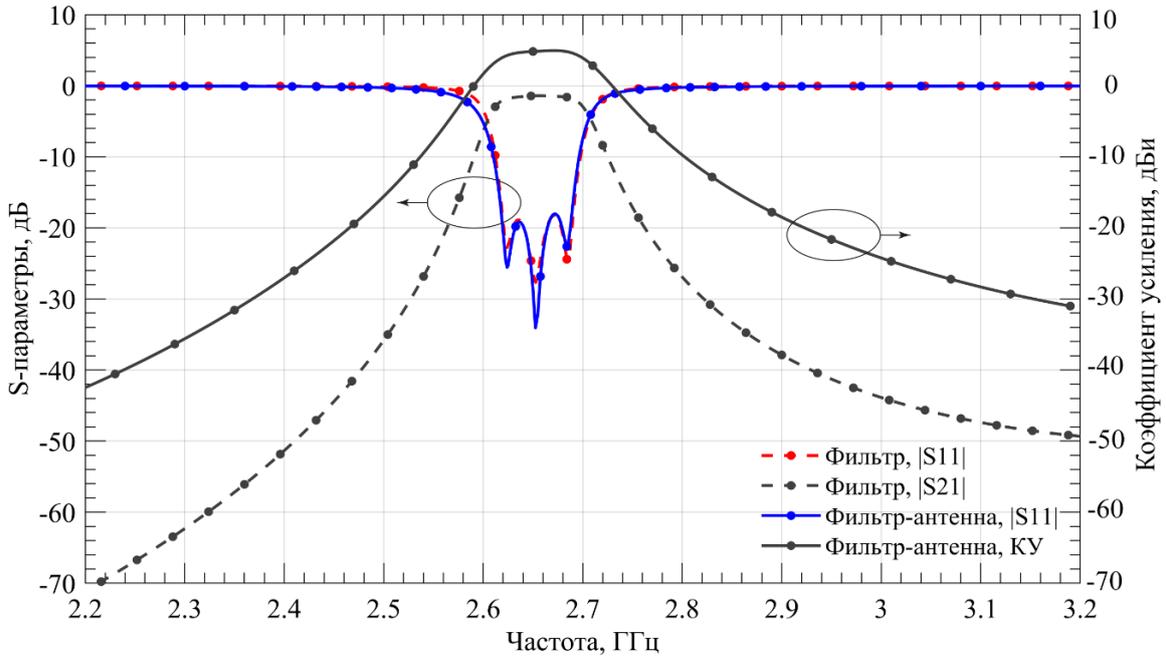


Рисунок 3. Результаты расчетов модели фильтра и модели фильтр-антенны

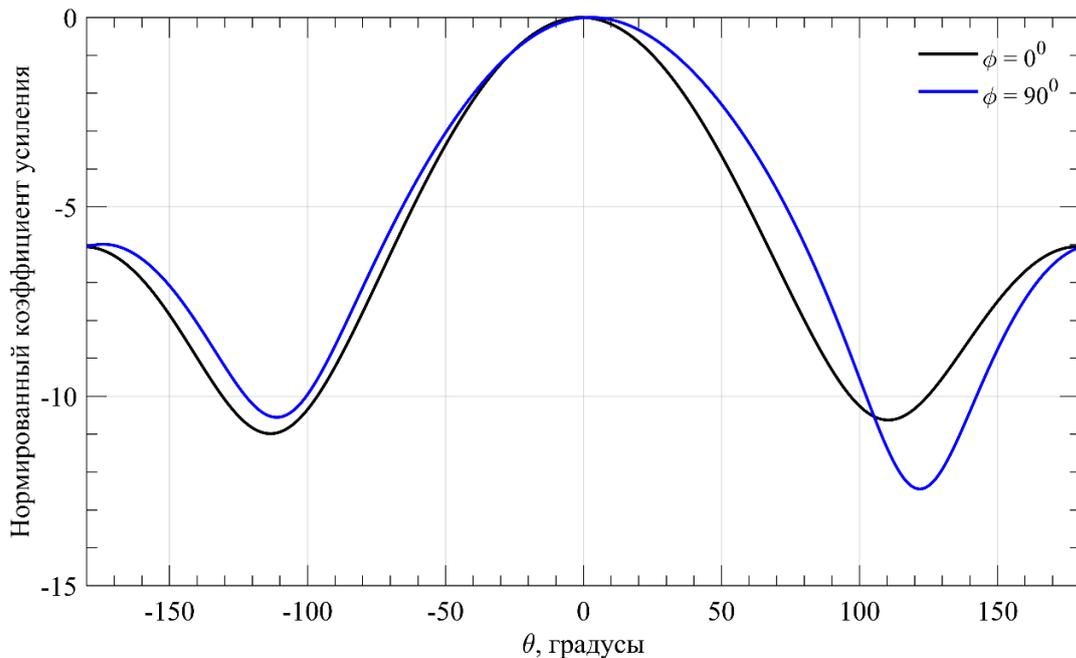


Рисунок 4. Результаты расчета диаграммы направленности нормированного коэффициента усиления модели фильтр-антенны

4. Заключение

В рамках работы продемонстрирована модель трехзвенной SIW фильтр-антенны, с центральной частотой 2,655 ГГц и полосой пропускания 70 МГц. Коэффициент отражения фильтр-антенны в полосе не превышает -15 дБ, а максимальный коэффициент усиления равен 4,8 дБи. Также приведена методика интеграции щелевой антенны в структуру фильтра без ухудшения излучательных и фильтрующих свойств.

Основным отличием представленной модели от аналогов [2–4] является многослойность структуры и простота ее интеграции в многолучевые антенные решетки. Описанная методика разработки фильтр-антенны является универсальной и позволяет рассчитывать такую структуру для любого диапазона частот. Дальнейшая миниатюризация модуля возможна за счет использования подложки с большей диэлектрической проницаемостью.

Работа выполнена при финансовой поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках конкурса «Умник – Проектная команда. Электроника». Соглашение 6ГУПКЭС18/91734 от 27.12.2023 года.

Список литературы

1. Mao C. X. et al. Filtering antennas: Design methods and recent developments //IEEE Microwave Magazine. – 2021. – Т. 22. – №. 11. – С. 52-36.
2. Yusuf Y., Gong X. A new class of 3-D filter/antenna integration with high quality factor and high efficiency //2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – IEEE, 2010. – С. 892-895.
3. Yusuf Y., Gond X. Compact low-loss integration of high-Q 3-D filters and highly efficient slot antennas //IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 2011. – Т. 59. – №. 4. – С. 857-865.
4. Yusuf Y., Gong X. Integrated filter/antennas with high efficiency and increased bandwidth //WAMICON 2011 Conference Proceedings. – IEEE, 2011. – С. 1-4.
5. Zhang Y., Zhang X. Y., Liu Q. H. A dual-layer filtering SIW slot antenna utilizing double slot coupling scheme //IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2021. – Т. 20. – №. 6. – С. 1073-1077.
6. Cheng H., Yusuf Y., Gond X. Vertically integrated three-pole filter/antennas for array applications //IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2011. – Т. 10. – №. 4. – С. 278-281.
7. Yusuf Y., Gong X. A vertical integration of high-Q filters with patch antennas with enhanced bandwidth and high efficiency //2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – IEEE, 2011. – С. 1-4.
8. Cameron R. J., Kudsia C. M., Mansour R. R. Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications. – John Wiles & Sons, 2018.