

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.6>

УДК: 621.372.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОТРАЖАЮЩЕГО ПОЛОСКОВОГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ ТРЕХПРОВОДНОЙ МЕАНДРОВОЙ СВЯЗАННОЙ ЛИНИИ

А.А. Арутюнян, Н.Д. Малютин

**Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40**

Статья поступила в редакцию 28 октября 2025 г.

Аннотация. Проведено моделирование в системе COMSOL Multiphysics и экспериментальное исследование полосно-пропускающего фильтра неотражающего типа, выполненного на основе трехпроводных связанных линий и сосредоточенных RLC-элементов. Для сокращения габаритов фильтра планарно расположенные связанные полоски свернуты в меандр. Третья полоска перекрывает первые две так, что образуется лицевая связь между токонесущими полосками и третьей полоской. Исследовано влияние относительной диэлектрической проницаемости диэлектрического слоя, отделяющего связанные токонесущие полоски от третьего проводника, на характеристики неотражающего фильтра. Подтверждена возможность усиления электромагнитной связи между связанными полосковыми линиями за счёт применения трехпроводной структуры для построения неотражающих полосно-пропускающих фильтров. Определено, что соотношение относительных диэлектрических проницаемостей подложек в конструкции неотражающего фильтра существенно влияет на частотные характеристики устройства. Наилучшие частотные характеристики коэффициента передачи и возвратных потерь получены при соотношении

диэлектрических проницаемостей в диапазоне 0,64-0,78. Подход, применённый в настоящей работе, позволил уменьшить габариты фильтра в 2 раза. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных измерений показало совпадение параметров фильтров в полосе пропускания.

Ключевые слова: полосно-пропускающий фильтр, фильтр неотражающего типа, меандровые линии, частотные характеристики, численное моделирование.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2023-0014 от 16.01.23.

Автор для переписки: Арутюнян Артуш Арсенович, arutyunyan18@mail.ru

Введение

В работе [1] теоретически и экспериментально исследован новый класс фильтров с низким уровнем отражения внеполосных частот. Такие устройства получили название неотражающих фильтров (НФ). В упомянутой работе НФ проектировались на основе дискретных RLC-элементов, что существенно снижало возможности их применения на частотах выше 200-500 МГц. В дальнейшем схемы неотражающих или квази-поглощающих фильтров стали выполнять с применением связанных полосковых линий [2,3], что существенно расширяло их возможные применения [4,5]. В работах [6,7] были представлены алгоритмы и программы анализа и синтеза устройств на основе распределенно-сосредоточенных цепей, применяемых в неотражающих фильтрах, основывающиеся на применении метода автономных блоков. Эти работы позволили построить модели неотражающих фильтров в рамках концепции распространения в связанных полосковых линиях квази-Т волн. Было отмечено расхождение результатов моделирования с экспериментальными данными на высоких частотах. Поэтому была поставлена задача электродинамического моделирования НФ на основе полосковой трехпроводной связанной линии (ТСЛ) в системе COMSOL Multiphysics.

Связанные полосковые линии (СПЛ) в работах [3-7] выполнялись для получения необходимой связи 3 дБ с расположением проводников на горизонтальной и вертикальной подложках. Такая конструкция достаточно сложна в изготовлении. Применение трехпроводных связанных линий с сильной связью между третьей полоской и планарно расположенными токонесущими проводниками [8,9] позволяет улучшить технологичность конструкции и получить 3 дБ связь между полосами. В [8] рассматривается направленный ответвитель на основе таких связанных линий с 3 дБ связью в интегральном исполнении. В работе [9] трехпроводные связанные линии используются для создания фильтра неотражающего типа. Однако примененная в [9] топология СПЛ, на основе которых разрабатывался неотражающий фильтр, на частотах до 1 ГГц имела большие габариты. Уменьшение габаритных размеров возможно применением топологии СПЛ в виде меандра [10-13].

Цель данной статьи – представить результаты решения задачи электродинамического моделирования и разработки НФ на основе трехпроводной меандровой СПЛ с улучшенными технологическими показателями и уменьшенными габаритами.

1. Моделирование неотражающего полосно-пропускающего фильтра

Прототипом исследуемого неотражающего фильтра является НФ, описанный в работе [9], который построен на трехпроводной структуре связанных линий с топологией однородного прямолинейного отрезка. Уменьшение габаритов конструкция фильтра в нашей работе достигается выполнением топологии трехпроводной полосковой линии в виде меандра. Меандровые линии (МЛ) даже при одной токонесущей полоске представляются в виде отрезков связанных линий, число которых составляет $2n$ или $2n + 1$, где n – число витков меандра. Исследованию МЛ посвящено большое число публикаций, например, [10-15]. При свертывании полосковых линий в виде меандра возникает обогащение спектра коэффициентов распространения и соответственно форм собственных колебаний. Эти явления могут быть препятствием для получения заданных

частотных характеристик, либо наоборот – позволяют достигать новых полезных качеств. При выборе конструкции трехпроводной меандровой связанной линии (ТМСЛ) было принято решение применить топологию проводников со слабой связью между соседними ветвями меандра (рис. 1). Конструкция НФ на основе меандровой трехпроводной линии включает: 1, 2 – планарно расположенные токонесящие связанные полосы; 3 – подложку с ϵ_{r1} ; 4 – третью полосу с лицевой связью между полосками 1 и 2 и конформно повторяющую их форму; 5 – подложку (диэлектрическую полосу) с ϵ_{r2} , выполненную в виде полосы в форме меандра; 6 – заземляемое основание; 7 – RLC-цепь, образующую буферные резонансные нагрузки [4].

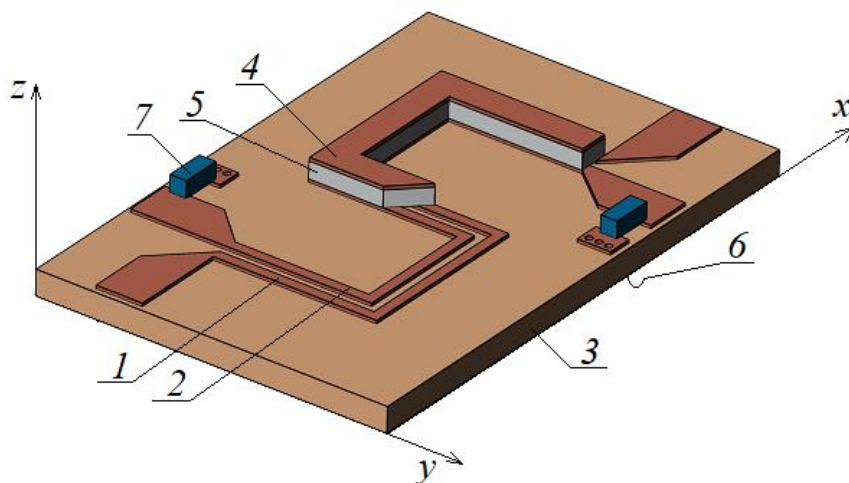


Рис. 1. 3D-модель трехпроводной меандровой связанной линии в конструкции неотражающего фильтра.

Поперечные сечения ТМСЛ по осям x , y изображены на рис. 2. Рис. 2а показывает сечение $x = \text{const}$ перемычек между ветвями меандра. Позиции 1-6 соответствуют обозначениям на рис. 1 и описанию к нему. На рис. 2б приведено сечение $y = \text{const}$ ветвей полосковой меандровой структуры. Как видим, в этом сечении образована многосвязная полосковая структура, состоящая из $3n$ полосок ($n = 3$) [16]. Группы полосок отделены зазором $r \gg s$, в результате чего связь между соседними ветвями меандра, составленными полосками 1, 2 и 4, значительно слабее, чем между третьей полоской 4 полосками 1, 2. При этом продольный размер платы уменьшается в 3 раза.

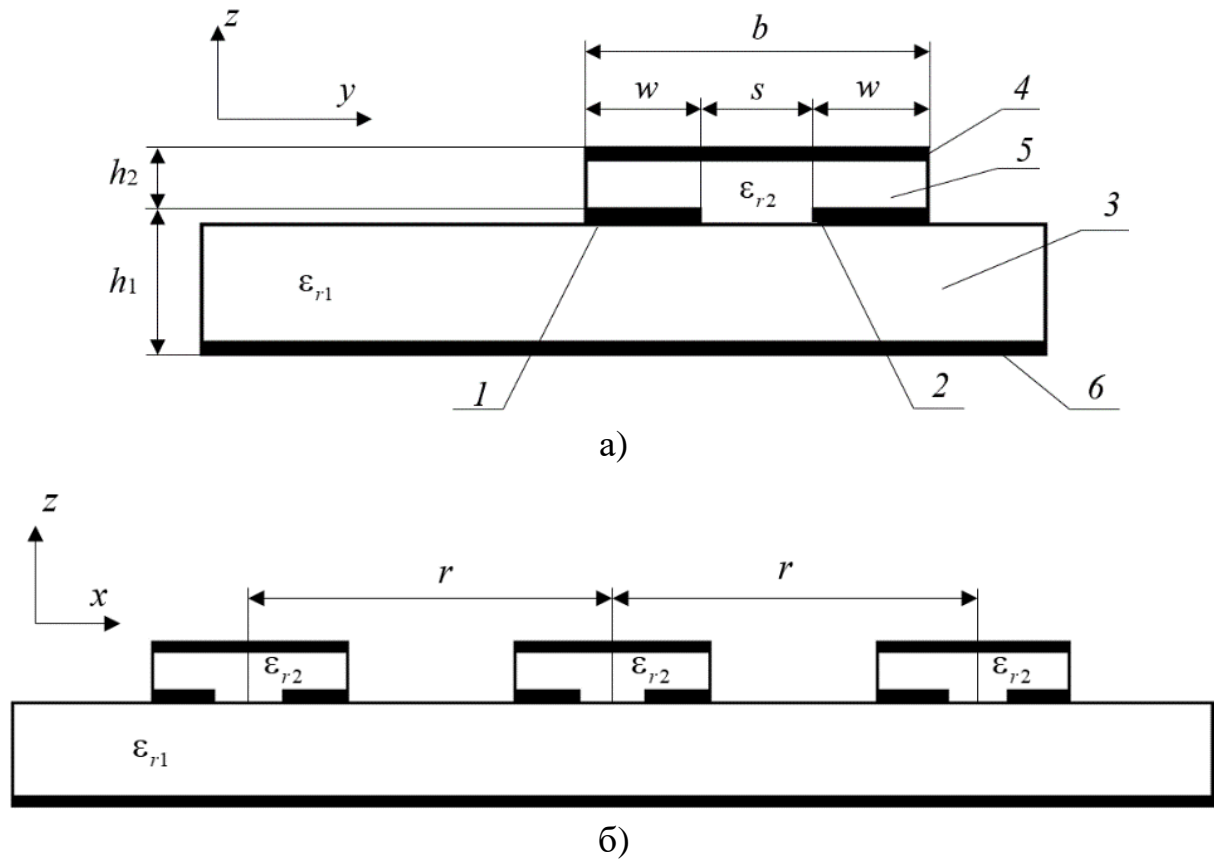


Рис. 2. Поперечные сечения меандровой трёхпроводной связанной линии.

В качестве базового варианта конструкции ТМСЛ были взяты размеры токонесущих полосок 1 и 2 $w = 0,6$ мм, зазора между ними $s = 0,6$ мм (рис. 2а). Планарные связанные полоски расположены на диэлектрической подложке толщиной $h_1 = 1,5$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{r1} = 4,5$. Третья полоска размещена на диэлектрической ленте с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_{r2} и толщиной $h_2 = 0,1$ мм. В процессе исследования изменялся материал ленты с целью оценки влияния параметров диэлектрической полоски 5 (рис. 2а) на характеристики НФ. Длина третьей полоски совпадает с длиной меандровых токонесущих линий и равна $l = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 = 45$ мм, а её концы находятся в режиме холостого хода, что показано на эквивалентной схеме рис. 3.

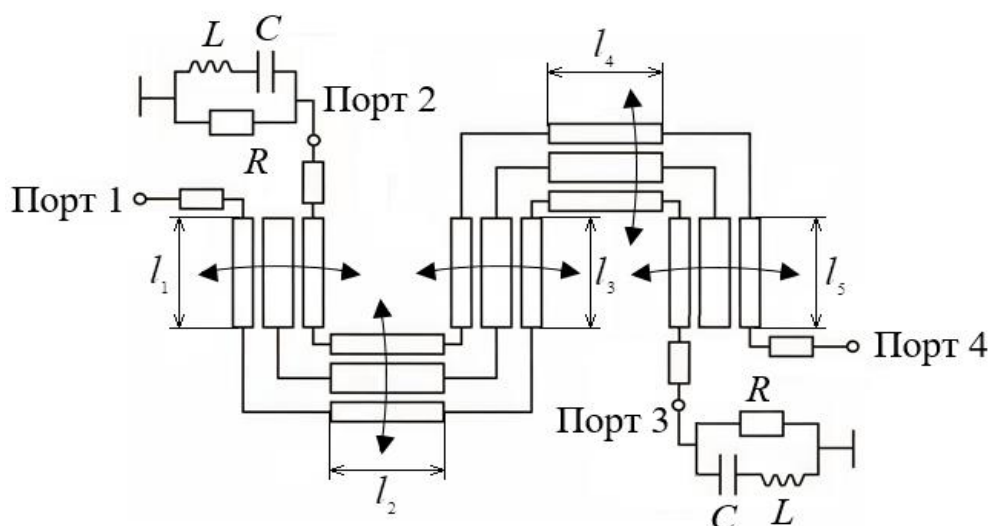


Рис. 3. Эквивалентная схема неотражающего полоскового фильтра на основе ТМСЛ.

Токонесущие полоски соединены с портами 1-4 через подводящие линии. В эквивалентной схеме НФ порты 2 и 3 нагружены на двухполюсники, образованные RLC-цепями с модулем входного импеданса $|Z_H(f)|$. Эти двухполюсники названы буферными резонансными нагрузками (БРН) [4,5]. В работах [5-7] показано, что модуль импеданса БРН $|Z_H(f)|$ для получения характеристики НФ как полосно-пропускающего фильтра с низким уровнем отражения (не хуже минус 10 дБ) в широкой полосе частот должен соответствовать рис. 4. Это возможно при условии равенства резонансной частоты LC-контура f_0 центральной частоте полосы пропускания f_{01} НФ, а также шунтирования LC-контура сопротивлением $R = 50$ Ом. Частотно-зависимые нагрузки в портах 2 и 3 ТМСЛ с такими особенностями частотной зависимости $|Z_H(f)|$, как показано при моделировании [6,7] и экспериментально [9], позволяют сформировать характеристику НФ полосно-пропускающего типа.

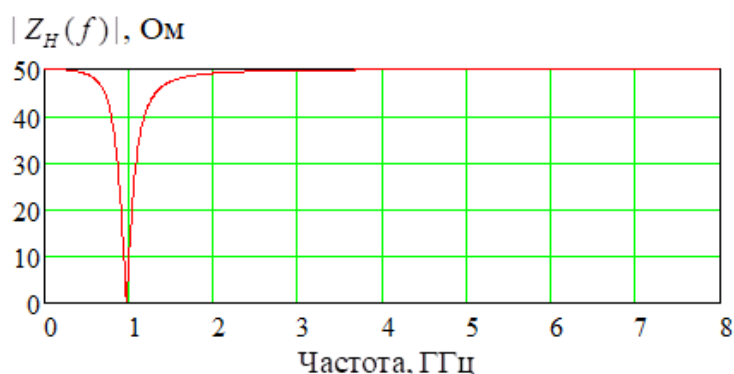


Рис. 4. Частотная зависимость модуля импеданса БРН $|Z_H(f)|$.

Наличие третьей полоски шириной $b = 2w + s$, связанной с токонесущими полосками, усиливает их электромагнитное взаимодействие, поскольку эта полоска находится под плавающим потенциалом. Конструкция связанных линий, один из проводников которых находится под плавающим изменяющимся потенциалом, впервые применялась в работе [17] для управления параметрами отрезка связанных линий в виде меандровой линии, связанной со сплошной полоской. Показанная на рис. 3 схема также содержит полоску с плавающим потенциалом, но ее функциональное назначение ограничено и состоит в увеличении связи между двумя планарно расположенными полосками. Без учета электромагнитной связи между ветвями меандра в общем случае схему рис. 3 следует рассматривать как двенадцатиполюсник. При этом, если третья полоска не имеет нагрузок на концах, схема приводится к восьмиполюснику с портами 1-4. В данной работе проведено электродинамическое моделирование 3D конструкции (рис. 1) в системе COMSOL Multiphysics с последующим сравнением результатов квазистатического анализа НФ с эквивалентной схемой рис. 3 и без учета связи между ветвями меандра [6,7].

Как уже отмечалось, при моделировании в среде COMSOL Multiphysics была разработана 3D-модель НФ (рис. 1). Рассчитывались конструкции НФ для трех вариантов материалов диэлектрической полоски 5 (рис. 2а): FR-4, RO3003 и RO4350B. На рис. 5 представлены результаты моделирования частотных характеристик неотражающего фильтра. Сравнение частотной зависимости коэффициента передачи $|S_{41}|$ (рис. 5а) для разных материалов показывает

совпадение характерных особенностей частотной зависимости вносимых потерь на частотах запираия и идентичность $|S_{21}|$ в полосе пропускания. Если ограничиваться значением $|S_{41}|$ на частотах запираия -10 дБ, лучший показатель в полосе частот до 6 ГГц дает применение RO3003 либо RO4350B. Коэффициент отражения $|S_{11}|$ макета НФ с применением RO4350B меньше -10 дБ в той же полосе частот (см. рис. 5б). Отсюда следует, что однородность диэлектрика в поперечном сечении полосковой структуры при использовании материала FR4 не дает возможность улучшить характеристики неотражающего фильтра на основе ТМСЛ.

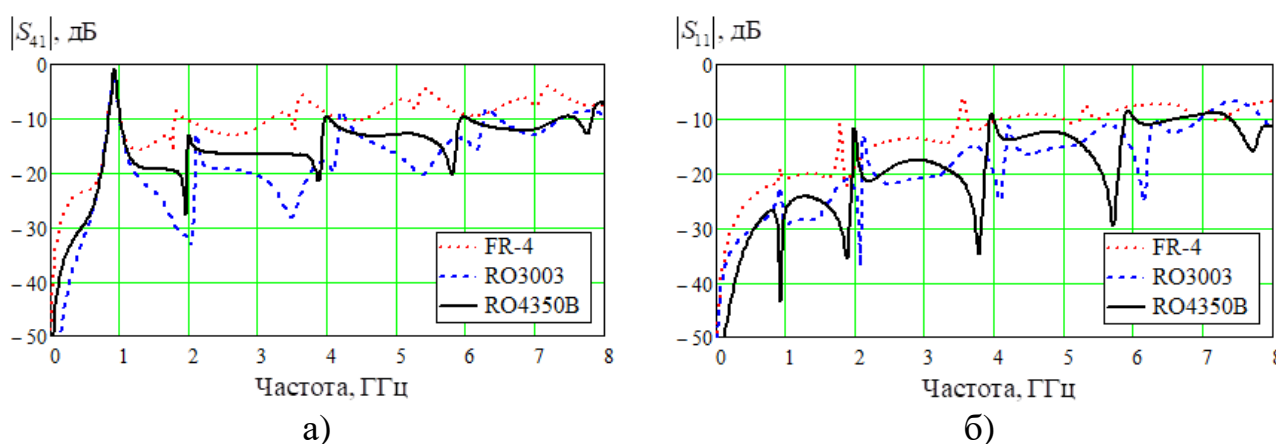


Рис. 5. Результаты моделирования частотных характеристик НФ при разных материалах: а) коэффициента передачи $|S_{41}|$; б) коэффициента отражения $|S_{11}|$.

На рис. 6 показаны частотные зависимости модулей коэффициентов матрицы рассеяния $|S_{21}|$ (см. рис. 6а) и $|S_{31}|$ (см. рис. 6б) неотражающего фильтра как восьмиполюсника при анализе 3D-модели в среде COMSOL Multiphysics. Графики $|S_{21}|$, $|S_{31}|$ показывают типичное взаимодействие отрезков связанных линий, но на частоте пропускания НФ 1 ГГц мы видим особенность $|S_{21}|$, $|S_{31}|$, объясняемую как следствие максимального отражения от портов 2 и 3. Это следует также из сопоставления рис. 5 и рис. 6, на которых наблюдается устремление $|Z_H(f)|$ к нулю и соответственно уменьшение $|S_{21}|$, $|S_{31}|$ резонансного характера на совпадающей частоте. В полосе запираия фильтра

наблюдается перекачка электромагнитной энергии между портами 2 и 3 вследствие достаточно сильной связи между полосками 1 и 2 через взаимодействие с полоской 3 (рис. 2).

Из показанных графиков можно заключить, что наилучшие характеристики неотражающих фильтров достигаются при отношении диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_{r2}/\varepsilon_{r1} = 0,64 \dots 0,78$. Это связано с тем, что фазовые скорости синфазных и противофазных волн при указанном отношении диэлектрических проницаемостей выравниваются, и перекачка энергии между связанными линиями происходит примерно в равных долях (см. рис. 5 и рис. 6). В диапазоне частот до 4 ГГц коэффициент отражения $|S_{11}|$ и коэффициент передачи $|S_{41}|$ на внеполосных частотах не хуже -10 дБ (см. рис. 5).

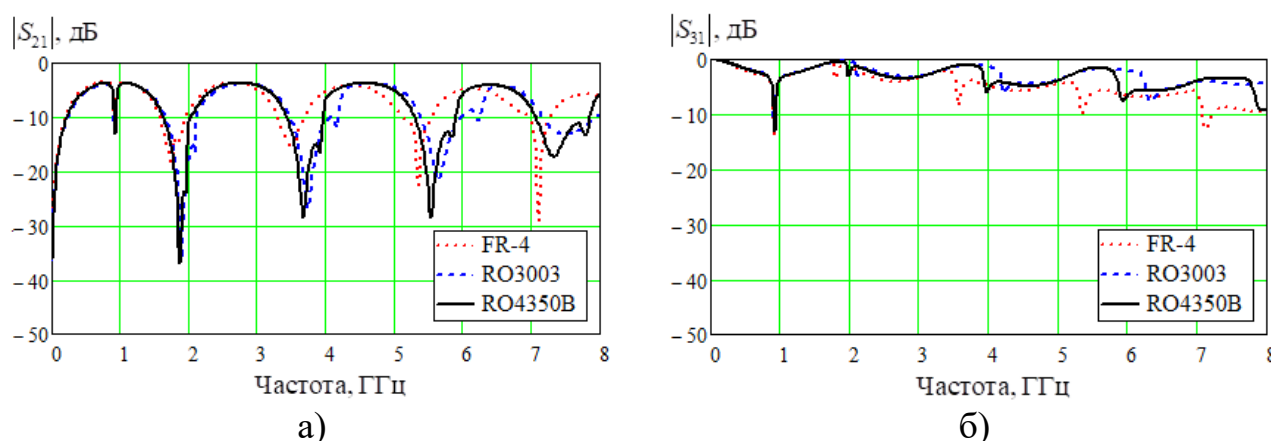


Рис. 6. Результаты моделирование частотных характеристик НФ:

а) коэффициента передачи $|S_{21}|$; б) коэффициента $|S_{31}|$.

Из полученных графиков зависимости $|S_{21}|$ и $|S_{31}|$ (см. рис. 6а и рис. 6б) следует существование перекачки энергии из порта 1 в порты 2 и 3 таким образом, что на резонансной частоте RLC-цепи происходит передача энергии электромагнитных волн синфазного и противофазного типов [15] в порт 4, а на других частотах мощность поглощается на сопротивлениях R (рис. 3). В этом состоит механизм формирования полосно-пропускающих свойств фильтра с низким уровнем отражений в широкой полосе частот.

Проведено сравнение частотных характеристик неотражающих фильтров с топологией полосок в виде прямолинейного отрезка и меандра с одинаковой длиной связанных полосок. Результаты численного эксперимента приведены на рис. 7. Частотная зависимость коэффициента передачи $|S_{41}|$ (рис. 7а) НФ с прямолинейной топологией ТСЛ имеет меньшую изрезанность по сравнению с топологией НФ в виде меандра. Это связано с двумя причинами, первая из которых существование связи между параллельными проводниками витков меандра, а вторая – появление неоднородностей в местах перегиба полосок. В полосе прозрачности $|S_{41}|$ НФ практически не изменяется.

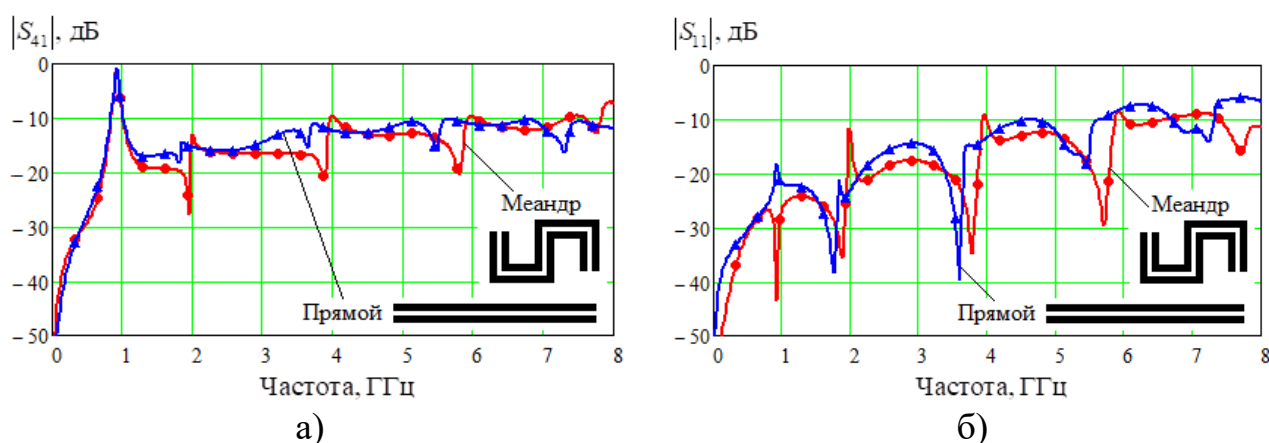


Рис. 7. Сравнение частотных характеристик коэффициентов передачи $|S_{41}|$ (а) и коэффициентов отражений $|S_{11}|$ (б) НФ для топологии ТСЛ в виде прямолинейного отрезка прямой ТСЛ и меандровой ТСЛ.

Уменьшение $|S_{41}|$ на частотах приблизительно 2, 4, 6 ГГц не представляется существенным. Сравнение частотных зависимостей $|S_{11}|$ (рис. 7б) показывает ограничение возвратных потерь на уровне, близком к 10 дБ, для топологии полосок в виде прямолинейного отрезка ТСЛ до частоты 5,5 ГГц, а для топологии в виде меандра – до 4 ГГц.

Таким образом, применение меандровой трехпроводной связанной линии, обеспечивает упрощение технологии сборки конструкции и уменьшение габаритов неотражающего фильтра в 2 раза при оговоренном изменении частотных характеристик.

2. Экспериментальные результаты

Проведены экспериментальные исследования НФ с материалом диэлектрической полосы RO4350B, толщиной $h_2 = 0,1$ мм и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{r2} = 3,48$.

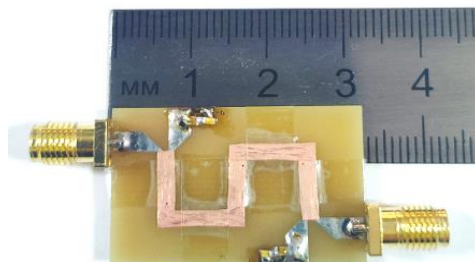


Рис. 8. Фотография НФ.

На рис. 8 показана фотография НФ, эквивалентная схема которого соответствует рис. 3. Диэлектрическая полоска перекрывает планарно расположенные токонесущие полоски в соответствии с рис. 2. В макете третья полоска повторяла топологию связанных полосок и прижималась механически скотчем. Получены экспериментальные результаты сравнения частотных характеристик измерений и моделирования коэффициентов отражения $|S_{11}|$ и коэффициентов передачи $|S_{41}|$ (рис. 9).

Из графиков рис. 9 видно, что центральная частота f_0 при экспериментальном измерении и моделировании составили $f_{0_изм} = 0,92$ ГГц и $f_{0_мод} = 0,92$ ГГц соответственно. При этом полоса пропускания по уровню 3 дБ имеет существенную разницу и составляет при измерении 17 %, при моделировании 6 %.

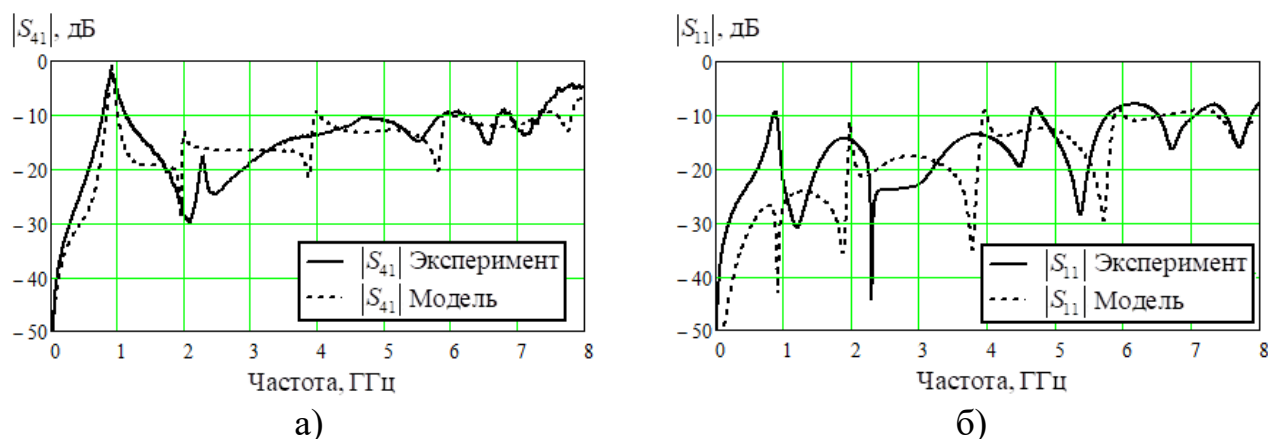


Рис. 9. Сравнение частотных характеристик измеренных и рассчитанных коэффициентов передачи $|S_{41}|$ (а) и отражения $|S_{11}|$ (б).

Полученное расхождение ширины полосы пропускания, как показало дополнительное моделирование, вызвано наличием паразитных параметров сосредоточенных RLC-элементов и неидентичностью параметров БРН в портах 2 и 3. Экспериментально полученные коэффициенты отражения и передачи на внеполосных частотах удовлетворяют условиям не хуже минус 10 дБ в диапазоне от 0,01 до 4 ГГц.

Заключение

Подтверждена возможность усиления электромагнитной связи между связанными полосковыми линиями за счёт применения трехпроводной структуры для построения неотражающих полосно-пропускающих фильтров. Определено, что соотношение относительных диэлектрических проницаемостей подложек в конструкции НФ существенно влияет на частотные характеристики НФ. Наилучшие частотные характеристики коэффициента передачи и возвратных потерь получены при соотношении $\varepsilon_{r2}/\varepsilon_{r1} = 0,64...0,78$, где ε_{r1} – проницаемость подложки с планарно расположенными полосками, ε_{r2} – проницаемость диэлектрической ленты, на которой выполнена третья полоска. Подход, применённый в настоящей работе, позволил уменьшить габариты фильтра в 2 раза. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных измерений показало совпадение основных параметров: единственной полосы пропускания на заданной частоте с потерями 2,5 дБ; коэффициентов отражения в широкой

полосе частот от 0,01 до 4,5 ГГц не хуже -10 дБ; коэффициентов передачи в полосах запырания от -30 дБ до -10 дБ.

Полученные результаты открывают новые возможности для снижения возвратных потерь и увеличения подавления внеполосных колебаний в межкаскадных соединениях систем связи. Это достигается использованием неотражающих фильтров СВЧ, что способствует повышению электромагнитной совместимости и помехоустойчивости современных коммуникационных систем.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2023-0014 от 16.01.23.

Литература

1. Morgan M. A., Boyd T. A. Theoretical and experimental study of a new class of reflectionless filter //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2011. – Т. 59. – №. 5. – С. 1214-1221. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2113189>.
2. Wu X., Li Y., Liu X. High-order dual-port quasi-absorptive microstrip coupled-line bandpass filters //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – Т. 68. – №. 4. – С. 1462-1475. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2955692>.
3. Малютин Н.Д., Лощилов А.Г., Ладур А.А. Цепочки комбинированных фильтров поглощающего типа // 18-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Крымико'2009): материалы конференции в 2 т. – Севастополь: изд-во “Вебер”. 2008. С. 489 – 490.
4. Распределенно-сосредоточенные цепи и полосковые СВЧ-устройства на их основе: моногр. / А. Г. Лощилов, Т. Т. Чинь, Г.А. Малютин; под ред. проф. Н.Д. Малютина. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – С. 25–27.

5. Лощилов А. Г. Уменьшение возвратных потерь и подавление внеполосных колебаний в межкаскадных соединениях систем связи с помощью неотражающих частотно-селективных цепей СВЧ / А. Г. Лощилов, Н. Д. Малютин, Чинь То Тхань, Г. А. Малютин // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – №. 4. – С. 72–94.
6. Малютин Г. А., Тхань Ч. Т. Алгоритм и программы анализа и синтеза устройств на основе распределенно-сосредоточенных цепей / Г. А. Малютин, Ч. Т. Тхань // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Т. 12. – №. 3. – С. 28–35.
7. Лощилов, А. Г. Применение метода автономных блоков к математическому моделированию СВЧ-устройств, содержащих цепи распределено – сосредоточенного типа / А. Г. Лощилов, Н. Д. Малютин, Т. Т. Чинь // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Т. 12, № 1. – С. 61–67.
8. Banda S., Ogawa H. Multilayer MMIC directional couplers using thin dielectric layers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1995. – Т. 43. – №. 6. – С. 1270-1275, June 1995. <https://doi.org/10.1109/22.390182>.
9. Арутюнян А. А. Моделирование и экспериментальное исследование фильтра неотражающего типа на основе полосковой трехпроводной связанной линии // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2025. – Т. 28. – №. 2. – С. 55-61.
10. Pregla R. Die mäanderleitung als laufzeitausgleichsschaltung // AEÜ. – 1967. – Т. 21. – №. 5. – С. 219.
11. Pregla R. Gruppenlaufzeitausgleich mit Mäanderleitungen für Nachrichtensysteme mit Rundhohlleitern // AEÜ. – 1970. – №. 9. – С. 381.
12. Малютин Н. Д. и др. Полосковые управляемые меандровые линии задержки // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – №. 4 (38). – С. 42-46.

13. Носов А. В. и др. Меандровая линия задержки из двух витков, защищающая от сверхкоротких импульсов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – №. 3 (37). – С. 120-123.
14. Khaleghi A. Dual band meander line antenna for wireless LAN communication // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2007. – Т. 55. – №. 3. – С. 1004-1009. <https://doi.org/10.1109/TAP.2007.891873>.
15. Vishnu K., Menon S. K. Compact MSL Filter Using Meander Line Resonator // 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). – IEEE, 2020. – С. 414-417. <https://doi.org/10.1109/ICCES48766.2020.9137941>.
16. Малютин Н. Д. Многосвязные полосковые структуры и устройства на их основе. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1990. – С. 161.
17. Полосковый фазовращатель. Воробьев П.А., Малютин Н.Д. Авторское свидетельство SU 432843 A1, 05.07.1975. Заявка № 1781634/26-9 от 03.05.1972.

Для цитирования:

Арутюнян А.А., Малютин Н.Д. Моделирование и экспериментальное исследование неотражающего полоскового фильтра на основе трехпроводной меандровой связанной линии. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.6>