

УДК 621.372

Уменьшение возвратных потерь и подавление внеполосных колебаний в межкаскадных соединениях систем связи с помощью неотражающих частотно-селективных цепей СВЧ

Лощилов А. Г., Малютин Н. Д., Чинь То Тхань, Малютин Г. А.

Постановка задачи: совершенствование систем противодействия средствам связи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и других авиационных средств в настоящее время стало весьма актуальной задачей. Это, в частности, связано с тем, что постоянно увеличивается мощность излучаемых высокочастотных импульсов (до сотен мегаватт). При воздействии радиочастотных широкополосных сигналов надежным способом защиты служит применение частотно-селективных фильтров. Это позволяет выделить полезные составляющие частотного спектра и отразить нежелательные. Однако в данном случае отраженные сигналы могут быть причиной порождения интермодуляционных помех, особенно в устройствах с нелинейными элементами. Создание неотражающих фильтров (НФ) позволяет решить задачу снижения нежелательных отражений. **Целью работы** является моделирование и разработка неотражающих полосно-пропускающих фильтров, имеющих следующие особенности: сохранение свойств частотно-селективной цепи при низком уровне возвратных потерь, как в полосе прозрачности, так и на частотах запираания с перекрытием не менее 1:4, рассмотреть применение таких фильтров в составе с традиционными отражающими фильтрами для демонстрации эффектов снижения возвратных потерь в диапазоне частот запираания и подавления паразитных полос пропускания при каскадном включении узлов. **Используемые методы:** моделирование и разработки неотражающих полосно-пропускающих фильтров осуществляется на основе базовой схемы неотражающих фильтров, содержащей отрезок связанных линий с нагрузками в диагональных портах в виде RLC-цепей из одинаковых последовательных LC-контуров, шунтированных сопротивлением. При разработке модели НФ применен метод декомпозиции на более простые блоки с распределенными и сосредоточенными параметрами. Разработка основывается на данных численного моделирования с последующей экспериментальной проверкой. **Новизна:** элементом новизны моделирования является представленное решение задачи анализа по известным параметрам полосковой структуры. Схема и конструкция защищены патентами на изобретения. Их новизна основывается на особенностях взаимодействия схемы сосредоточенных RLC-цепей и связанных линий, формирующих волновой процесс. **Результат:** решены задачи анализа и экспериментального исследования полосковых полосно-пропускающих фильтров неотражающего типа. Исследован механизм формирования частотной характеристики неотражающих фильтров, состоящий в трансформации частотной зависимости импеданса нагрузок на сосредоточенных элементах в антипод этой характеристики с применением предложенной схемы и конструкции. При этом полосно-пропускающие фильтры, содержащие распределенный базовый элемент в виде связанных линий, имеют единственную полосу пропускания и возвратные потери на уровне -10 дБ на внеполосных частотах. Показан эффект от применения неотражающих частотно-селективных цепей на основе связанных полосковых линий и RLC-элементов, состоящий в уменьшении возвратных потерь и подавлении внеполосных колебаний в межкаскадных соединениях в раз-

Библиографическая ссылка на статью:

Лощилов А. Г., Малютин Н. Д., Чинь То Тхань, Малютин Г. А. Уменьшение возвратных потерь и подавление внеполосных колебаний в межкаскадных соединениях систем связи с помощью неотражающих частотно-селективных цепей СВЧ // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 4. С. 72-94. DOI: 10.24411/2410-9916-2024-4-72-94

Reference for citation:

Loschilov A. G., Malyutin N. D., Chin To Thanh, Malyutin G. A. Reducing return loss and suppressing out-of-band oscillations in interstage connections of communication systems using non-reflective frequency-selective microwave circuits. Systems of Control, Communication and Security, 2024, no. 4, pp. 72-94 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2024-4-72-94

личных сочетаниях следования неотражающих и отражающих устройств. Рассмотрены варианты каскадного соединения в виде традиционных фильтров и неотражающих фильтров. **Практическая значимость:** неотражающие цепи (фильтры) могут служить в качестве «ловушки» отраженных волн на внеполосных частотах и применяться в аппаратуре для межкаскадной развязки. При этом достигается снижение возвратных потерь в цепях каскадного соединения устройств от значения, близкого к 0, до -16 дБ, а также подавление внеполосных колебаний от -20 до -40 дБ.

Ключевые слова: неотражающие фильтры, связанные полосковые линии, RLC сосредоточенные цепи, каскадное соединение неотражающих и отражающих фильтров.

Актуальность

Стремительное осложнение радиоэлектронной обстановки при организации военной и гражданской связи и управления [1] требует создания новых и совершенствования известных технологий обеспечения электромагнитной совместимости, помехоустойчивости и живучести электронной аппаратуры беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и других авиационных средств. Не менее острой проблемой является уменьшение радиолокационной заметности БПЛА и напротив, обнаружение подобных объектов, имеющих незначительную эффективную поверхность рассеяния [2–5].

Совершенствование систем противодействия средствам связи в настоящее время привело к увеличению мощности излучаемых высокочастотных импульсов до сотен мегаватт [6, 7]. Защита от мощных импульсов достаточно успешно решается с помощью модальных фильтров [8, 9], сущность работы которых заключается в расщеплении импульсов, наводимых во входных цепях аппаратуры, на множество импульсов меньшей амплитуды.

Решение задач электромагнитной совместимости (ЭМС) и помехоустойчивости систем связи и управления при воздействии радиочастотных широкополосных сигналов в значительной мере определяется параметрами частотно-селективных цепей (ЧСЦ). Одной из основных, но не единственной, функцией ЧСЦ является формирование заданной частотной зависимости амплитудно-частотной характеристики в виде вносимого затухания, определяемого через коэффициент $|S_{21}(f)|$ матрицы рассеяния $\mathbf{S}$. Устройства, реализующие эту функцию, – фильтры разных типов, строящиеся на основе добротных резонаторов [10–20]. В полосе частот пропускания такие устройства имеют малые возвратные потери, определяемые коэффициентом $|S_{11}(f)| \rightarrow -\infty$, а на внеполосных частотах должны обеспечивать $|S_{11}(f)| \rightarrow 0$. Назовем этот тип устройств отражающими фильтрами (ОФ). Применение ОФ в радиотехнических системах (РТС) позволяет достичь высоких показателей ЭМС, если возникающие отражения на частотах запираания не сказываются на работе РТС. В недавно опубликованной работе [21] показано, что применение ОФ в понижающих преобразователях дециметрового диапазона приводит к отражению большого количества внеполосных сигналов на входе и выходе системы. Отраженные сигналы генерируют дополнительные продукты интермодуляции, т.к. преобразователи содержат нелинейные цепи. Это приводит к внутрисполосным и внеполосным помехам. Внутрисполосные помехи более разрушительны, чем внеполосные

помехи, поскольку они могут перекрываться с сигналом ПЧ и ухудшать качество сигнала. Перекрытие сигналов ухудшает характеристики приемника, включая величину вектора ошибок (EVM) и соотношение мощности соседнего канала (ACPR).

В исследованиях [22–26] были представлены безотражательные фильтры, позволяющие осуществлять селекцию сигналов в заданной полосе частот пропускания и уменьшать помехи путем поглощения внеполосных гармоник. Возвратные потери таких фильтров на внеполосных частотах $|S_{11}(f)|$ минимальны. Это обеспечивает более чистый внутриполосный спектр. На системном уровне для приемников это имеет важное значение [21].

Подобными характеристиками обладают так называемые модальные фильтры (МФ) [27–29], применяемые для защиты аппаратуры от импульсных сигналов большой амплитуды. Однако МФ не предназначены для работы в режиме частотной селекции, поскольку основное свойство таких фильтров – расщепление воздействующего импульса на несколько импульсов меньшей амплитуды за счет разных фазовых скоростей синфазных и противофазных волн.

В работах [22–26], а также в более ранних [30, 31], были исследованы фильтры нового класса [25], которые получили разные названия: «безотражательные» (reflectionless) [22, 23, 25, 26]; «квази-отражающие» (quasi reflectionless) [24]; «поглощающие» (absorptive) [30, 31].

Далее будем использовать термин неотражающие фильтры (НФ). Деление НФ на разные типы проведено в обзорной статье [32] по способу обеспечения частотно-селективных свойств и получения минимально возможных возвратных потерь, определяемых коэффициентом $|S_{11}|$ матрицы рассеяния $\mathbf{S}$:

- 1) НФ на сосредоточенных элементах;
- 2) НФ с нагруженными отрезками линий передачи;
- 3) НФ на связанных линиях.

Одновременно с разработкой неотражающих фильтров проводятся исследования по применению НФ, например, для улучшения параметров трехпортового понижающего преобразователя для широкополосного многоканального приемника [21]. Показано, что устранение отраженных сигналов позволяет снизить неравномерность усиления и генерацию гармоник, улучшает динамический диапазон приемной системы.

В данной статье показаны возможности снижения возвратных потерь и подавления паразитных полос пропускания в радиотехнических системах с помощью неотражающих частотно-селективных цепей и устройств на их основе. В качестве объекта исследований рассматривается зависимость параметров примененной схемы и конструкции неотражающего фильтра на основе связанных полосковых линий, диагональные порты которых нагружены RLC-цепями на сосредоточенных элементах. Приведены результаты моделирования и экспериментальные данные параметров НФ и его применения совместно с традиционным фильтром отражательного типа.

Постановка задачи

В настоящей работе решается задача применения неотражающих полосковых полосно-пропускающих фильтров, описанных в работах [33-38], для снижения уровня переотражений (возвратных потерь) и подавления паразитных полос пропускания в системах связи. Данный эффект впервые исследуется на примере каскадного соединения НФ и отражающего фильтра. Ставится и решается задача подтвердить посредством численных экспериментов и измерений параметров изготовленных макетов наличие существенного снижения возвратных потерь и подавления внеполосных колебаний с применением НФ.

Схема неотражающих частотно-селективных цепей

Эквивалентная схема неотражающей частотно-селективной цепи в виде четырехполюсника, производного от многополюсника с входом (порт 1) и выходом (порт 4), показана на рис. 1 [33]. Схема состоит из отрезка связанных полосковых линий (СПЛ) I и II с распределенными параметрами, нагрузок в диагональных портах 2 и 3 из элементов с сосредоточенными параметрами, представляющих частотно-избирательную RLC-цепь. Рассмотрим работу схемы рис. 1 при исполнении RLC-цепи в виде последовательного L_0C_0 -колебательного контура, шунтированного сопротивлением R_0 .

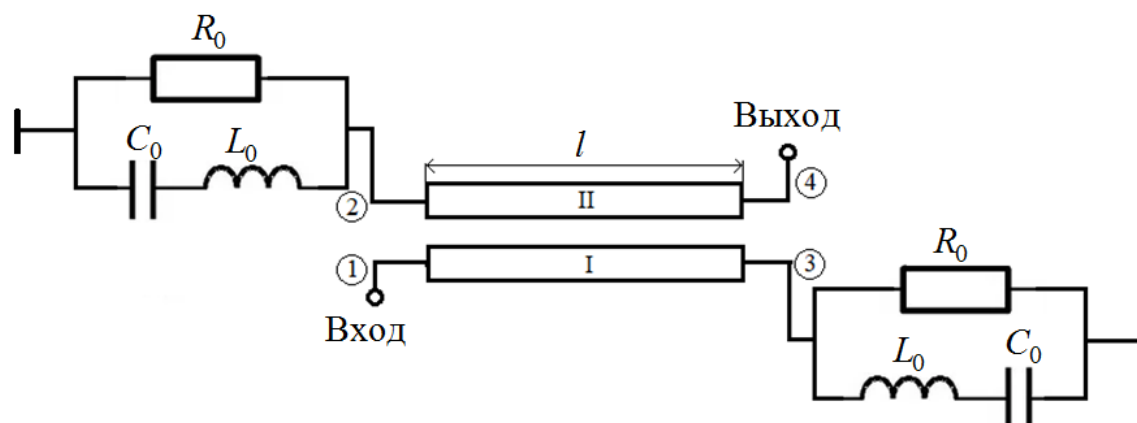


Рис. 1. Эквивалентная схема неотражающей частотно-селективной цепи на основе связанных полосковых линий и RLC-элементов

Модуль импеданса $|Z_{RLC}(f)|$ RLC-цепи на частоте резонанса последовательного колебательного контура $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0}}$ стремится к нулю, а на частотных интервалах $f < f_0 - \Delta f$ и $f > f_0 + \Delta f$ асимптотически приближается к R_0 . Величина Δf зависит от отношения между R_0 и $Z_0 = \sqrt{L_0/C_0}$. Пример расчета частотной зависимости модуля импеданса $|Z_{RLC}(f)|$ RLC-цепи как двухполюсника показан на рис. 2.

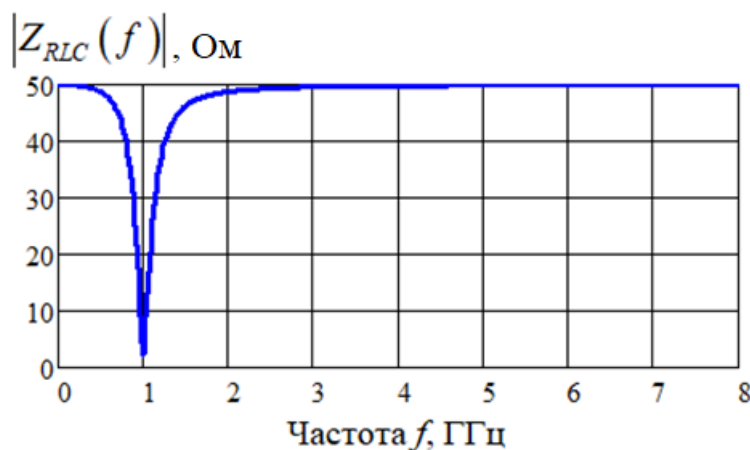


Рис. 2. Частотная зависимость модуля импеданса RLC-цепи $|Z_{RLC}(f)|$

Значения параметров (см. рис. 1) были такие: $C_0 = 1,1$ пФ; $L_0 = 23$ нГн; $R_0 = 50$ Ом. В предельных случаях нагрузки в портах 2, 3 $|Z_{RLC}| \rightarrow 0$, либо $|Z_{RLC}| \rightarrow 50$ Ом и эквивалентная схема устройства, показанного на рис. 1, упрощается и представляется так, как показано на рис. 3.

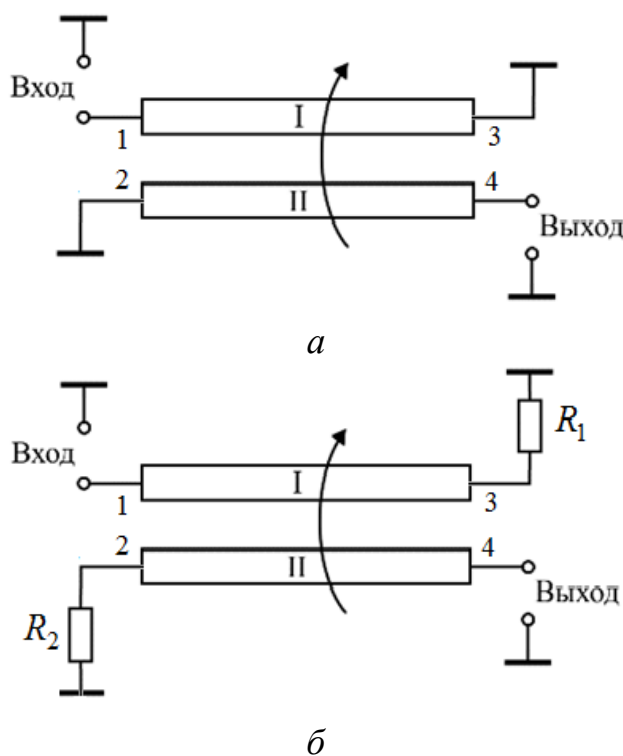


Рис. 3. Трансформация эквивалентной схемы (рис. 1) при предельных значениях модуля импеданса нагрузок $|Z_{RLC}|$ в портах 2 и 3 СПЛ:
(а) – при $f = f_0$; (б) – при $f < f_0 - \Delta f$ и $f > f_0 + \Delta f$

Были рассчитаны частотные зависимости коэффициентов матрицы рассеяния S и электрические длины связанных линий при синфазном и противофазном возбуждении (рис. 4) для эквивалентных схем (рис. 3) при следующих пер-

вичных и модальных параметрах связанных полосковых линий по разработанным алгоритмам и программам [38]:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 152,14 & -104,7 \\ -104,7 & 152,14 \end{bmatrix}, \text{ пФ/м} - \text{матрица погонных коэффициентов электро-}$$

тростатической индукции;

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0,3992 & 0,2723 \\ 0,2723 & 0,3992 \end{bmatrix}, \text{ мкГн/м} - \text{матрица погонных коэффициентов электро-}$$

ромагнитной индукции;

$k_C = 0,688$ – коэффициент связи по емкости;

$k_L = 0,682$ – коэффициент связи по индуктивности;

$l = 0,045$ м – геометрическая длина отрезка СПЛ.

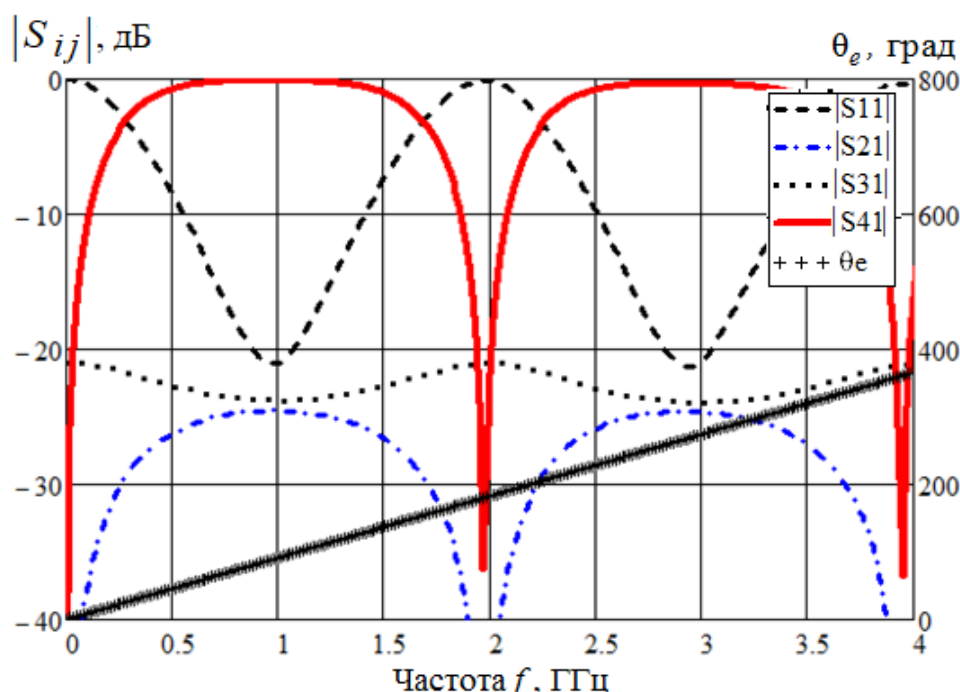


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициентов матрицы рассеяния $\mathbf{S}$ и электрической длины связанных линий при синфазном типе возбуждения θ_e

для эквивалентной схемы рис. 3 а как восьмиполосника:

$|S_{11}|$ – возвратные потери со стороны порта 1 (входа);

$|S_{21}|$ – вносимые потери при передаче из порта 1 в порт 2;

$|S_{31}|$ – вносимые потери при передаче из порта 1 в порт 3;

$|S_{41}|$ – вносимые потери при передаче из порта 1 в порт 4 (выход);

θ_e – электрическая длина синфазного типа возбуждения, град

Частотная зависимость электрической длины противофазного типа возбуждения $\theta_o \approx \theta_e$, поэтому на графиках рис. 4 и рис. 5 θ_o не показана. Из рис. 4 видно, что отрезок связанных линий при $|Z_{RLC}| \rightarrow 0$ представляет широкополос-

ный полосно-пропускающий фильтр с периодически повторяющейся полосой пропускания с вносимым ослаблением сигнала $|S_{41}| \approx 0$ и минимальными возвратными потерями $|S_{11}|$ на частотах $f_0, 3f_0$ ГГц при электрической длине СПЛ $\theta_e = 90^\circ, 270^\circ$. При этом вносимые потери $|S_{21}|, |S_{31}| < -20$ дБ (рис. 4). Предельный переход к схеме рис. 3 б при $|Z_{RLC}| \rightarrow 50$ Ом, как показывает рис. 5, приводит к уменьшению $|S_{41}|$ во всем диапазоне частот. Входной сигнал не поступает на выход устройства, а гасится на сопротивлениях R_0 нагрузок в портах 2 и 3, возвратные потери $|S_{11}| < -20$ дБ в полосе частот до 4 ГГц. Поскольку в схеме (рис. 1) используются частотно-зависимые нагрузки в портах 2 и 3, трансформация частотных характеристик, проиллюстрированная на примере предельных переходов к схемам рис. 3, будет происходить с изменением $|Z_{RLC}(f)|$ от частоты, но в показанных пределах.

Результаты расчета частотных зависимостей коэффициентов матрицы рассеяния $\mathbf{S}$ и электрической длины полосок θ_e, θ_o для синфазного и противофазного типов возбуждения неотражающего фильтра как восьмиполосника показаны на рис. 6. Частотная зависимость электрической длины противофазного типа возбуждения $\theta_o \approx \theta_e$, т.к. коэффициенты связи по емкости и индуктивности $k_C \approx k_L$.

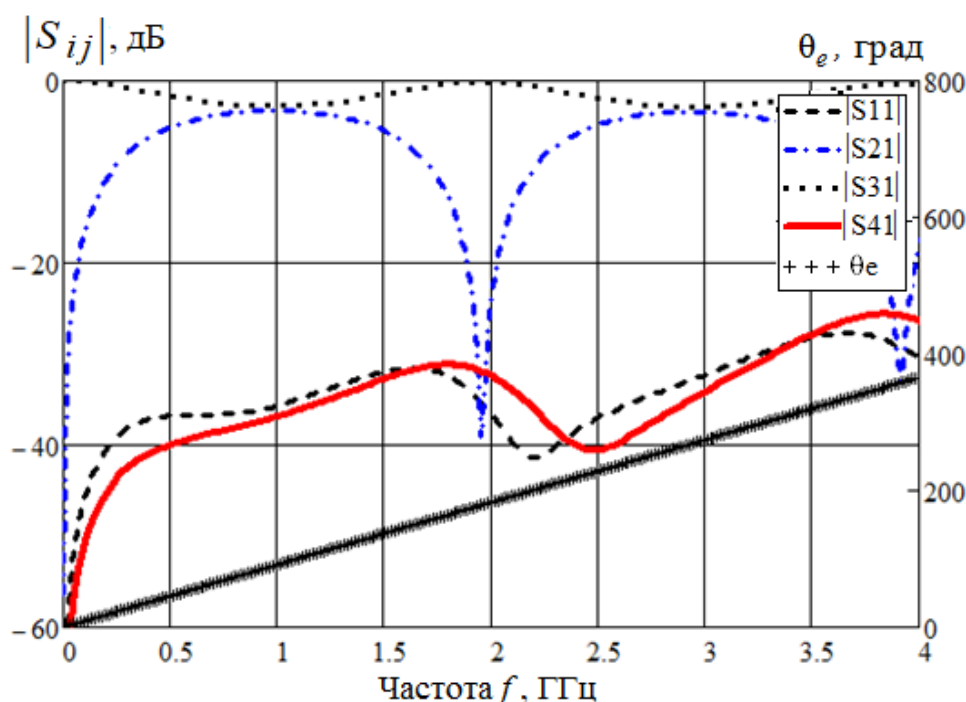


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициентов матрицы рассеяния $\mathbf{S}$ и электрической длины синфазного типа возбуждения θ_e для эквивалентной схемы рис. 3 б

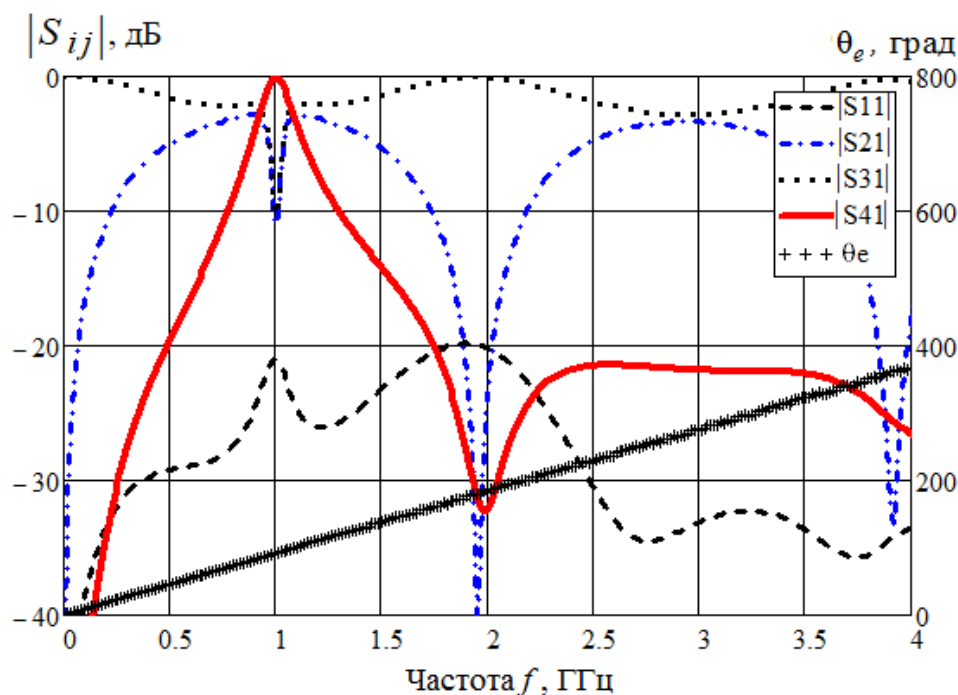


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициентов матрицы $\mathbf{S}$ рассеяния и электрической длины синфазного типа возбуждения θ_e неотражающей частотно-селективной цепи на основе связанных линий и RLC-элементов

Анализ зависимостей коэффициентов матрицы $\mathbf{S}$ от частоты f (см. рис. 2 и рис. 6) показывает, что на резонансной частоте f_0 RLC-цепи почти вся мощность сигнала с входного порта 1 поступает на выход в порт 4, а портах 2 и 3 она минимальна и одинакова. На низких частотах $f < f_0$ и высоких частотах $f > f_0$ мощность «перекачивается» в порты 2 и 3, в результате чего формируется АЧХ по типу полосно-пропускающего фильтра. Поскольку RLC-цепь имеет единственную собственную (резонансную) частоту f_0 , рассматриваемое устройство также обнаруживает только одну полосу пропускания и вносимое ослабление сигнала с коэффициентом $|S_{41}| \leq -20$ дБ на частотах запираания.

Замечательной особенностью рассматриваемого устройства является согласованность с внешними цепями с коэффициентом обратного рассеяния $|S_{11}| < -20$ дБ. При этом $|S_{44}| = |S_{11}|$, поскольку устройство симметрично.

Каскадное соединение отражающих и неотражающих фильтров

Рассмотрим в качестве примера каскадирование полосно-пропускающего фильтра, построенного на основе связанных линий с полуволновым резонатором [12], и НФ с характеристиками, показанными на рис. 6. Были рассчитаны частотные характеристики ОФ со схемой и размерами полосок, показанными на рис. 7.

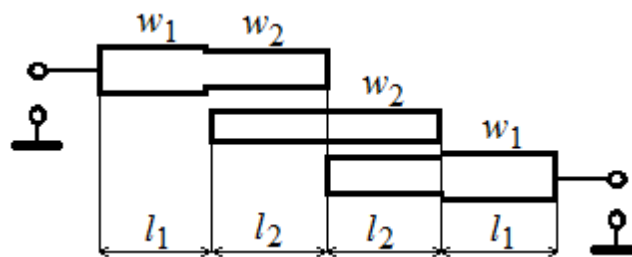


Рис. 7. Схема и размеры полосок отражающего фильтра

ОФ выполнен на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 9,85$. Размеры полосок: $w_1 = 1,3$ мм; $w_2 = 0,6$ мм; $l_1 = l_2 = 24$ мм. Погонная емкость полоски с шириной w_1 $C_{01} = 214,5$ пФ/м, погонная индуктивность $L_{01} = 0,3528$ мкГн/м. Частотные характеристики отрезка связанных полосковых линий с шириной полосок w_2 рассчитывались со следующими первичными параметрами в виде матриц погонных коэффициентов электростатической C_2 и электромагнитной индукции L_2 :

$$C_2 = \begin{bmatrix} 92,93 & -27,88 \\ -27,88 & 92,93 \end{bmatrix}, \text{ пФ/м}; L_2 = \begin{bmatrix} 1,314 & 0,394 \\ 0,394 & 1,314 \end{bmatrix}, \text{ мкГн/м}.$$

На рис. 8 показана условная схема и частотные характеристики отражающего фильтра как четырехполюсника. Заметим, что в полосе прозрачности фильтр согласован, вносимые потери на средней частоте f_0 минимальны. В полосах запираания $|S_{11}| \rightarrow 0$, т.е. сигнал отражается почти полностью. Наблюдается вторая полоса пропускания со средней частотой $3f_0$.

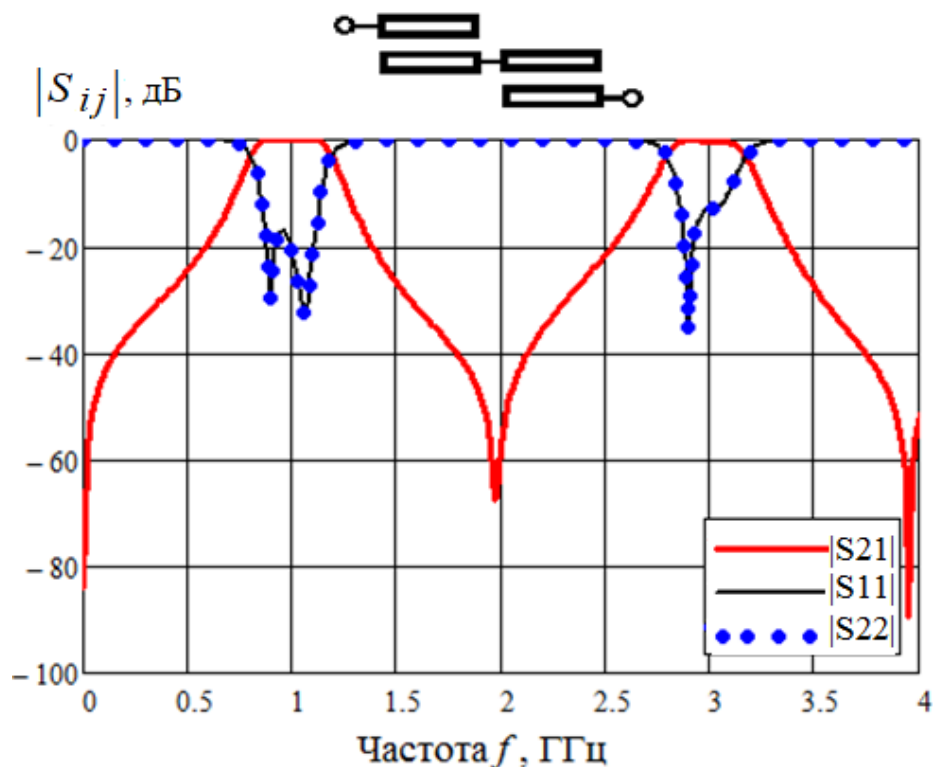


Рис. 8. Частотные характеристики полуволнового фильтра

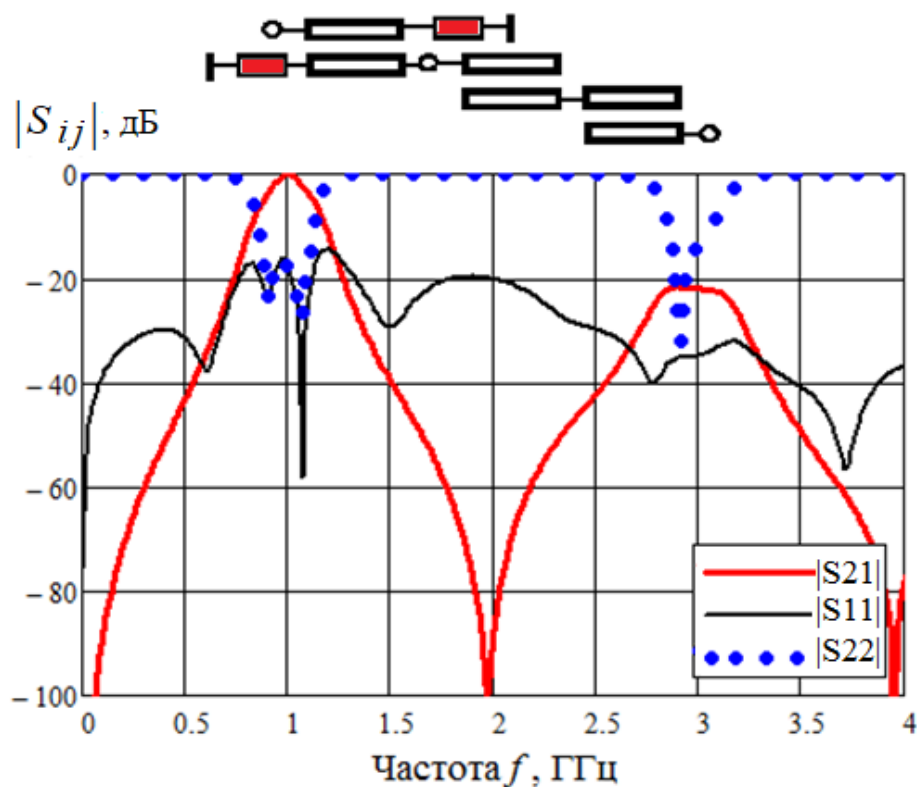


Рис. 9. Частотные характеристики каскадного соединения неотражающего фильтра и полуволнового отражающего фильтра

Каскадное соединение неотражающего и отражающего фильтров выполнено по схеме, показанной на рис. 9. В схеме нагрузки в диагональных портах связанных полосковых линий (выделены красным цветом) представляют RLC-цепи (см. рис. 1) с параметрами $C_0 = 1,1$ пФ, $L_0 = 23$ нГн, $R_0 = 50$ Ом. Введение НФ дало такие результаты:

- 1) частотная зависимость коэффициента передачи (рис. 9) имеет вид, характерный для полосно-пропускающего фильтра с периодически повторяющейся полосой пропускания. Первая полоса пропускания на средней частоте f_0 характеризуется вносимым ослаблением $|S_{21}| \approx 0$. На второй полосе пропускания $|S_{21}| \approx -20$ дБ. Сравнивая частотные характеристики ОФ (рис. 8) и НФ (рис. 9), заключаем, что увеличение вносимого ослабления на второй полосе пропускания на частоте 3 ГГц обеспечивает включение в цепь НФ;
- 2) включение НФ приводит к существенному снижению возвратных потерь $|S_{11}|$ (рис. 9, черная сплошная линия) до уровня $|S_{11}| \leq -16$ дБ во всем частотном диапазоне. При этом возвратные потери от порта 2 $|S_{22}|$ изменились незначительно по отношению к зависимости $|S_{22}|$, показанной на рис. 8, т.к. по-прежнему выход ОФ остается не согласованным на внеполосных частотах (рис. 8, рис. 9, синие точки). Таким образом, при каскадном соединении двух типов фильтров наблюдается

эффект уменьшения возвратных потерь и подавления внеполосных колебаний.

Каскадное включение НФ на входе и выходе ОФ (рис. 10) позволило решить задачу уменьшения $|S_{22}|$ до уровня $|S_{11}| \leq -16$ дБ, что иллюстрируется совпадением графиков зависимостей $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ от частоты.

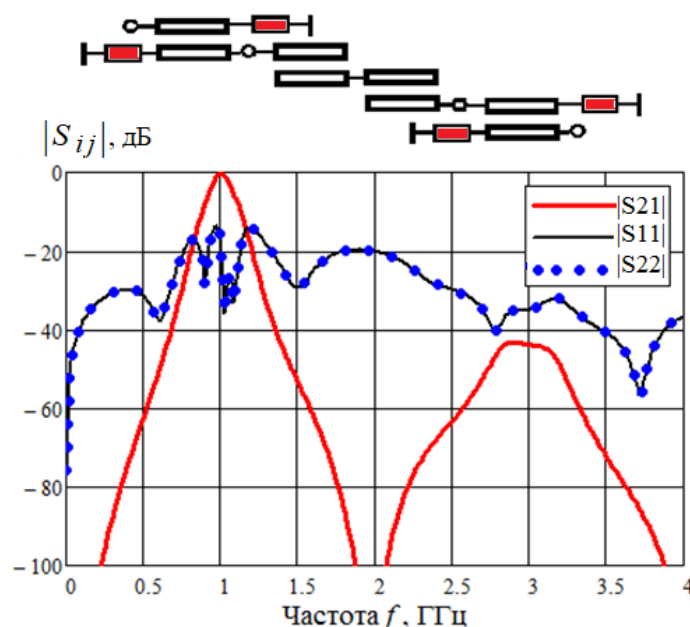


Рис. 10. Частотные характеристики каскадного соединения одинаковых неотражающих фильтров на входе и выходе полуволнового фильтра

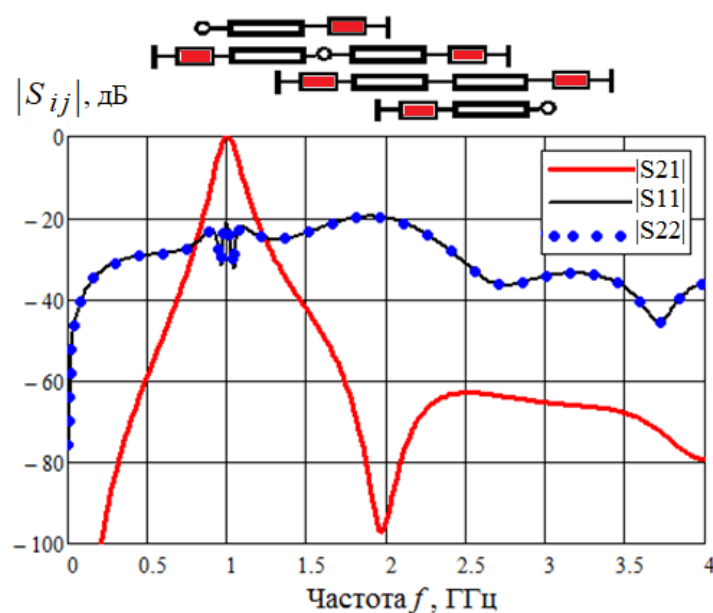


Рис. 11. Частотные характеристики каскадного соединения трех неотражающих фильтров с одинаковыми параметрами

Каскадное включение трех одинаковых НФ (рис. 11) позволяет уменьшить коэффициенты обратного рассеяния до уровня $|S_{22}|$, $|S_{11}| \leq -20$ дБ, причем графики зависимостей $|S_{22}|$ и $|S_{11}|$ совпадают.

Эксперимент

Были изготовлены макет полосно-пропускающего фильтра (ППФ) неотражающего типа на СПЛ, свернутых в меандр (рис. 12, поз. 1) [34], и макет ППФ отражающего типа на основе четырехпроводной полосковой линии (рис. 12, поз. 2). Измерения частотных характеристик проводились на векторном анализаторе цепей P4226 производства АО «НПФ «Микран». Сначала были измерены частотные зависимости $|S_{11}|$, $|S_{21}|$, $|S_{22}|$ макета ОФ. На рис. 13 показаны частотные характеристики макета отражающего фильтра 2, типичные для устройств на четвертьволновых резонаторах. В основной полосе прозрачности на частоте $f_0 = 0,972$ ГГц ОФ согласован, $|S_{11}| = -16,6$ дБ, вносимые потери на f_0 составляют $|S_{21}| = -3,62$ дБ. Но в полосах частот заграждения изготовленный макет показывает большие возвратные потери вплоть до верхней границы полосы запираания 6 ГГц.



Рис. 12. Каскадное включение неотражающего фильтра 1 и ППФ отражающего типа 2

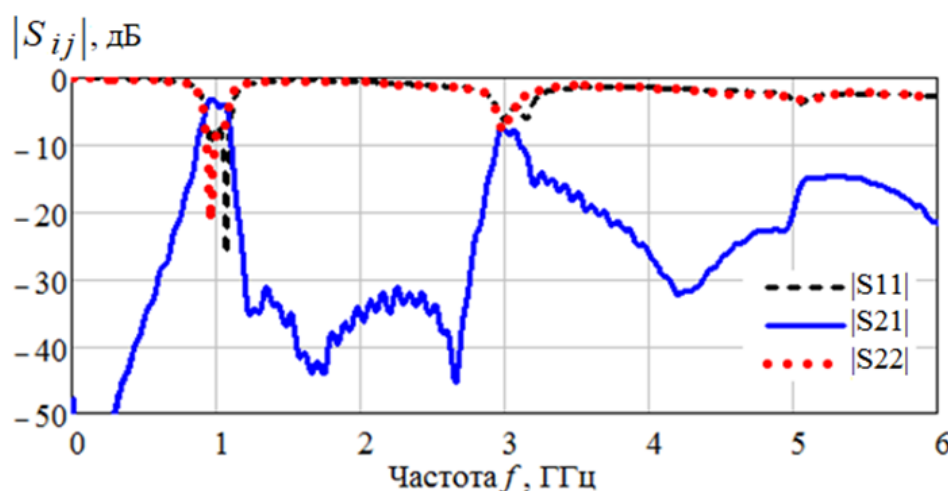


Рис. 13. Частотные характеристики макета полоскового фильтра отражающего типа на четвертьволновых резонаторах

Включение НФ 1 на входе отражающего фильтра 2 приводит к уменьшению возвратных потерь до $|S_{11}| \leq -10$ дБ во всем диапазоне частот, но при этом $|S_{22}|$ изменяется мало (рис. 14). Частотная зависимость вносимых потерь $|S_{21}|$ характеризуется следующими изменениями: на центральной частоте $f_0 = 0,972$ ГГц $|S_{21}| = -5,63$ дБ; полоса пропускания по уровню 3 дБ уменьшилась с 17,7% до 11,3%; вторая паразитная полоса пропускания на частоте $f_1 = 2,981$ ГГц подавлена до минус 23,7 дБ.

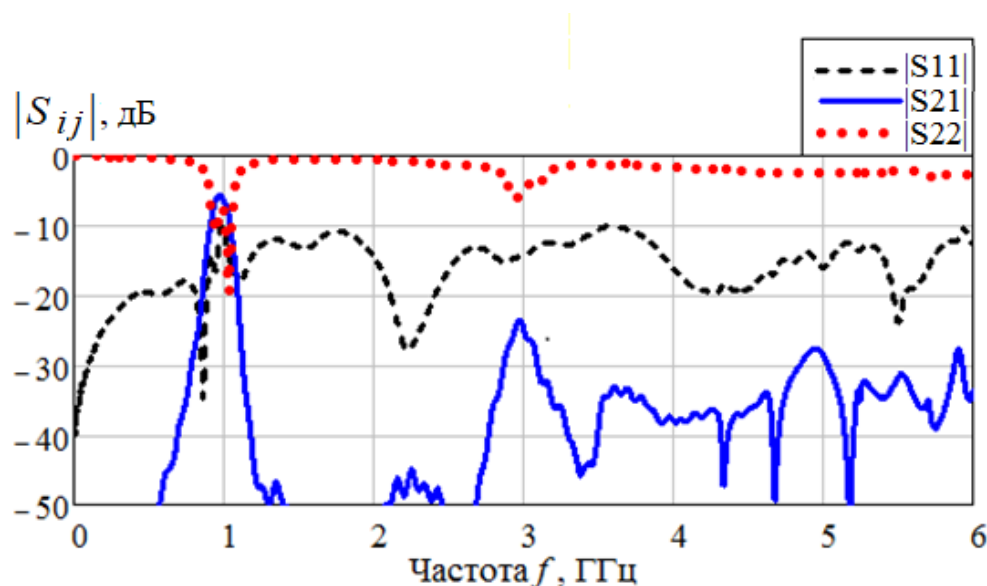


Рис. 14. Частотные характеристики каскадно соединенных макетов полосковых фильтров неотражающего и отражающего типа

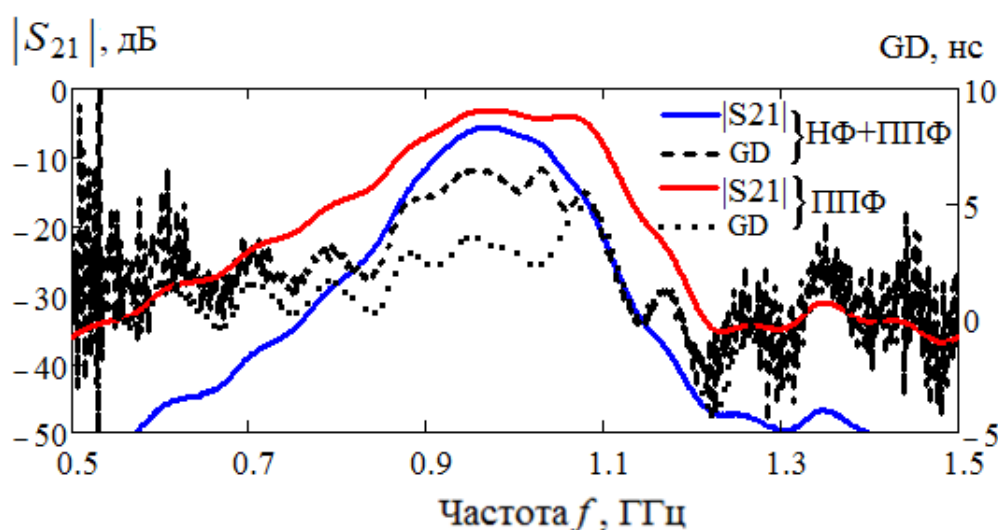


Рис. 15. Частотные зависимости вносимого ослабления $|S_{21}|$ и группового времени запаздывания GD отражающего ППФ и каскадного соединения неотражающего фильтра и отражающего фильтра (НФ+ППФ)

Проведены измерения вносимого затухания $|S_{21}|$ и группового времени запаздывания GD фильтра отражающего типа и каскадного соединения НФ и ОФ в узком диапазоне частот от 0,5 до 1,5 ГГц (рис. 15). Из анализа приведенных зависимостей видно, что полоса пропускания ОФ составила 0,179 ГГц, а каскадного соединения НФ и ОФ 0,111 ГГц. Неравномерность группового времени запаздывания при каскадном включении уменьшилась до $\Delta GD = 0,88$ нс при $\Delta GD = 2,63$ нс для ОФ.

Выводы

Таким образом, показаны основные свойства схем, построенных на основе связанных полосковых линий, образующих восьмиполосник, диагональные порты которых нагружены на импеданс одинаковых двухполосников в виде LC-резонатора последовательного типа, шунтированного сопротивлением. В качестве входа и выхода схем используются другие порты восьмиполосника, согласованные с внешними схемами. Показано, что образуемый при этом четырехполосник, производный от восьмиполосника, формирует частотную зависимость коэффициентов матрицы рассеяния $\mathbf{S}$ со следующими особенностями:

- 1) возвратные потери, определяемые коэффициентами $|S_{11}|$, $|S_{22}|$ матрицы рассеяния $\mathbf{S}$, ограничены минус (10...16) дБ в диапазоне рабочих частот до 6 ГГц. При этом частотная зависимость вносимых потерь $|S_{11}|$ соответствует характеристике неотражающего полосно-пропускающего фильтра с полосой пропускания 18,3%, вносимыми потерями –2 дБ на центральной частоте $f_0 = 0,98$ ГГц. Неотражающие цепи (фильтры) могут служить в качестве «ловушки» отраженных волн;
- 2) при каскадном включении НФ и традиционного отражающего фильтра возвратные потери на внеполосных частотах уменьшаются до уровня $|S_{11}| \leq -10$ дБ, сужается полоса пропускания с 17,7% до 11,3%, $|S_{22}|$ остается на уровне, близком к возвратным потерям отражающих фильтров на внеполосных частотах;
- 3) расчеты показали, что каскадное включение одинаковых НФ на входе и выходе отражающего фильтра уменьшает возвратные потери $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ до уровня –10 дБ. При этом вносимые потери на частоте паразитной (второй) полосы пропускания увеличиваются до –40 дБ;
- 4) Экспериментально показано уменьшение неравномерности группового времени запаздывания ΔGD в полосе пропускания при каскадном включении НФ и ОФ более чем в 2 раза, до $\Delta GD = 0,88$ нс;
- 5) поскольку частотная зависимость параметров НФ, как показано в данной статье, определяется RLC-цепью, изменение ее схемы приведет к изменению зависимостей $S_{21}(f)$, $S_{11}(f)$. В работах [35–37] предложен НФ с перестраиваемыми параметрами и НФ с двухмодальной характеристикой вносимых потерь. Комбинирование таких вариантов

исполнения НФ с фильтрами отражающего типа позволит расширить функциональные возможности в решении задач снижения возвратных потерь и подавления внеполосных колебаний в межкаскадных соединениях систем связи и обработки сигналов.

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении моделирования ППФ отражающего типа и обсуждении результатов доктору технических наук Сычеву А.Н.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, проект FEWM-2023-0014 от 16.01.2023.

Литература

1. Макаренко С. И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 4. Функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 122–157. doi: 10.24411/2410-9916-2020-10304.
2. Khristenko A. V., Konovalenko M. O., Rovkin M. E., Khlusov V. A., Marchenko A. O., Sutulin A. A., Malyutin N. D. Magnitude and spectrum of electromagnetic wave scattered by small quadcopter in X-Band // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66. No. 4. P. 1977–1984. doi: 10.1109/TAP.2018.2800640.
3. Khristenko A. V., Konovalenko M. O., Rovkin M. E., Khlusov V. A., Marchenko A. O., Sutulin A. A., Malyutin N. D. A system for measurement of electromagnetic wave scattered by small UAVs // International Siberian conference on control and communications (SIBCON) (Astana, Kazakhstan, 29-30 June 2017). – Astana, 2017. – P. 1–5. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998472.
4. Rovkin M. E., Khlusov V. A., Malyutin N. D., Khristenko A. V., Novikov A. S., Nosov D. M., Osipov M. V., Konovalenko M. O., Marchenko A. O., Ilchenkov V. E. Radar detection of small-size UAVs // Ural symposium on biomedical engineering, radioelectronics and information technology (USBREIT), (Yekaterinburg, Russia, 07-08 May 2018). Yekaterinburg, 2018. – P. 371–374. doi: 10.1109/USBREIT.2018.8384626.
5. Костромицкий С. М., Нефёдов Д. С. Радиолокационные характеристики микро-БПЛА // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 3. С. 12–23. doi: 10.38013/2542-0542-2023- 3-12-23.
6. Pripitnev P., Romanchenko I., Maltsev S., Sobyenin R., Konev V. High efficiency radio frequency pulse generation in a nonlinear corrugated coaxial transmission line with ferrite saturated by permanent magnets // Review of Scientific Instruments. 2023. Vol. 94. No. 5. doi: 10.1063/5.0144386.
7. Pripitnev P. V., Romanchenko I. V., Sobyenin R. K., Konev V. Y. Generation of Sub-Gigawatt Nanosecond Pulses of Microwave Radiation Based on a Coaxial Corrugated Transmission Line with Ferrite // Russian Physics Journal. 2023. Vol. 66. No. 6. P. 885–890. doi: 10.1007/s1182-023-03019-7.

8. Belousov A. O., Gazizov T. R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters // Complexity. – Hindawi, 2018. Vol. 2018. P. 1–15. doi: 10.1155/2018/5676504.

9. Белоусов А. О., Гордеева В. О., Ким Г. Ю. Оптимизация модального фильтра на основе микрополосковой линии по частотным критериям // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 4. С. 219–242. doi: 10.24412/2410-9916-2023-4-219-242.

10. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. – М.: Связь, 1971. Т. 2. – 493 с.

11. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. – М.: Связь, 1971. Т. 1. – 438 с.

12. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ. – М.: Связь, 1971. – 388 с.

13. Ханзел Г. Е. Справочник по расчету фильтров / Перевод с английского под редакцией А. Е. Знаменского. – М.: Советское радио, 1974. – 288 с.

14. Апин М. П., Боков С. И., Бушуев Н. А., Воробьев А. В., Исаев В. М., Кабанов И. Н., Кац Б. М., Комаров В. В., Куцько П. П., Мещанов В. П., Рожков В. М., Шалаев П. Д. СВЧ-фильтры и мультиплексоры для систем космической связи. Сер. Системы космической связи / Под ред. Мещанова В. П. – М.: Радиотехника, 2017. – 256 с.

15. Кац Б. М., Мещанов В. П., Саяпин К. А. Компактный двухдиапазонный полосно-пропускающий фильтр // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества. Тезисы докладов I Российской научной конференции (Омск, 6-8 октября 2020 г.). – Омск, 2020. – С. 158.

16. Аристархов Г. М., Кириллов И. Н., Корчагин А. И., Кувшинов В. В. Компактные высокоизбирательные микрополосковые фильтры на свернутых сонаправленных шпилечных резонаторах // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 4. С. 126–137. doi: 10.18127/j00338486-202104-14.

17. Аристархов Г. М., Аригин О. В., Кириллов И. Н., Марковский А. В., Доронина А. Д. Многополосные полосно-пропускающие микрополосковые фильтры на двух сонаправленных шпилечных резонаторах // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2023. Т. 14. № 1. С. 4–9.

18. Беляев Б. А., Сержантов А. М., Лексиков Ан. А., Бальва Я. Ф., Галеев Р. Г. Миниатюрный полосно-пропускающий фильтр на двойных спиральных полосковых резонаторах // Ural Radio Engineering Journal. 2021. № 5 (1). С. 21–31. doi: 10.15826/urej.2021.5.1.002.

19. Беляев Б. А., Ходенков С. А., Говорун И. В., Сержантов А. М. Широкополосный высокоселективный микрополосковый фильтр на двухмодовых резонаторах // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 503. № 1. С. 57–62. doi: 10.31857/S2686740022010047.

20. Беляев Б. А., Сержантов А. М., Лексиков Ан. А., Бальва Я. Ф., Галеев Р. Г. Монолитный миниатюрный полосно-пропускающий фильтр на

многопроводниковых полосковых резонаторах // Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47. № 13. С. 16–20. doi: 10.21883/PJTF.2021.13.51115.18785.

21. Qingxian Li, Xun Luo. Three-Port Refectionless Down-Converter for Wideband and Multichannel Receiver with Flat Gain, Enhanced EVM, and High Stability // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2024. Vol. 72. No. 7. P. 4337. doi: 10.1109/TMTT.2023.3334531.

22. Liu C., Deng Z., Liu X., Luo X. A wideband bandpass filter with broad stopband and ultra-wide reflectionless range for 5G applications // IEEE MTT-S International Microwave Symposium (15-20 June 2025, Moscone Center, San Francisco, CA). – San Francisco, 2019. – P. 834–837. doi: 10.1109/MWSYM.2019.8700856.

23. Yu W., Rao Y., Qian H. J., Luo X. Reflectionless filtering 90° coupler using stacked cross coupled-line and loaded cross-stub // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2020. Vol. 30. No. 5. P. 481–484. doi: 10.1109/LMWC.2020.2986155.

24. Gómez-García R., Muñoz-Ferreras J.-M., Psychogiou D. Symmetrical quasi-reflectionless BSFs // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2018. Vol. 28. No. 4. P. 302–304. doi: 10.1109/LMWC.2018.2805462.

25. 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. Vol. 59. No. 5. P. 1214–1221. doi: 10.1109/TMTT.2011.2113189.

26. Morgan M. A., Boyd T. A. Reflectionless filter structures // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. Vol. 63. No. 4. P. 1263–1271. doi: 10.1109/TMTT.2015.2403841.

27. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 4. P. 1136–1142. doi: 10.1109/TEMC.2016.2548783.

28. Карри С., Суровцев Р. С., Микола П. В., Скорняков И. А. Методика оптимизации полосковых устройств на основе связанных линий с модальным разложением // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 1. С. 95–117. doi: 10.24412/2410-9916-2024-1-095-117.

29. Ким Г. Ю., Малыгин К. П., Жечев Е. С., Конев В. Ю., Носов А. В. Гибридный способ защиты от сверхкоротких импульсов на основе меандровой линии и газоразрядного устройства // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 2. С. 149–172. doi: 10.24412/2410-9916-2024-2-149-172.

30. Maljutin N. D., Loschilov A. G., Ladur A. A. Circuits of combined absorptive filters // 18th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (Sevastopol 08–12 September 2008). – Sevastopol, 2008. – P. 489–490. doi:10.1109/crmico.2008.4676470.

31. Лощилов А. Г. Анализ и оптимизация широкополосных устройств и антенн на основе нерегулярных структур комбинированного типа. Дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТУСУР, 2008. – 252 с.

32. Малютин Н. Д., Чинь Т. Т., Малютин Г. А. Неотражающие фильтры СВЧ (обзор) // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 4. doi: 10.30898/16841719.2024.4.4.

33. Thanh T. T., Loschilov A. G. Reflectionless Stripline Filters // Ural symposium on biomedical engineering, radioelectronics and information technology (USBREIT), (Yekaterinburg, Russia, 15-17 May 2023). – Yekaterinburg, 2023. – P. 135–138. doi: 10.1109/USBREIT.2018.8384626.

34. Чинь То Тхань, Малютин Н. Д. Малогабаритный неотражающий полосно-пропускающий фильтр // Патент на изобретение RU 2820780, опублик. 10.06.2024, бюл. № 16. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67987548> (дата обращения 12.10.2024).

35. Лощилов А. Г., Чинь Т. Т., Малютин Г. А. Полосковый неотражающий полосно-пропускающий перестраиваемый фильтр // Патент на изобретение RU 2819096, бюл. № 1. – URL: <https://patenton.ru/patent/RU2819096C1.pdf> (дата обращения 12.10.2024).

36. Чинь То Тхань, Малютин Н. Д. Неотражающий полосно-пропускающий фильтр нечетных гармоник // Патент RU № 2820791, бюл. № 16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67987559> (дата обращения 12.10.2024).

37. Чинь Т. Т. Неотражающий полосковый полосно-пропускающий фильтр нечетных гармоник // Ural Radio Engineering Journal. 2023. Т. 7. № 3. С. 250–265. doi: 10.15826/urej.2023.7.3.002.

38. Малютин Г. А., Чинь Т. Т. Алгоритм и программы анализа и синтеза устройств на основе распределенно-сосредоточенных цепей // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12. № 3. С. 28–35.

References

1. Makarenko S. I. Counter Unmanned Aerial Vehicles. Part 4. Functional Destroying with Microwave and Laser Weapons. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 3, pp. 122-157 (in Russian). doi: 10.24411/2410-9916-2020-10304.

2. Khristenko A. V., Konovalenko M. O., Rovkin M. E., Khlusov V. A., Marchenko A. O., Sutulin A. A., Malyutin N. D. Magnitude and spectrum of electromagnetic wave scattered by small quadcopter in X-Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 4, pp. 1977–1984. doi: 10.1109/TAP.2018.2800640.

3. Khristenko A. V., Konovalenko M. O., Rovkin M. E., Khlusov V. A., Marchenko A. O., Sutulin A. A., Malyutin N. D. A system for measurement of electromagnetic wave scattered by small UAVs. *International Siberian conference on control and communications (SIBCON)*, 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998472.

4. Rovkin M. E., Khlusov V. A., Malyutin N. D., Khristenko A. V., Novikov A. S., Nosov D. M., Osipov M. V., Konovalenko M. O., Marchenko A. O., Ilchenkov V. E. Radar detection of small-size UAVs. *Ural symposium on biomedical engineering, radioelectronics and information technology (USBREIT)*,

(Yekaterinburg, Russia, 07-08 May 2018). Yekaterinburg, 2018. P. 371–374. doi: 10.1109/USBREIT.2018.8384626.

5. Kostromitsky S. M., Nefedov D. S. Radar characteristics of micro-UAV. *Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation*, 2023, no. 3, pp. 12–23. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-3-12-23>.

6. Priputnev P., Romanchenko I., Maltsev S., Sobyenin R., Konev V. High efficiency radio frequency pulse generation in a nonlinear corrugated coaxial transmission line with ferrite saturated by permanent magnets. *Review of Scientific Instruments*, 2023, vol. 94. DOI: 10.1063/5.0144386.

7. Priputnev P. V., Romanchenko I. V., Sobyenin R. K., Konev V. Y. Generation of Sub-Gigawatt Nanosecond Pulses of Microwave Radiation Based on a Coaxial Corrugated Transmission Line with Ferrite. *Russian Physics Journal*, 2023, vol. 66, no. 6, pp. 885–890. DOI: 10.1007/s11182-023-03019-7.

8. Belousov A. O., Gazizov T. R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters. *Complexity*, 2018, vol. 2018, pp. 1–15 (in Russian). doi: 10.1155/2018/5676504.

9. Belousov A. O., Gordeyeva V. O., Kim G. Yu. Optimization of a modal filter based on a microstrip line according to frequency criteria. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 4, pp. 219–242 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-219-242.

10. Matthei G. L., Young L., Jones E. M. T. *Microwave Filters, Impedance Matching Network, and Coupling Structure*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1964.

11. Matthaei G., Young L., Jones E. *Microwave Filters, Impedance Matching Networks, and Coupling Structures*. Norwood, MA: Artech House, 1980.

12. Feldstein A. L., Yavich L. P. *Synthesis of four-pole and eight-pole poles at microwave*. M.: Svyaz, 1971, 388 p. (in Russian).

13. Hansel G. E. *Handbook on the calculation of filters*. Translation from English, edited by A. E. Znamensky. Moscow: Soviet Radio, 1974. 288 p.

14. Apin M. P., Bokov S. P., Bokov S. I., Bushuyev N. A., Vorobyev A. V., Isaev V. M., Kabanov I. N., Katz B. M., Komarov V. V., Kuts'ko P. P., Meshchanov V. P., Rozhkov V. M., Shalaev P. D. Edited by Meshchanov V. P. *SVCH-fil'try i mul'tipleksory dlya sistem kosmicheskoy svyazi. Ser. Sistemy kosmicheskoy svyazi* [Microwave filters and multiplexers for space communication systems. Ser. Space communication systems]. Moscow, Radiotekhnika, 2017. 256 p. (in Russian).

15. Katz B. M., Meshchanov V. P., Sayapin K. A. *Kompaktnyy dvukhdiapazonnyy polosno-propuskayushchiy fil'tr* [Compact dual-band bandpass filter]. *Radiofizika, fotonika i issledovaniye svoystv veshchestv* [Radiophysics, photonics and the study of the properties of matter], Omsk, 2020, p. 158.

16. Aristarkhov G. M., Kirillov I. N., Korchagin A. I., Kuvshinov V. V. Compact highly selective microstrip filters on folded codirectional hairpin resonators. *Radio Engineering*, 2021, vol. 85, no. 4, pp. 126–137. doi: 10.18127/j00338486-202104-14 (in Russian).

17. Aristarkhov G. M., Arinin O. V., Kirillov I. N., Markovsky A. V., Doronina A. D. Multiband band-pass microstrip filters on two co-directional hairpin resonators. *Systems for synchronization, formation and processing of signals*, 2023, vol. 14, no. 1, pp. 4–9 (in Russian).
18. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Leksikov An. A., Balva Ya. F., Galeev R. G. Miniature band-pass filter on double spiral stripline resonators. *Ural Radio Engineering Journal*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 21–31. doi: 10.15826/urej.2021.5.1.002.
19. Belyaev B. A., Khodenkov S. A., Govorun I. V., Serzhantov A. M. Broadband highly selective microstrip filter on dual-mode resonators. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, Technical Sciences*, 2022, vol. 503, no. 1, pp. 57–62.
20. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Lesikov An. A., Balva Ya. F., Galeev R. G. Monolithic miniature band-pass filter on multi-conductor stripline resonators. *Letters to the Journal of Technical Physics*, 2021, vol. 47, no. 13, pp. 16–20.
21. Qingxian Li, Xun Luo Three-Port Reflectionless Down-Converter for Wideband and Multichannel Receiver With Flat Gain, Enhanced EVM, and High Stability. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2024, vol. 72, no. 7, p. 4337. doi: 10.1109/TMTT.2023.3334531.
22. Liu C., Deng Z., Liu X., Luo X. A wideband bandpass filter with broad stopband and ultra-wide reflectionless range for 5G applications. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Jun. 2019, pp. 834–837. doi: 10.1109/MWSYM.2019.8700856.
23. Yu W., Rao Y., Qian H. J., Luo X. Reflectionless filtering 90° coupler using stacked cross coupled-line and loaded cross-stub. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, vol. 30, no. 5, pp. 481–484. doi: 10.1109/LMWC.2020.2986155.
24. Gómez-García R., Muñoz-Ferreras J.-M., Psychogiou D. Symmetrical quasi-reflectionless BSFs. *IEEE Microwave and Wireless Components Letter.*, 2018, vol. 28, no. 4, pp. 302–304. doi: 10.1109/LMWC.2018.2805462.
25. Morgan M., Boyd T. A. Theoretical and experimental study of a new class of reflectionless filter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, vol. 59, no. 5, pp. 1214–1221. doi: 10.1109/TMTT.2011.2113189.
26. Morgan M., Boyd T. A. Reflectionless filter structures. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015 vol. 63, no. 4, pp. 1263–1271. doi: 10.1109/TMTT.2015.2403841
27. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 1136–1142. doi: 10.1109/TEMC.2016.2548783.
28. Karri S., Surovtsev R. S., Mikola P. V., Skorniyakov I. A. Methodology for optimisation of strip devices based on coupled lines with modal decomposition. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 1, pp. 95–117 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-1-095-117.

29. Kim G. Y., Malygin K. P., Zhechev E. S., Konev V. Y., Nosov A. V. Hybrid method of protection against ultrashort pulses based on a meander line and a gas-discharge device. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 2, pp. 149–172 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-149-172.

30. Maljutin N. D., Loschilov A. G., Ladur A. A. Circuits of combined absorptive filters // 18th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (Sevastopol 08–12 September 2008). Sevastopol, Ukraine, 2008, pp. 489–490. doi: 10.1109/crmico.2008.4676470.

31. Loschilov A. G. *Analiz i optimizatsiya shirokopolosnykh ustroystv i antenn na osnove neregulyarnykh struktur kombinirovannogo tipa. Diss. kand. tehn. nauk* [Analysis and optimization of broadband devices and antennas based on irregular structures of a combined type. Ph.D. Tesis]. Tomsk state University of control systems and radioelectronics (TUSUR), 2008, 252 p. (in Russian).

32. Malyutin N. D., Chin T. T., Malyutin G. A. Non-reflective microwave filters (review). *Journal of Radio Electronics*, 2024, no. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.4>.

33. Thanh T. T., Loschilov A. G. Reflectionless Stripline Filters. *2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. IEEE, 2023, pp. 135–138. DOI: 10.1109/USBREIT58508.2023.10158882.

34. Chin To Thanh, Malyutin N. D. Small-sized non-reflective band-pass filter. Patent Russia, no. 2820780. Publish. 10.06.2024, bul. no. 16. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67987548> (accessed 12 August 2024) (in Russian).

35. Loschilov A. G., Chin T. T., Malyutin G. A. Stripe non-reflective band-pass tunable filter. Patent Russia, no. 2819096. Publish. 14.05.2024, bul. no. 14. Available at: <https://patenton.ru/patent/RU2819096C1.pdf> (accessed 12 August 2024) (in Russian).

36. Chin To Thanh, Malyutin N. D. Non-reflective bandpass filter of odd harmonics. Patent Russia, no. 2820791. Publis. 10.06.2024, bul. no. 16. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67987559> (accessed 12 August 2024) (in Russian).

37. Chin T. T. Non-reflective stripline bandpass filter of odd harmonics. *Ural Radio Engineering Journal*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 250–265. DOI: 10.15826/urej.2023.7.3.002.

38. Malyutin G. A., Chin T. T. Algorithm and programs for analysis and synthesis of devices based on distributed-concentrated circuits. *International Journal of Open Information Technologies*, 2024, vol. 12, no. 3, pp. 28–35.

Статья поступила 23 августа 2024 г.

Информация об авторах

Лощилов Антон Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент. Проректор по НР и Инновациям, заведующий кафедрой конструирования узлов и

деталей радиоэлектронной аппаратуры. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: устройства СВЧ, комплексы измерения параметров сред и устройств, неотражающие фильтры. E-mail: lag@main.tusur.ru

Малютин Николай Дмитриевич – доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник НИИ систем электрической связи. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: теория связанных линий, теория распределенно-сосредоточенных цепей, управляемые устройства СВЧ, технология СВЧ элементной базы. E-mail: ndm@main.tusur.ru

Чинь То Тхань – инженер по специальности «Радиотехнические системы». Аспирант, младший научный сотрудник. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: фильтры СВЧ неотражающего типа, проектирование и экспериментальное исследование полосковых устройств. E-mail: thanhvodoi1995@gmail.com

Малютин Георгий Александрович – магистр, аспирант. Младший научный сотрудник. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: моделирование и проектирование устройств СВЧ на распределенных и сосредоточенных элементах ВЧ и СВЧ диапазонов, информационные технологии. E-mail: mr.mageorge@yandex.ru

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Reducing return loss and suppressing out-of-band oscillations in interstage connections of communication systems using non-reflective frequency-selective microwave circuits

A. G. Loschilov, N. D. Malyutin, Chin To Thanh, G. A. Malyutin

Statement of the problem. Improving counteraction systems to communications equipment of unmanned aerial vehicles (UAVs) and other aviation equipment has become a very urgent task at present. This is, in particular, due to the fact that the power of emitted high-frequency pulses is constantly increasing (up to hundreds of megawatts). When exposed to radio frequency broadband signals, a reliable method of protection is the use of frequency-selective filters. This allows you to isolate useful components of the frequency spectrum and reflect unwanted ones. However, in this case, reflected signals can cause intermodulation interference, especially in devices with nonlinear elements. The creation of non-reflective filters allows you to solve the problem of reducing unwanted reflections. **Purpose.** The aim of the work is modeling and development of non-reflective band-pass filters with the following features: preservation of the properties of the frequency-selective circuit at a low level of return loss, both in the transparency band and at the cut-off frequencies with an overlap of at least 1:6, to consider the use of such filters in combination with traditional reflective filters to demonstrate the effects of reducing return loss in the cut-off frequency range and suppressing parasitic passbands with cascaded connection of nodes. **Methods.** Modeling and development of non-reflective band-pass filters is carried out on the basis of the basic circuit of non-reflective filters containing a section of coupled lines with loads in diagonal ports in the form of RLC circuits from identical series LC circuits shunted by resistance. When developing the NF model, the decomposition method into simpler blocks with distributed and lumped parameters was used. The development is based on numerical modeling data followed by experimental verification. **Novelty.** The novelty of the modeling is the presented solution to the problem of analysis based on the known parameters of the strip structure. The circuit and design are protected by patents for inventions. Their novelty is based on the features of the interaction of the lumped

RLC circuit and coupled lines that form the wave process. **Results.** The problems of analysis and experimental study of non-reflective stripline band-pass filters are solved. The mechanism of formation of the frequency response of non-reflective filters is investigated, consisting in the transformation of the frequency dependence of the impedance of loads on lumped elements into the antipode of this characteristic using the proposed circuit and design. In this case, band-pass filters containing a distributed base element in the form of coupled lines have a single passband and return losses at the level of -10 dB at out-of-band frequencies. The paper shows the effect of using non-reflective frequency-selective circuits based on coupled striplines and RLC elements, consisting in reducing return losses and suppressing out-of-band oscillations in interstage connections in various combinations of non-reflective and reflective devices. Cascade connection options in the form of traditional filters and non-reflective filters are considered. **Practical relevance.** Non-reflective circuits (filters) can serve as a "trap" for reflected waves at out-of-band frequencies and be used in equipment for interstage decoupling. In this case, return losses in circuits of cascade connection of devices are reduced from a value close to 0 to -16 dB, as well as out-of-band oscillations are suppressed from -20 to -40 dB.

Key words: non-reflective filters, coupled strip lines, RLC lumped circuits, cascade connection of non-reflective and reflective filters.

Information about Authors

Anton Gennadievich Loschilov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Vice-Rector for Research and Innovation, Head of the Department of Design of assemblies and parts of radio-electronic equipment. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: microwave devices, complexes for measuring parameters of media and devices, non-reflective filters. E-mail: yogl@mail.ru

Nickolay Dmitrievich Malyutin – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Chief Researcher, Professor, Director of the Research Institute of Electrical Communication Systems. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: theory of coupled lines, theory of distributed-lumped circuits, controlled microwave devices, technology of microwave element base. E-mail: ndm@main.tusur.ru

Chinh To Thanh – Engineer in speciality "Radio Engineering Systems", postgraduate student. Junior Research Fellow. Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics. Field of research: non-reflective type microwave filters, design and experimental study of strip devices. E-mail: thanhvodoi1995@gmail.com

Georgiy Aleksandrovich Malyutin – Master, postgraduate student. Junior researcher. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: modelling and designing of microwave devices on distributed and lumped elements of RF and microwave ranges, information technologies. E-mail: mr.mageorge@yandex.ru

Address: 634050, Russia, Tomsk, Lenin Av. 40.