

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.396.621
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-37-45>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Проектирование преселектора радиоприемника в диапазоне метровых волн

Е.В. Гуров ¹,
С.У. Увайсов ^{2, @},
В.В. Черноверская ²,
Р.М. Увайсов ²

¹ ООО «Сименс», Москва, 115184 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: uvaysov@yandex.ru

Резюме.

Цели. Качество преселектора радиоприемника в значительной мере определяет его основные характеристики, в том числе чувствительность. Преселектор обычно состоит из линейных элементов – катушек индуктивности, конденсаторов, малошумящих усилителей и ключей. При работе на высоких частотах нельзя считать эти компоненты идеальными, так как активные и реактивные паразитные параметры вносят значительный вклад в частотную характеристику цепей. Поэтому для моделирования высокочастотных схем требуются более сложные модели компонентов, учитывающие паразитные составляющие. Однако при применении для всех компонентов уточненных моделей или S-параметров вероятность получения неудовлетворительных результатов сохраняется, поскольку соединительные линии и контактные площадки также вносят заметные искажения в частотную характеристику. Это наблюдается и для коротких линий длиной около 5 мм, которые оказывают влияние на частотах порядка 100 МГц. Поэтому подобные явления необходимо учитывать при разработке. Цель работы – обеспечение требуемых характеристик преселектора в процессе его автоматизированного схемотехнического проектирования на основе компьютерного моделирования.

Методы. Использована методика Гурова Е.В. для проектирования аналоговых фильтров диапазона метровых волн, но применительно к преселектору радиоприемника. Она включает в себя методы дискретной оптимизации, имитационного моделирования Монте-Карло, метод моментов для электромагнитного моделирования с использованием функции Грина. Экспериментальные результаты получены путем изготовления опытного образца и измерений с помощью векторного анализатора цепей.

Результаты. Представлен процесс проектирования преселектора радиоприемника диапазона метровых волн, состоящего из двух аналоговых ключей, полосового фильтра на сосредоточенных компонентах, малошумящего усилителя и фильтра высоких частот. Приведены результаты моделирования и экспериментальные результаты, их сравнение.

Выводы. Проведенные численные и натурные исследования позволяют говорить о том, что методика Гурова Е.В. для проектирования аналоговых LC-фильтров в диапазоне метровых волн применима и для более сложных цепей, таких как преселектор радиоприемника.

Ключевые слова: радиоприемник, преселектор, SPICE-модель, матрица рассеивания, математическое моделирование, электронный компонент, микрополосковая линия, диапазон частот, паразитные параметры

• Поступила: 28.09.2021 • Доработана: 12.10.2021 • Принята к опубликованию: 19.10.2021

Для цитирования: Гуров Е.В., Увайсов С.У., Черноверская В.В., Увайсов Р.М. Проектирование преселектора радиоприемника в диапазоне метровых волн. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):37–45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-37-45>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Very high frequency radio receiver preselector design

Egor V. Gurov ¹,
Saygid U. Uvaysov ^{2, @},
Victoria V. Chernoverskaya ²,
Ruslan M. Uvaysov ²

¹ Siemens LLC, Moscow, 115184 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: uvaysov@yandex.ru

Abstract.

Objectives. The quality of a radio receiver preselector largely determines its main characteristics, including sensitivity. A preselector usually consists of linear elements: inductors, capacitors, low noise amplifiers, and switches. At high frequencies, the components cannot be considered as ideal ones, since active and reactive parasitic parameters significantly affect the frequency response of the components and, as a consequence, the network. Therefore, simulation of the networks requires more sophisticated component models, which take into account parasitic parameters. However, if refined components models are applied, it is still possible to obtain unsatisfactory results, since interconnections and footprints pads also affect the frequency response. This is true even if short lines with a length of about 5 mm are used at frequencies of about 100 MHz. These features must be taken into account for RF network design. The purpose of the work is to ensure the required characteristics of the preselector in the design process based on computer simulation.

Methods. Egor Gurov's methodology for analog VHF LC-filters was applied to radio receiver preselector design. The methodology contains the methods of discrete optimization, Monte-Carlo method, momentum analysis with Green's functions. Experimental results were obtained by prototype implementation and measurement with a vector network analyzer. The purpose of the work is to ensure the required preselector characteristics in the design process based on computer simulation.

Results. The article presents the preselector design process. The preselector contains two analog switches, an analog band-pass filter, an analog high-pass filter, and a low-noise amplifier. Simulation and experimental results with their comparison are presented in the article.

Conclusions. Satisfactory results were obtained. It means that Egor Gurov's method can be applied for more complex networks design such as radio receiver preselectors.

Keywords: radio receiver, preselector, SPICE model, scattering matrix, mathematical modeling, electronic component, microstrip line, frequency range, parasitic parameters

• Submitted: 28.09.2021 • Revised: 12.10.2021 • Accepted: 19.10.2021

For citation: Gurov E.V., Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Uvaysov R.M. Very high frequency radio receiver preselector design. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):37–45 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-37-45>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Максимальная чувствительность радиоприемника определяется уровнем его собственных шумов. Для достижения высокой чувствительности требуется тщательное проектирование узлов радиоприемных устройств [1, 2]. Наибольшее влияние на уровень внутренних шумов имеет преселектор, подключенный непосредственно к антенне. Это следует из формулы Фрииса для коэффициента шума в случае последовательного соединения нескольких каскадов:

$$F_{\text{total}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}, \quad (1)$$

где F_{total} – суммарный выходной шум; n – число каскадов; F_1 – коэффициент шума первого каскада; G_1 – коэффициент усиления по мощности первого каскада и т.д. Значения коэффициентов шума и коэффициентов усиления являются безразмерными величинами.

Можно отметить, что коэффициент шума первого каскада присутствует полностью в суммарном выходном шуме, а коэффициент шума второго каскада делится на коэффициент усиления первого [1]. Отсюда можно предположить, что для получения максимальной чувствительности радиоприемника необходимо установить малошумящий усилитель в непосредственной близости от антенны. Однако в [3] показано, что такой подход не всегда обеспечивает минимальное значение собственного шума. В условиях большого числа мощных излучающих станций, например, в крупных городах, широкополосный малошумящий усилитель может давать более высокий выходной шум, чем ожидается. Решением данной проблемы является установка перед малошумящим усилителем полосового фильтра, выделяющего интересующую полосу частот.

В диапазоне частот от нескольких десятков мегагерц до гигагерца для получения произвольной частотной характеристики (произвольной полосы пропускания и полосы задерживания) удобно использовать пассивные LC-фильтры. Процесс проектирования таких фильтров в настоящее время полностью автоматизирован (например, с помощью программного обеспечения *Nuhertz Technologies FilterSolutions*). Здесь используется хорошо

известный метод аппроксимации амплитудно-частотной характеристики, что позволяет сформировать электрическую схему фильтра с номинальными значениями параметров компонентов, а также получить передаточную функцию [4–7].

Данный метод предполагает, что используются идеальные пассивные компоненты (катушки индуктивности и конденсаторы), межсоединения не оказывают влияния на частотную характеристику. Однако в диапазоне частот выше 10 МГц неидеальность компонентов и влияние топологии оказывают существенное влияние на частотную характеристику [8]. В программном обеспечении *Nuhertz Technologies FilterSolutions* есть возможность учесть добротность компонентов и даже заменить их на S-параметры, однако отсутствует возможность учесть влияние топологии. Компания Keysight в своем программном обеспечении *Genesys* пытается полностью автоматизировать процесс проектирования фильтров с учетом паразитных параметров и топологии. В работе [9] представлен метод проектирования LC-фильтров в программе *Keysight Genesys* с учетом паразитных параметров компонентов, допусков и топологии.

Преселектор радиоприемника, помимо фильтра, может содержать малошумящий усилитель, который обычно имеет неравномерную амплитудно-частотную характеристику, а его входной и выходной импедансы могут отличаться от стандартных 50 Ом. Возможно применение нескольких полосовых фильтров, что требует использования аналоговых ключей.

В данной статье приведен пример проектирования преселектора радиоприемника, состоящего из аналоговых ключей, переключающих полосовые фильтры, одного полосового фильтра, малошумящего усилителя и фильтра высоких частот. По результатам моделирования был изготовлен макетный образец и представлены практические результаты, полученные с помощью векторного анализатора цепей [10]. Полученные данные можно рассматривать как развитие метода [9] для синтеза более сложных цепей, чем LC-фильтры.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается проектирование преселектора супергетеродинного радиоприемника с рабочей полосой частот 114...122 МГц (на частоте 121.5 МГц

необходимо получить максимальную чувствительность) и промежуточной частотой 87 МГц. Предполагается использование трех поддиапазонов, но в рамках данной статьи рассмотрен только один, при этом учтено влияние аналоговых ключей, осуществляющих переключение фильтров. Структурная схема входной цепи представлена на рис. 1.

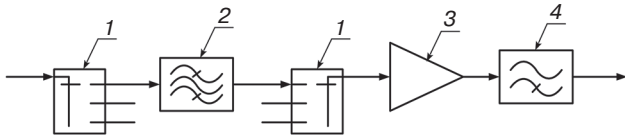


Рис. 1. Структурная схема преселектора:
1 – аналоговый ключ; 2 – полосовой фильтр;
3 – малозумящий усилитель; 4 – фильтр высоких частот

В качестве аналоговых ключей, переключающих полосовые фильтры, использована микросхема PE42430 компании Peregrine Semiconductor, а в качестве малозумящего усилителя – микросхема TQP3M9035 производителя Qorvo. Фильтр высоких частот необходим для дополнительного подавления входных сигналов, которые являются нежелательными, на частоте, равной промежуточной. Кроме того, он увеличивает крутизну спада и улучшает подавление мощных радиовещательных станций в диапазоне 88...108 МГц. Полосовой фильтр также должен подавлять зеркальный канал не менее чем на 50 дБ.

Таким образом, требования ко всей цепи можно описать следующими выражениями:

$$\begin{cases} A(f) > A_{\text{pass}}, & f_{\text{pass1}} \leq f \leq f_{\text{pass2}}, \\ A(f) < A_{\text{stop}}, & f < f_{IF}, f > f_{IM}, \\ K(f) > 1, \\ B_1(f) > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $A(f)$ – амплитудно-частотная характеристика цепи (зависимость коэффициента усиления цепи от частоты); f – частота; A_{pass} – минимально допустимое усиление сигнала в полосе пропускания;

A_{stop} – максимально допустимое усиление сигнала в полосе задерживания; f_{pass1} и f_{pass2} – минимальная и максимальная частота полосы пропускания, соответственно; f_{IF} – значение промежуточной частоты; f_{IM} – минимальная частота полосы зеркального канала; K и B_1 – коэффициенты стабильности, описание которых приведено на сайте Keysight Knowledge Center¹. Так как цепь имеет активный компонент, необходимо также удостовериться, что в нем не будет происходить самовозбуждения, для чего и вводятся требования на коэффициенты стабильности. Ограничения на коэффициенты стабильности должны выполняться на всех частотах. В частном случае можно ограничиться частотами моделирования, так как самовозбуждения каскада не будет, если он не усиливает сигнал. Стоит отметить, что представленные коэффициенты стабильности применяются для цепей, содержащих только один усилительный каскад.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕСЕЛЕКТОРА

Моделирование преселектора было проведено в программе *Keysight Genesys 2018*. В качестве моделей аналоговых ключей и малозумящего усилителя использованы их S-параметры, размещенные на сайте производителя. Указанная программа позволяет проводить моделирование цепей с применением S-параметров, SPICE моделей, а также проводить электромагнитный анализ топологии печатной платы методом моментов. Таким образом, учтены как влияния паразитных параметров компонентов, так и влияние межсоединений.

Функциональная схема преселектора представлена на рис. 2. С целью минимизации размеров

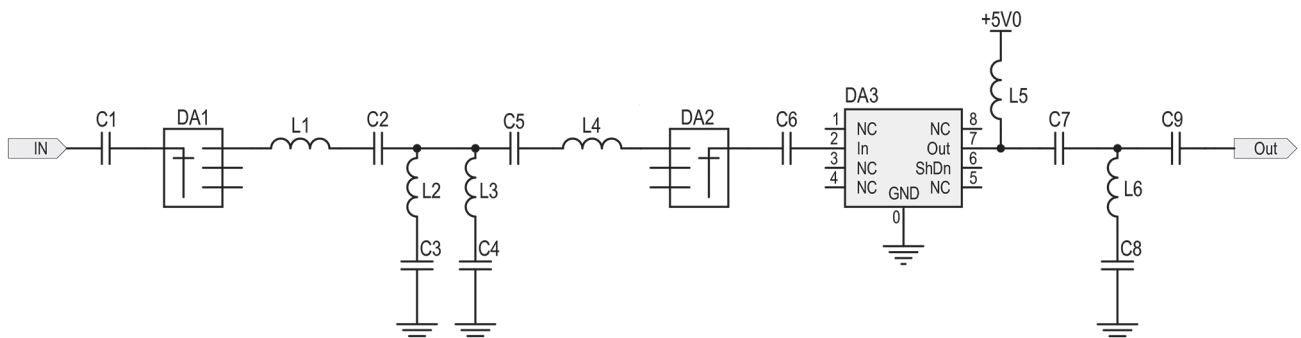


Рис. 2. Функциональная схема преселектора

¹ URL: <https://edadocs.software.keysight.com/genesys2018/simulation/getting-started-with-genesys-simulation/getting-started-with-measurements/stability-factor-and-measure>, дата обращения 25.10.2021. [URL: <https://edadocs.software.keysight.com/genesys2018/simulation/getting-started-with-genesys-simulation/getting-started-with-measurements/stability-factor-and-measure>. Accessed October 25, 2021.]

преселектора и удовлетворения условиям (2) использован полосовой фильтр третьего порядка. Сигнал с частотой, равной промежуточной частоте, подавляется с помощью шунтирующего последовательного LC-контура и последовательных конденсаторов.

Все конденсаторы использованы типоразмером 0402, катушки индуктивности – типоразмером 0603 или 1206. Применены блокирующие конденсаторы С1 и С6 с номинальным значением емкости 0.01 мкФ.

Далее была составлена схема для моделирования в среде *Keysight Genesys* с топологией. Все компоненты были соединены с помощью микрополосковых линий. Топологическая модель представлена на рис. 3. Помимо металлизации и посадочных мест она также содержит контуры компонентов на слое шелкографии.

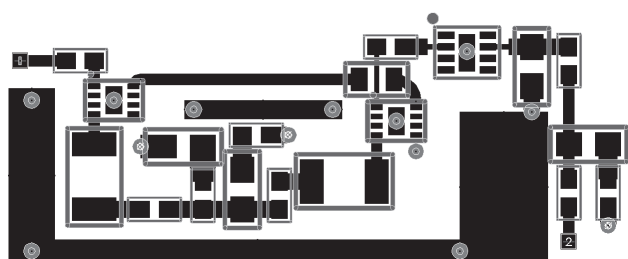


Рис. 3. Топология входной цепи

В качестве моделей катушек индуктивности и конденсаторов изначально были выбраны соответствующие модели с добротностью (идеальная катушка/конденсатор с добротностью или идеальная катушка/конденсатор с последовательно соединенным активным сопротивлением). Это позволяет осуществить вариацию номинальных значений параметров компонентов, чего не позволяют осуществить более сложные и точные модели. Предполагалось, что абсолютное активное последовательное сопротивление не окажет значительного влияния на точность расчета на данном этапе^{2,3} [11, 12]. Начальные значения параметров компонентов были получены с помощью

² Керамические конденсаторы MLCC: особенности применения. URL: <https://www.compel.ru/lib/56541>, дата обращения 25.10.2021. [Ceramic capacitors MLCC: application features. URL: <https://www.compel.ru/lib/56541>. Accessed October 25, 2021. (in Russ.)]

³ Физический смысл групповой задержки фильтра. Цифровые фильтры с линейной фазочастотной характеристикой. Теория и практика цифровой обработки сигналов. URL: <http://www.dsplib.ru/content/filters/linphase/linphase.html> [The physical meaning of the group delay of the filter. Digital filters with a linear phase-frequency characteristic. Theory and practice of digital signal processing. URL: <http://www.dsplib.ru/content/filters/linphase/linphase.html>. Accessed October 25, 2021. (in Russ.)]

встроенных средств автоматического синтеза фильтров.

Расчет номинальных значений параметров компонентов осуществлялся путем оптимизации в соответствии с методикой, приведенной в [9]. Согласно данной методике, сначала применяются простые модели компонентов и осуществляется подбор номинальных значений компонентов. После проведения оптимизации проводится анализ чувствительности и наименее чувствительный компонент заменяется более сложной моделью, где уже нельзя свободно в широком диапазоне менять значение основного параметра. Затем повторно проводят оптимизацию. И так до тех пор, пока все компоненты не будут заменены на более сложные и точные модели.

В результате все модели катушек индуктивности и конденсаторов были заменены соответствующими S-параметрами, предоставляемые производителями. Граничные условия, позволившие получить требуемую частотную характеристику всей цепи, установленные в программе *Keysight Genesys*, представлены на рис. 4. Весовые коэффициенты (Weight) были установлены, чтобы придать желаемый вид частотной характеристике. Изначально они все были равны 1, а в процессе оптимизации были изменены вручную. Ошибка по критерию умножается на данный коэффициент. Целью оптимизации являлась минимизация суммарной ошибки.

© Optimization Properties

Use	Measurement	Op	Target	Target Units	Weight	Min	Max	Units
<input checked="" type="checkbox"/>	S21	>	24.5	dB	4	112	125	MHz
<input checked="" type="checkbox"/>	S21	>	26	dB	5	118	124	MHz
<input checked="" type="checkbox"/>	S21	<	-29	dB	1		80	MHz
<input checked="" type="checkbox"/>	S21	<	-42	dB	1	255		MHz
<input checked="" type="checkbox"/>	S21	<	-39	dB	2	80	89	MHz
<input checked="" type="checkbox"/>	S22	<	-20	dB	1	112	125	(MHz)
<input checked="" type="checkbox"/>	S11	<	-12	dB	1	112	125	(MHz)
<input checked="" type="checkbox"/>		<		None				None

Рис. 4. Граничные условия оптимизации

Далее приведены результаты моделирования после оптимизации. На рис. 5 представлены амплитудно-частотная характеристика (S21), а также возвратные потери (S11, S22). Затененная область отображает указанные на рис. 4 граничные условия. На рис. 6 приведены значения коэффициентов стабильности (K , B_1), а также групповая задержка (ГВЗ) всей цепи³. В данном случае требования к групповой задержке не предъявлялись, и она представлена в ознакомительных целях.

Перечень компонентов, использованных при проведении моделирования, представлен в табл. 1.

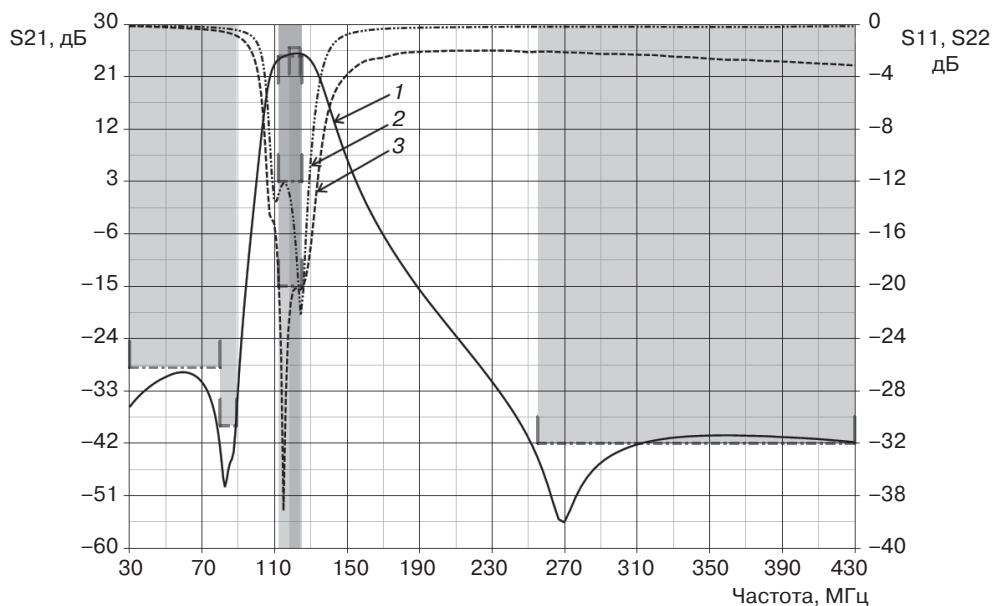


Рис. 5. АЧХ и возвратные потери преселектора:
1 – амплитудно-частотная характеристика (S21); 2 – возвратные потери (S11); 3 – возвратные потери (S22)

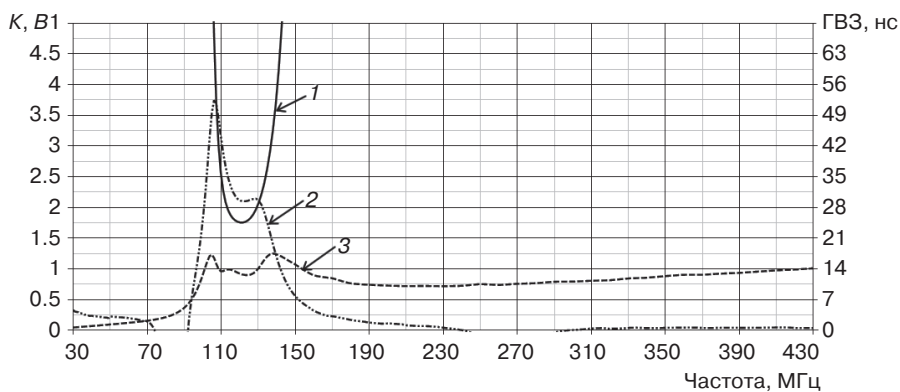


Рис. 6. Коэффициенты стабильности и групповая задержка преселектора: 1 – коэффициент стабильности K (должен быть больше 1); 2 – групповая задержка (ГВЗ); 3 – коэффициент стабильности B_1 (должен быть больше 0)

Таблица 1. Перечень компонентов входной цепи

Позиционные обозначения	Номинальные значения	Серийный номер	Производитель
C1, C6, C9	0.01 мкФ 5%	GRM1555C1E103JE01	Murata
C2	3.9 ± 0.1 пФ	GJM1555C1H3R9BB01	Murata
C3, C4, C8	43 пФ 2%	GJM1555C1H430GB01	Murata
C5	3.3 ± 0.05 пФ	GJM1555C1H3R3WB01	Murata
C7	33 пФ 5%	GJM1555C1H330JB01	Murata
DA1, DA2	–	PE42430	Peregrine
DA3	–	TQP3M9035	Qorvo
L1	390 нГн 2%	1206CS-391XGEB	Coilcraft
L2	75 нГн 2%	LQW18AN75NG80	Murata
L3	8.2 ± 0.2 нГн	LQW18AN8N2C80	Murata
L4	470 нГн 2%	1206CS-470XGEB	Coilcraft
L5	47 нГн 5%	LQW18AN47NJ80	Murata
L6	82 нГн 2%	LQW18AN82NG80	Murata

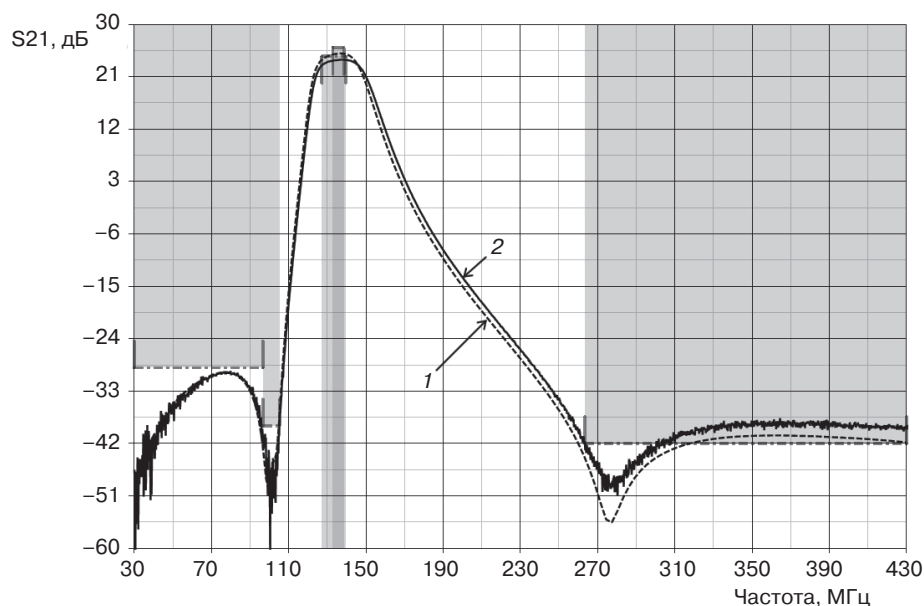


Рис. 7. АЧХ входной цепи: моделирование и экспериментальные данные:
1 – результат моделирования; 2 – экспериментальная характеристика

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотренный преселектор радиоприемника был выполнен на 4-слойной печатной плате из стеклотекстолита FR-4. Топология, представленная на рис. 3, была выполнена на верхнем слое, на ближайшем внутреннем слое присутствовал сплошной полигон, подключенный к «земле», то есть, являлся опорным слоем [8]. Входной сигнал подавался с разъема типа SMA, установленного на печатной плате, выходной сигнал снимался через разъем типа U.FL-R-SMT. Частотная характеристика была получена с помощью векторного анализатора цепей Rohde and Schwarz ZVA8.

Вместо конденсаторов серии GJM были установлены аналогичные конденсаторы серии GRM, имеющие статус «не рекомендовано для новых разработок», поскольку на момент монтажа данной цепи необходимые конденсаторы еще не были закуплены. Они имеют меньшую добротность, поэтому можно ожидать большее затухание в полосе, чем на модели, но без существенного искажения формы частотной характеристики.

Экспериментальные результаты и их сравнение приведены на рис. 7. На графике приведена только амплитудно-частотная характеристика (S_{21}). Возвратные потери и коэффициенты стабильности имели удовлетворительные характеристики.

В полосе пропускания коэффициент усиления экспериментальной характеристики оказался примерно на 1 дБ ниже, чем в модели. Как было указано ранее, это связано с применением низкодобротных керамических конденсаторов, отличных от тех, которые были использованы в модели. В целом, обе

характеристики имеют хорошее соответствие, особенно на низких частотах. В методе, описанном в [9], сказано, что можно добиться более качественной частотной характеристики путем подбора наиболее чувствительных компонентов уже на макетном образце. В данном случае этого сделано не было, так как частотная характеристика цепи удовлетворяет заданным требованиям. Тщательный подбор компонентов может быть полезен в составе уже готового устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Входная схема преселектора радиоприемника является наиболее важной, так как в значительной степени определяет его чувствительность. В статье рассмотрен процесс проектирования конкретной входной схемы преселектора радиоприемника в диапазоне метровых волн, состоящей из аналоговых ключей, одного полосового фильтра, малошумящего усилителя и дополнительного фильтра высоких частот. Аналоговые ключи и малошумящий усилитель имеют свои индивидуальные входные и выходные импедансы и неравномерность частотной характеристики. Проектирование проводилось с учетом этих параметров.

Спроектированный преселектор реализован на макетном образце, а экспериментальная характеристика получена с помощью векторного анализатора цепей. Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальной характеристики приведено на рис. 7. Можно отметить хорошее соответствие между ними. Несоответствие усиления в полосе пропускания на значение около 1 дБ обусловлено

применением конденсаторов из другой серии с меньшей добротностью, так как выбранных в процессе моделирования не было в наличии на этапе монтажа макетной платы, что и привело к некоторому росту активных потерь. Кроме того, улучшения частотной характеристики можно добиться подбором наиболее чувствительных компонентов непосредственно на макете, но для решения конкретных задач, для которых эта цепь проектировалась, этого не требовалось.

В [9] показано, что в диапазоне метровых волн на частотную характеристику аналогового фильтра значительное влияние оказывают паразитные параметры составных компонентов и межсоединения топологии печатной платы. По аналогии с предложенным в [9] методом проектирования аналоговых LC-фильтров спроектирована схема преселектора

радиоприемника. Показано, что метод также позволяет учитывать частотные характеристики аналоговых ключей и малошумящих усилителей, а также контролировать стабильность усилительных трактов.

Таким образом, представленные в статье результаты позволяют сделать вывод о том, что границы применимости метода проектирования аналоговых LC-фильтров, описанного в [9], могут быть расширены на разработку более сложных схем, имеющих в своем составе, в том числе и активные компоненты.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brannon B. Basics of designing a digital radio receiver (Radio 101). *Analog Devices*. 1998. URL: <https://www.analog.com/en/technical-articles/basics-designing-digital-radio-receiver.html>, дата обращения 25.10.2021
2. Гуров Е.В., Роткевич А.С. Экспериментальная оценка чувствительности радиоприемника при различных структурах входной цепи. В сб.: *Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов имени Е.В. Армского: материалы конференции*. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ; 2018. С. 135–136.
3. Гуров Е.В. Влияние радиочастотного фильтра на ухудшение соотношения сигнал/шум малошумящего усилителя: экспериментальная оценка. *Технологии электромагнитной совместимости*. 2017;2(61):49–55.
4. Paarmann L.D. *Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective*. NY: Kluwer Academic Publishers; 2001. 440 p.
5. Гуров Е.В., Увайсов С.У., Увайсова А.С., Увайсова С.С. Алгоритм дискретной параметрической оптимизации для решения задач синтеза аналоговых фильтров диапазона очень высоких частот. *Качество. Инновации. Образование*. 2019;2(160):53–63. <https://doi.org/10.31145/1999-513x-2019-2-53-63>
6. Смирнов А.В. Метод одновременной оптимизации характеристик электрических фильтров в частотной и временной областях. *Российский технологический журнал*. 2018;6(6):13–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>
7. Hassan A.H. *Design and Size Reduction Analysis of Micro Strip HBP Filters*. Master's Thesis in Electronics. Master's Program in Electronics/Telecommunications. Sweden, Gävle: University of Gävle. January, 2015. 68 p.
8. Кечиев Л.Н. *Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры*. М.: Группа ИДТ; 2007. 616 с. ISBN 978-5-94833-024-2
9. Gurov E., Uvaysova A.S., Uvaysov S.U., Uvaysov R.M. Design method for non-tunable LC-filters. In: *2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/MWENT47943.2020.9067472>

REFERENCES

1. Brannon B. Basics of designing a digital radio receiver (Radio 101). *Analog Devices*. 1998. URL: <https://www.analog.com/en/technical-articles/basics-designing-digital-radio-receiver.html>. Accessed October 25, 2021.
2. Gurov E.V., Rotkevich A.S. Experimental evaluation of the sensitivity of a radio receiver for various structures of the input circuit. In: *Mezhvuzovskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh spetsialistov imeni E.V. Armenskogo: materialy konferentsii (Collection of materials of the Interuniversity scientific and Technical Conference of students, Postgraduates and Young Professionals named after E.V. Armensky)*. Moscow: MIEM NIU VShE; 2018, p. 135–136. (in Russ.).
3. Gurov E.V. The influence of radio frequency filter on a low-noise amplifier signal to noise ratio degradation: experimental assessment. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestivosti = Technologies of Electromagnetic Compatibility*. 2017;2(61):49–55 (in Russ.).
4. Paarmann L.D. *Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective*. NY: Kluwer Academic Publishers; 2001. 440 p.
5. Gurov E.V., Uvaysov S.U., Uvaysova A.S., Uvaysova S.S. Discrete parametric optimization for very high frequency analog filters synthesis. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie. = Quality. Innovation. Education*. 2019;2(160):53–63 (in Russ.). <https://doi.org/10.31145/1999-513x-2019-2-53-63>
6. Smirnov A.V. Method of simultaneous optimization of radio devices performance in frequency and time domains. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(6):13–27 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>
7. Hassan A.H. *Design and Size Reduction Analysis of Micro Strip HBP Filters*. Master's Thesis in Electronics. Master's Program in Electronics/Telecommunications. Sweden, Gävle: University of Gävle. January 2015. 68 p.
8. Kechiev L.N. *Proektirovanie pechatnykh plat dlya tsifrovoi bystrodeistvuyushchei apparatury (Design of printed circuit boards for digital high-speed equipment)*. Moscow: Gruppya IDT; 2007. 616 p. ISBN 978-5-94833-024-2

- Хибель М. Основы векторного анализа цепей: пер. с англ. М.: Издательский дом МЭИ; 2009. 501 с. ISBN 978-5-383-01305-2
- Гуров Е.В., Увайсов С.У., Увайсова А.С., Увайсова С.С. Номинальные и эффективные значения параметров катушек индуктивности и конденсаторов на высоких частотах. *Российский технологический журнал*. 2019;7(4):44–53. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-44-53>
- Cain J. Parasitic Inductance of Multilayer Ceramic Capacitors. KYOCERA AVX Components Corporation. February 2002. URL: <https://www.avx.com/docs/techinfo/CeramicCapacitors/parasitc.pdf>
- Gurov E., Uvaysova A.S., Uvaysov S.U., Uvaysov R.M. Design Method for Non-Tunable LC-Filters. In: *2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/MWENT47943.2020.9067472>
- Hiebel M. *Fundamentals of Vector Network Analysis*. 3rd ed. München: Rohde & Schwarz GmbH & Co.; 2008. 420 p. [Hiebel M. *Osnovy vektornogo analiza tsepei*. Moscow: Izdatel'skii dom MEI; 2009. 501 p. ISBN 978-5-383-01305-2]
- Gurov E.V., Uvaysov S.U., Uvaysova A.S., Uvaysova S.S. Nominal and actual values of inductor and capacitor parameters at high frequencies. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(4):44–53 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-44-53>
- Cain J. Parasitic Inductance of Multilayer Ceramic Capacitors. KYOCERA AVX Components Corporation. February 2002. Available from URL: <https://www.kyocera-avx.com/docs/techinfo/CeramicCapacitors/parasitc.pdf>

Об авторах

Гуров Егор Владимирович, к.т.н., ведущий инженер (Исследования и разработки) ООО «Сименс» (115184, Россия, Москва, ул. Большая Татарская, д. 9). E-mail: gurov.yegor@gmail.com.

Увайсов Сайгид Увайсович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: uvaysov@yandex.ru. Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

Черновверская Виктория Владимировна, к.т.н., доцент, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: chernoverskaya@mirea.ru.

Увайсов Руслан Магомедович, магистрант 2-го года обучения, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: uvajsov.r.m@edu.mirea.ru.

About the authors

Egor V. Gurov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer (Research and Design), Siemens LLC (9, ul. Bolshaya Tatarskaya, Moscow, 115184 Russia). E-mail: gurov.yegor@gmail.com.

Saygid U. Uvaysov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Design and Production of Radio-electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: uvaysov@yandex.ru. Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

Victoria V. Chernoverskaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Production of Radio-electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: chernoverskaya@mirea.ru.

Ruslan M. Uvaysov, 2nd year Undergraduate Student, Department of Design and Production of Radio-electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: uvajsov.r.m@edu.mirea.ru.