

ISSN 2588-0454
ISSNe 2588-0462

URAL RADIO ENGINEERING JOURNAL

VOL. 3, № 4
2019



Ural Radio Engineering Journal

2019, Vol. 3, No. 4

Scientific and Technical Journal

Established in **2017**
Published **quarterly**

The articles are published in Russian and English

Issued in Russia

Founded by Ural Federal University
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
19, Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russia



Ural Radio Engineering Journal

2019, Т. 3, № 4

Научно-технический журнал

Журнал основан в 2017 г.
Выходит четыре раза в год

Статьи публикуются на русском и английском языках

Издается в России

Учредитель — Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Ural Radio Engineering Journal

2019, Vol. 3, No. 4

Editor in Chief

Sergey T. Knyazev, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Editorial council

Igor I. Abramov, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Bakytzhan S. Akhmetov, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Yuri P. Akulinichev, Tomsk State University of Control Systems and Technology, Tomsk, Russia

Stanislav N. Darovskikh, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Leonid G. Dorosinskiy, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Yuriy B. Gimpilevich, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Vladlen I. Gusevskij, National Research University MPEI, Moscow, Russia

Nalik T. Isemenbergenov, Kazakh National Research Technical University after K.I. Satbayev, Almaty, Republic of Kazakhstan

Vyacheslav E. Ivanov, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Reinhard Klette, Auckland University of Technology, Auckland, New Zealand

Victor G. Kobernichenko, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Vladislav Ya. Noskov, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Eugenij Ochin, Maritime University of Szczecin, Szczecin, Poland

Kirill M. Zeyde, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Vladimir V. Sazonov, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow, Russia

Sergey N. Shabunin, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Nikolaj I. Vojtovich, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Managing editor

Nataliya V. Papulovskaya, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Ural Radio Engineering Journal

2019, Т. 3, № 4

Главный редактор

Князев Сергей Тихонович, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Россия

Редакционный совет

Абрамов Игорь Иванович, Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Акулиничев Юрий Павлович, Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

Ахметов Бакытжан Сражатдинович, Казахский национальный
педагогический университет имени Абая, Алматы, Республика
Казахстан

Войтович Николай Иванович, Южно-Уральский государственный
университет, Челябинск, Россия

Гимпилевич Юрий Борисович, Севастопольский государственный
университет, Севастополь, Россия

Гусевский Владлен Ильич, Национальный исследовательский
университет «МЭИ», Москва, Россия

Даровских Станислав Никифорович, Южно-Уральский
государственный университет, Челябинск, Россия

Доросинский Леонид Григорьевич, Уральский федеральный
университет, Екатеринбург, Россия

Иванов Вячеслав Элизбарович, Уральский федеральный
университет, Екатеринбург, Россия

Исембергенов Налик Турегалиевич, Казахский национальный
технический университет им. К. И. Сатбаева, Алматы, Республика
Казахстан

Клемте Рейнхард, Оклендский технологический университет,
Окленд, Новая Зеландия

Коберниченко Виктор Григорьевич, Уральский федеральный
университет, Екатеринбург, Россия

Носков Владислав Яковлевич, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Россия

Очин Евгений, Морской университет Щецина, Щецин, Польша

Зейде Кирилл Михайлович, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Россия

Сазонов Владимир Васильевич, Московский физико-технический
институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

Шабунин Сергей Николаевич, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Россия

Управляющий редактор

Папуловская Наталья Владимировна, Уральский федеральный
университет, Екатеринбург, Россия

Ural Radio Engineering Journal**2019, Vol. 3, No. 4****CONTENTS**

<i>Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A., Shcherbakova I. Yu.</i> Numerical simulation of triple-barrier resonant tunneling diodes based on graphene	343
<i>Petrov S. A.</i> “Digital” Approaches to Expanding the Dynamic Range of Broadband Microwave Receivers.....	356
<i>Kolosov S. V., Batura M. P., Shatilova O. O.</i> Powerful relativistic generators on rectilinear electron beams with electrodynamic filters at the ends	369
<i>Lagovsky B. A.</i> Regression methods of detail images in remote sensing	378
<i>Govorov G. E.</i> Microwave channel selectivity enhancement technique based on usage of the electrically controlled microstrip filter	385
Publication Ethics	399
Article Submission Guidelines	405

Ural Radio Engineering Journal**2019, Т. 3, № 4****СОДЕРЖАНИЕ**

<i>Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Щербакова И. Ю. Численное моделирование трехбарьерных резонансно-туннельных диодов на основе графена</i>	343
<i>Петров С. А. «Цифровые» подходы к расширению динамического диапазона широкополосных инфрадиапазонных преобразователей СВЧ</i>	356
<i>Колосов С. В., Батура М. П., Шатилова О. О. Мощные релятивистские генераторы на прямолинейных электронных потоках с электродинамическими фильтрами на концах</i>	369
<i>Лаговский Б. А. Регрессионные методы детализации изображений объектов дистанционного зондирования</i>	378
<i>Говоров Г. Е. Повышение селективности СВЧ-тракта с помощью электронно-управляемого МПЛ-фильтра.....</i>	385
<i>Публикационная этика</i>	402
<i>Правила оформления статьи</i>	409

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2019.3.4.001

УДК 621.382

Численное моделирование трехбарьерных резонансно-туннельных диодов на основе графена

И. И. Абрамов , Н. В. Коломейцева, В. А. Лабунов,
И. А. Романова, И. Ю. Щербакова

Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники, Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6

 nanodev@bsuir.edu.by

Аннотация

Описана разработанная комбинированная численная самосогласованная модель для расчета электрических характеристик многобарьерныхnanoструктур на основе двухслойного графена. С ее использованием рассчитаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) трех-, четырех- и пятибарьерных резонансно-туннельных диодов (РТД) на основе графена на подложке диоксида кремния (SiO_2). Исследовано влияние ширин барьераов и квантовых ям на ВАХ трехбарьерных РТД на основе графена на подложке SiO_2 . Рассмотрены структуры с симметричными барьераами и ямами. Установлено, что увеличение ширин квантовых ям приводит к существенному уменьшению плотностей пиковых токов и токов долины, а увеличение ширин потенциальных барьераов приводит к незначительному уменьшению плотности тока первого пика, а также к увеличению плотностей токов второго пика и долины.

Рассчитаны также зависимости плотностей токов от напряжений для РТД с четырьмя и пятью барьераами на основе гексагонального нитрида бора (h-BN) и диоксида кремния (SiO_2) и квантовыми ямами на основе двухслойного графена. Проведено сравнение ВАХ исследованных РТД.

Ключевые слова

моделирование, графен, резонансно-туннельный диод, многобарьерные nanoструктуры, формализм волновых функций, численная комбинированная модель

Для цитирования

Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Щербакова И. Ю. Численное моделирование трехбарьерных резонансно-туннельных диодов на основе графена. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):343–355. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.001

Numerical simulation of triple-barrier resonant tunneling diodes based on graphene

I. I. Abramov , **N. V. Kolomejtseva**, **V. A. Labunov**,
I. A. Romanova, **I. Yu. Shcherbakova**

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
P. Browka St. 6, Minsk, 220013, Belarus

 nanodev@bsuir.edu.by

Abstract

Graphene exhibits a number of unique electrical, optical, thermal and other characteristics. Its use, in particular, is promising in the development of new nanoelectronics device structures. Conducting theoretical and experimental research of various types of nanostructures based on carbon nanomaterials will allow us to conclude which of them can later become a new device base for nanoelectronics.

A combined numerical self-consistent model for the electrical characteristics calculating of multi-barrier graphene-based nanostructures is described. The developed model of the wave function formalism is based on a numerical self-consistent solution of the Schrödinger and Poisson equations. This model is of the combined class, since it is based on the use of semiclassical and quantum-mechanical approaches for describing the contact and active regions of the structure.

Triple-barrier resonant tunneling diodes (RTDs) with quantum wells based on bilayer graphene are the objects of study in this work. The influence of the material of potential barriers on the current – voltage characteristics (IV – characteristics) of such structures is investigated. Corresponding calculations were carried out using the developed combined numerical self-consistent model. The influence of the widths of barriers and quantum wells on the IV-characteristics of triple-barrier RTDs based on graphene on a SiO_2 substrate is studied. Current densities vs voltage curves are obtained for such structures with symmetric barriers and wells. It was found that an increase in the width of quantum wells leads to a significant decrease in the density of peak currents and currents in the valley, and an increase in the width of potential barriers leads to a slight decrease in the current density of the first peak, as well as an increase in the current density of the second peak and valley.

The paper also presents the numerical simulation results of four- and five-barrier RTDs with quantum wells based on bilayer graphene. Multibarrier structures with barriers based on hexagonal boron nitride and silicon dioxide are studied. The influence of the potential barriers number and of their material on the shape of the IV-characteristics of the structures under study was analyzed.

Keywords

Simulation, graphene, resonant tunneling diode, multibarrier nanostructures, wave function formalism, combined numerical model

For citation

Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A., Shcherbakova I. Yu. Numerical simulation of triple-barrier resonant tunneling diodes based on graphene. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):343–355. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.001

Введение

Развитие нанотехнологии последних десятилетий привело к созданию новых наноматериалов, обладающих широким спектром уникальных электрических, оптических и магнитных свойств. К ним можно отнести синтезированные двумерные материалы и гетероструктуры, состоящие из слоев графена и h-BN, MoS_2 , WS_2 , SnS_2 , MoSe_2 , WSe_2 и др. [1–3].

Прогресс в изучении графена и его свойств свидетельствует о возможности его применения не только в электронной промышленности, но также и в других отраслях народного хозяйства [4]. Графен может использоваться в электронных компонентах и интегральных схемах (ИС), в частности при создании транзисторов, диодов, суперконденсаторов и т.п. Так, например, диоды и транзисторы на основе графена обладают рядом преимуществ перед полупроводниковыми аналогами, среди которых можно выделить высокую рабочую частоту приборов вследствие высокой подвижности носителей заряда в графене. Эти компоненты могут с успехом использоваться в качестве активных элементов высокочастотных генераторов и сверхбыстро действующих логических вентилей, а, следовательно, их применение в вычислительной технике может привести к существенному росту ее производительности.

Проектирование наноэлектронных схем с использованием приборных наноструктур на основе графена и доведение их до производства без соответствующего инструментария моделирования фактически невозможны. В связи с этим разработка адекватных физико-математических моделей и средств моделирования электрических свойств квантово-размерных наноструктур на основе графена является актуальной задачей. В НИЛ 4.1. БГУ-ИР, начиная с 2014 г., ведется разработка моделей приборных структур на основе графена и углеродных нанотрубок, в том числе моделей для исследования характеристик РТД [5–7] и графеновых транзисторов [7–9].

В качестве объектов исследования в данной работе выбраны многобарьерные квантово-размерные наноструктуры на основе графена. Перспективность использования многобарьерных структур на основе углеродных материалов связана с возможностью проектирования на их основе логических ячеек, лазеров,

солнечных элементов, фотодетекторов [4]. Массивы РТД недавно использовались в качестве терагерцовых осцилляторов [10]. Наш опыт исследования многоостровковых одноэлектронных цепочек и массивов [11–14] показывает, что подобный подход может использоваться, с одной стороны, для построения цепочек и матриц многобарьерных резонансно-туннельных структур, а с другой – для разработки функционально-интегрированных элементов ИС [14; 15] на их основе.

Используемая модель

Разработанная модель для расчета электрических характеристик многобарьерных наноструктур на основе двухслойного графена относится к классу комбинированных [14], так как основана на применении полуклассического и квантовомеханического подходов для описания приконтактных и активных областей структуры. Для учета эффектов сильного легирования в приконтактных областях применяется больцмановская аппроксимация статистики Ферми – Дирака [14]. Концентрация электронов в активной области находится в результате самосогласованного численного решения системы уравнений Шредингера и Пуассона. Для рассматриваемых многобарьерных РТД на основе графена к активной области относятся потенциальные барьеры и расположенные между ними квантовые ямы. Количество потенциальных барьеров и ям, их форма и геометрические размеры могут варьироваться.

В качестве исходной численной самосогласованной модели использовалась комбинированная модель приборных структур работы [6], адаптированная для случая расчета многобарьерных РТД на основе графена. Используемые уравнения, начальные условия, а также полученные в результате конечно-разностной аппроксимации соотношения для граничных и внутренних точек приборной структуры приведены в работах [6; 16; 17].

Рассмотрим необходимые особенности реализации разработанной модели. Сначала задаются данные об исследуемой структуре, к которым относятся: число областей, их размеры, высота и форма барьеров, эффективная масса, диэлектрическая проницаемость материалов областей и концентрация легирующей примеси. Далее выбирается алгоритм построения сетки пространственной дискретизации, а именно: равномерной или неравномерной сетки в зависимости от требований к решаемой задаче. Задаются также исходные параметры для моделирования, которыми являются прикладываемое смещение или диапазон его изменения, диапазон энергий для расчета коэффициента прозрачности и шаг изменения этих параметров, а также

температура и квазиуровень Ферми. Именно на этом этапе задается требуемая точность проведения расчетов.

Для начала расчетов необходимо определить начальное приближение для потенциала, которое задается исходя из предположений электронейтральности и справедливости для подвижных носителей заряда больцмановской аппроксимации статистики Ферми – Дирака для всего прибора. После этого с помощью самосогласованного численного решения одномерных уравнений Шредингера и Пуассона решается транспортная задача для зоны проводимости. При этом уравнение Пуассона решается во всей области приборной структуры между контактами, а уравнение Шредингера в заданной области, включающей активную. В результате вычислений находится самосогласованный потенциал и заряд в приборе.

На втором этапе численно решается только уравнение Шредингера для зоны проводимости. На основе полученных волновых функций рассчитывается коэффициент прохождения. Плотность тока рассчитывается на основе известной формулы Тсу-Есаки.

Результаты моделирования

Структура исследуемых трехбарьерных РТД на основе графена и соответствующая зонная диаграмма при нулевом напряжении представлены на рис. 1.

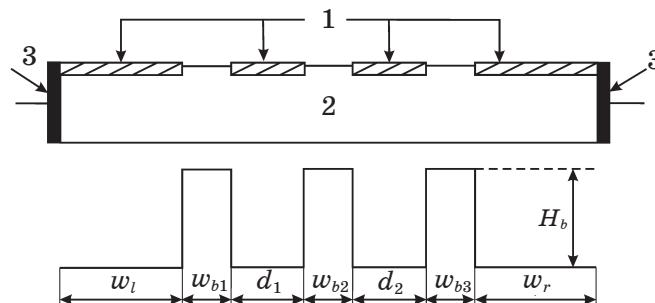


Рис. 1. Структура трехбарьерного РТД на основе графена и энергетическая диаграмма зоны проводимости: 1 – графен; 2 – подложка; 3 – контакты

Fig. 1. Triple-barrier graphene-based RTD structure and conduction band energy: 1 – graphene; 2 – substrate; 3 – contacts

К активной области трехбарьерных РТД относятся области барьеров с ширинами w_{b1} , w_{b2} , w_{b3} и высотой H_b , а также заключенные между ними квантовые ямы с ширинами d_1 и d_2 . Пассивными областями для данных структур являются области графена со стороны эмиттера и коллектора, расположенные

между контактами и барьерами активной области с ширинами w_l и w_r , соответственно (рис. 1). Моделирование проводилось следующих основных параметрах: ширины приконтактных областей – 17 нм, концентрация примеси в приконтактных областях $N_D = 7,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$, температура окружающей среды – 300 К. Высота потенциальных барьера H_b в рассматриваемой структуре составляет 3,58 эВ [18], а эффективная масса для двухслойного графена задавалась равной $0,041m_0$ (m_0 – масса покоя электрона) [19]. Ширины квантовых ям и потенциальных барьера варьировались.

Было проведено исследование влияния ширины потенциальных барьера на ВАХ (точнее зависимости плотности тока от напряжения; в дальнейшем просто ВАХ) трехбарьерного РТД. На рис. 2 приведены результаты моделирования для трех случаев, когда ширины барьера равны: $w_{b1} = w_{b2} = w_{b3} = 1,2 \text{ нм}$ (кривая 1); $w_{b1} = w_{b2} = w_{b3} = 1,3 \text{ нм}$ (кривая 2) и $w_{b1} = w_{b2} = w_{b3} = 1,4 \text{ нм}$ (кривая 3). При этом ширины квантовых ям фиксировались и задавались равными $d_1 = d_2 = 3,4 \text{ нм}$. Установлено, что увеличение ширин потенциальных барьера приводит к незначительному уменьшению плотности тока первого пика, а также к увеличению плотностей токов второго пика и долины.

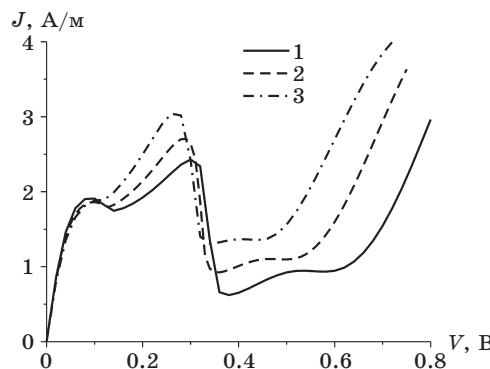


Рис. 2. Влияние ширин потенциальных барьера на ВАХ трехбарьерного РТД на основе графена на подложке SiO_2

Fig. 2. Influence of potential barriers widths on the IV-characteristics of a triple-barrier graphene-based RTD on a SiO_2 substrate

На рис. 3 представлены результаты исследования влияния ширин квантовых ям для трех случаев, а именно: $d_1 = d_2 = 3,0 \text{ нм}$ (кривая 1); $d_1 = d_2 = 3,4 \text{ нм}$ (кривая 2) и $d_1 = d_2 = 4,0 \text{ нм}$ (кривая 3). При этом ширины потенциальных барьера фиксировались и задавались равными $w_{b1} = w_{b2} = w_{b3} = 1,3 \text{ нм}$. Видно, что увеличение ширин квантовых ям приводит к существенному уменьшению плотностей пиковых токов и токов долины.

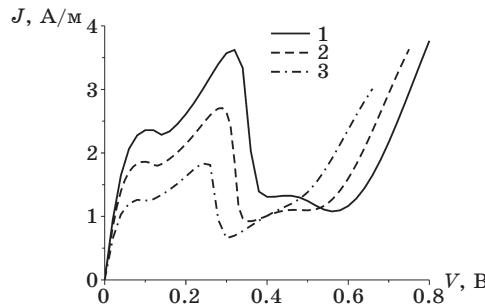


Рис. 3. Влияние ширин квантовых ям на ВАХ трехбарьерного РТД на основе графена на подложке SiO_2

Fig. 3. Influence of quantum well widths on the IV-characteristics of a triple-barrier graphene-based RTD on a SiO_2 substrate

Ранее в работе [20] были представлены результаты исследования влияния ширин квантовых барьеров и ям на ВАХ трехбарьерных РТД на основе гетероструктуры графен/h-BN. Полученные результаты моделирования трехбарьерных РТД на подложках SiO_2 и h-BN качественно согласуются. Однако отметим, что для структур на подложке SiO_2 изменение ширин квантовых барьеров и ям приводит к более существенному изменению плотностей пиковых токов и токов долины, что связано с влиянием материала подложки.

Рисунки 4 и 5 иллюстрируют результаты моделирования ВАХ четырех- и пятибарьерных РТД на основе двухслойного графена. Кривые 1 (рис. 4, 5) получены для многобарьерных РТД на подложке h-BN, а кривые 2 – для РТД на подложке SiO_2 . Ширины барьеров этих РТД задавались равными 1,3 нм, а квантовых ям 3,4 нм. Высота потенциальных барьеров H_b для РТД на основе графена на подложках h-BN и SiO_2 составляла 3,137 эВ [21] и 3,58 эВ [18] соответственно.

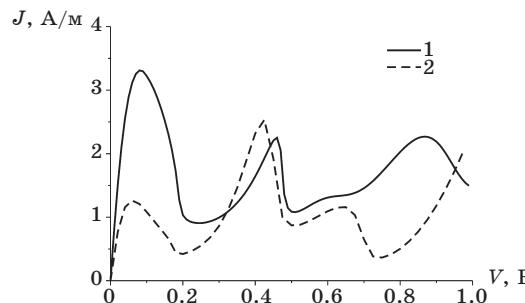


Рис. 4. ВАХ четырехбарьерных РТД на основе графена на подложках h-BN (кривая 1) и SiO_2 (кривая 2)

Fig. 4. IV-characteristics of graphene-based four-barrier RTDs on h-BN (curve 1) and SiO_2 (curve 2) substrates

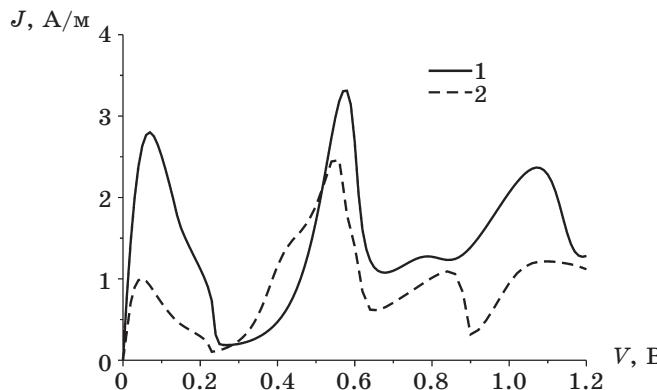


Рис. 5. ВАХ пятибарьерных РТД на основе графена на подложках h-BN (кривая 1) и SiO_2 (кривая 2)

Fig. 5. IV-characteristics of graphene-based five-barrier RTDs on h-BN (curve 1) and SiO_2 (curve 2) substrates

Как следует из графиков на рис. 4 и 5, разработанная комбинированная численная самосогласованная модель может использоваться для расчета ВАХ РТД на основе более сложных четырех- и пятибарьерных гетероструктур графен/h-BN и графен/ SiO_2 .

Заключение

Исследовано влияние ширин барьеров и квантовых ям на ВАХ трехбарьерных РТД на основе графена на подложке SiO_2 . Получены зависимости плотностей токов от напряжений для трехбарьерных РТД на основе графена с симметричными барьерами и ямами. Установлено, что увеличение ширин квантовых ям приводит к существенному уменьшению плотностей пиков токов и токов долины, а увеличение ширин потенциальных барьеров приводит к незначительному уменьшению плотности тока первого пика, а также к увеличению плотностей токов второго пика и долины.

Проиллюстрирована применимость разработанной комбинированной численной самосогласованной модели для расчета ВАХ РТД и на основе более сложных четырех- и пятибарьерных структур на подложках h-BN и SiO_2 .

Программа, реализующая разработанную модель, включена в систему моделирования наноэлектронных устройств NANODEV, разрабатываемую в БГУИР с 1995 г. [22; 23].

Описанные в статье результаты были доложены на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии».

Литература

1. Aliofkazraei M., Ali N., Milne W. I., Ozkan C. S., Mitura S., Gervasoni J. L. (eds) *Graphene science handbook: Applications and industrialization*. CRC Press; 2016.
2. Dragoman M., Dragoman D. *2D Nanoelectronics: physics and devices of atomically thin materials*. Springer International publishing; 2017.
3. Ратников П. В., Силин А. П. Двумерная графеновая электроника: современное состояние и перспективы. *Успехи физических наук*. 2018;188(12):1249–1287. DOI: 10.3367/UFNr.2017.11.038231
4. Ferrari A. C., Bonaccorso F., Fal'ko V., Novoselov K. S. et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems. *Nanoscale*. 2015;(7):4598–4810. DOI: 10.1039/C4NR01600A
5. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Моделирование резонансно-туннельных диодов на основе графена на подложках различного типа. *Нано- и микросистемная техника*. 2015;(11):3–10.
6. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Моделирование резонансно-туннельных приборных структур на основе углеродных наноматериалов. *Нанотехнологии, разработка, применение: XXI век*. 2017;(3):3–11.
7. Abramov I. I., Labunov V. A., Kolomejtseva N. V., Romanova I. A., Shcherbakova I. Y. Simulation of graphene field-effect transistors and resonant tunneling diodes based on carbon nanomaterials. In: *Proc. SPIE 11022, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2018 (15 March 2019)*, 110220F. DOI: 10.1117/12.2520729
8. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Щербакова И. Ю. Моделирование полевых графеновых транзисторов с одним и двумя затворами в различных режимах функционирования. *Нанотехнологии, разработка, применение: XXI век*. 2018;(3):16–24. DOI: 10.18127/j22250980-201803-02
9. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Щербакова И. Ю. Моделирование передаточных характеристик двухзатворных полевых графеновых транзисторов. *Нано- и микросистемная техника*. 2018;(11):643–650. DOI: 10.17587/nmst.20.643-650
10. Kasagi K., Suzuki S., Asada M. Large-scale array of resonant-tunneling-diode terahertz oscillators for high output power at 1THz. *Journal of Applied Physics*. 2019;125(15):151601. DOI: 10.1063/1.5051007
11. Абрамов И. И., Новик Е. Г. Характеристики металлических одноэлектронных транзисторов на различных материалах. *Физика и техника полупроводников*. 2000;34(8):1014–1019.
12. Абрамов И. И., Игнатенко С. А., Новик Е. Г. Влияние параметров конструкции и материалов на вольт-амперные характеристики двухсторонковых одноэлектронных структур. *Физика и техника полупроводников*. 2002;36(10):1272–1277.
13. Абрамов И. И., Игнатенко С. А., Новик Е. Г. Модель многосторонковых одноэлектронных цепочек на основе метода Монте-Карло. *Физика и техника полупроводников*. 2003;37(5):583–587.

14. Абрамов И. И. *Основы моделирования элементов микро- и наноэлектроники*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2016.
15. Абрамов И. И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. В. Резонансно-туннельные структуры. *Нано- и микросистемная техника*. 2007;(3):57–70.
16. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В. Комбинированная модель резонансно-туннельного диода. *Физика и техника полупроводников*. 2005;39(9):1138–1145.
17. Абрамов И. И., Гончаренко И. А. Численная комбинированная модель резонансно-туннельного диода. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2002;7(3):54–60.
18. Xu K., Zeng C., Zhang Q., Yan R., Wang K., Seabaugh A. C., Xing H. G., Suehle J. S., Richter C. A., Gundlach D. J., Nguyen N. V. Direct measurement of Dirac point energy at the graphene/oxide interface. *Nano Lett.* 2013;13(1):131–136.
19. Zou K., Hong X., Zhu J. Effective mass of electrons and holes in bilayer graphene: Electron-hole asymmetry and electron-electron interaction. *Physical Review B*. 2011;84:085408. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.085408
20. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Численное моделирование многобарьерных резонансно-туннельных структур на основе двухслойного графена. В: *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КРЫМИКО'2017): материалы 27-й Междунар. Крымской конф., г. Севастополь, 10–16 сентября 2017 г.* Севастополь: Севастопол. гос. ун-т; 2017. Т. 4. С. 1108–1114.
21. Fiori G., Betti A., Bruzzone S., D'Amico P., Iannaccone G. Nanodevices in Flatland: Two-dimensional graphene-based transistors with high Ion/Ioff ratio. In: *2011 International Electron Devices Meeting, 5–7 Dec. 2011*. Washington, DC, USA; 2011. DOI: 10.1109/IEDM.2011.6131533
22. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Игнатенко С. А., Королев А. В., Новик Е. Г., Рогачев А. И. Система моделирования наноэлектронных приборов – NANODEV. *Микроэлектроника*. 2003;32(2):124–133.
23. Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomejtseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities. In: *Proc. SPIE 7521, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2009, (26 February 2010)*, 75211E. DOI: 10.1117/12.853521

References

1. Aliofkhazraei M., Ali N., Milne W. I., Ozkan C. S., Mitura S., Gervasoni J. L. (eds) *Graphene science handbook: Applications and industrialization*. CRC Press; 2016.
2. Dragoman M., Dragoman D. *2D Nanoelectronics: physics and devices of atomically thin materials*. Springer International publishing; 2017.
3. Ratnikov P. V., Silin A. P. Two-dimensional graphene electronics: current status and prospects. *Phys. Usp.* 2018;188(12):1249–1287. (In Russ.) DOI: 10.3367/UFNr.2017.11.038231

4. Ferrari A. C., Bonaccorso F., Fal'ko V., Novoselov K. S. et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems. *Nanoscale*. 2015;(7):4598–4810. DOI: 10.1039/C4NR01600A
5. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Simulation of Graphene Resonant Tunneling Diodes on the Substrates of Various Types. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*. 2015;(11):3–10.
6. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Simulation of resonant tunneling devices based on carbon nanomaterials. *Nanotekhnologii, razrabotka, primenie: XXI vek = Journal Nanotechnology: development and applications – XXI Century*. 2017;(3):3–11. (In Russ.)
7. Abramov I. I., Labunov V. A., Kolomejtseva N. V., Romanova I. A., Shcherbakova I. Y. Simulation of graphene field-effect transistors and resonant tunneling diodes based on carbon nanomaterials. In: *Proc. SPIE 11022, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2018 (15 March 2019)*, 110220F. DOI: 10.11117/12.2520729
8. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A., Shcherbakova I. Y. Simulation of graphene field-effect transistors with one and two gates in various operation modes. *Nanotekhnologii, razrabotka, primenie: XXI vek = Journal Nanotechnology: development and applications – XXI Century*. 2018;(3):16–24. (In Russ.) DOI: 10.18127/j22250980-201803-02
9. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A., Shcherbakova I. Y. Simulation of Transfer Characteristics of Dual-Gate Graphene Field-Effect Transistors. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*. 2018;(11):643–650. DOI: 10.17587/nmst.20.643-650
10. Kasagi K., Suzuki S., Asada M. Large-scale array of resonant-tunneling-diode terahertz oscillators for high output power at 1THz. *Journal of Applied Physics*. 2019;125(15):151601. DOI: 10.1063/1.5051007
11. Abramov I. I., Novik E. G. Parameters of metal single-electron transistors based on different materials. *Semiconductors*. 2000;34(8):975–980.
12. Abramov I. I., Ignatenko S. A., Novik E. G. Influence of the design and material parameters on the current-voltage characteristics of two-island single-electron chains. *Semiconductors*. 2002;36(10):1192–1197.
13. Abramov I. I., Ignatenko S. A., Novik E. G. Model of multi-island single-electron arrays based on the Monte Carlo method. *Semiconductors*. 2003;37(5):564–568.
14. Abramov I. I. *Bases of micro- and nanoelectronic devices simulation*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2016. (In Russ.)
15. Abramov I. I. Problems and Principles of Physics and Simulation of Micro- and Nanoelectronics Devices. Part V. Resonant-Tunneling Structures. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*. 2007;(3):57–70. (In Russ.)

16. Abramov I. I., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V. A combined model of a resonant-tunneling diode. *Semiconductors*. 2005;39(9):1102–1109.
17. Abramov I. I., Goncharenko I. A. Combined numerical model of a resonant-tunneling diode. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*. 2002;7(3):54–60. (In Russ.)
18. Xu K., Zeng C., Zhang Q., Yan R., Wang K., Seabaugh A. C., Xing H. G., Suehle J. S., Richter C. A., Gundlach D. J., Nguyen N. V. Direct measurement of Dirac point energy at the graphene/oxide interface. *Nano Lett.* 2013;13(1):131–136.
19. Zou K., Hong X., Zhu J. Effective mass of electrons and holes in bi-layer graphene: Electron-hole asymmetry and electron-electron interaction. *Physical Review B*. 2011;84:085408. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.085408
20. Abramov I. I., Kolomeitseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Numerical simulation of multi-barrier resonant tunneling structures based on bi-layer graphene. In: *Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2017). Proceedings of the 27 International Conference, Sevastopol, September 10–16, 2017*. Sevastopol: Sevastopol State University; 2017. Vol. 4, pp. 1108–1114. (In Russ.)
21. Fiori G., Betti A., Bruzzone S., D'Amico P., Iannaccone G. Nanodevices in Flatland: Two-dimensional graphene-based transistors with high Ion/Ioff ratio. In: *2011 International Electron Devices Meeting, 5–7 Dec. 2011*. Washington, DC, USA; 2011. DOI: 10.1109/IEDM.2011.6131533
22. Abramov I. I., Goncharenko I. A., Ignatenko S. A., Korolev A. V., Novik E. G., Rogachev A. I. NANODEV: A Nanoelectronic-Device Simulation Software System. *Russian Microelectronics*. 2003;32(2):97–104. DOI: 10.1023/A:1022604118886
23. Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities. In: *Proc. SPIE 7521, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2009, (26 February 2010)*, 75211E. DOI: 10.1117/12.853521

Благодарности

Финансирование работы проведено в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы» («Нанотех»).

Acknowledgments

Funding was carried out in the framework of the State Program of Scientific Research of the Republic of Belarus “Functional and Composite Materials, Nanomaterials” (“Nanotech”).

Информация об авторах

Абрамов Игорь Иванович, профессор, доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники, заведующий НИЛ 4.1, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

Коломейцева Наталья Владимировна, научный сотрудник НИЛ 4.1, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

Лабунов Владимир Архипович, доктор технических наук, академик НАН Беларуси, академик РАН, профессор, заведующий НИЛ 4.6, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

Романова Ирина Анатольевна, научный сотрудник НИЛ 4.1, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6

Щербакова Ирина Юрьевна, младший научный сотрудник НИЛ 4.1, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

Information about the authors

Igor I. Abramov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of Laboratory, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; P. Browka St. 6, Minsk, 220013, Belarus.

Natali V. Kolomejtseva, Researcher, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; P. Browka St. 6, Minsk, 220013, Belarus.

Vladimir A. Labunov, Academician of NASB, Academician of RAS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; P. Browka St. 6, Minsk, 220013, Belarus.

Irina A. Romanova, Researcher, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; P. Browka St. 6, Minsk, 220013, Belarus.

Irina Y. Shcherbakova, Researcher, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; P. Browka St. 6, Minsk, 220013, Belarus.

Поступила / Received: 02.12.2019

Принята в печать / Accepted: 15.12.2019

«Цифровые» подходы к расширению динамического диапазона широкополосных инфрадинных преобразователей СВЧ

С. А. Петров

АО «НПК «Тристан» Россия, 107014, г. Москва, ул. 2-я Боевская, 2

✉ s_petrov@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены основные факторы, ограничивающие динамический диапазон широкополосных приемных устройств СВЧ. Предложены системотехнические подходы к проектированию, состоящие в автоматической регулировке встроенными средствами режимов работы элементов приемного и гетеродинных трактов. Представлены результаты исследования инфрадинного преобразователя с расширенным реальным динамическим диапазоном. Сделан вывод о целесообразности применения в широкополосных преобразователях СВЧ цифровых автоматических схем питания и управления.

Ключевые слова

широкополосное приемное устройство СВЧ, расширенный динамический диапазон, реальный динамический диапазон, инфрадинный преобразователь СВЧ, цифровая автоматическая схема питания и управления, динамическая регулировка

Для цитирования

Петров С. А. «Цифровые» подходы к расширению динамического диапазона широкополосных инфрадинных преобразователей СВЧ. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):356–368. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.002

“Digital” Approaches to Expanding the Dynamic Range of Broadband Microwave Receivers

S. A. Petrov

NPK Tristan, 2 Boevskaya, 2 Str., Moscow, 107014, Russia

✉ s_petrov@mail.ru

Abstract

This article considers the main factors limiting the dynamic range of broadband microwave receivers. We suggest system-technical approaches to engineering design. These approaches consist of the automatic regulation by built-in means of operating mode of elements of receiving and heterodyne tracts. We demonstrate the results of the study of the infrahydne converter with an extended real dynamic range. It is concluded

that it is expedient to use digital automatic power supply and control circuits in broadband microwave converters.

Keywords

broadband microwave receiver, extended dynamic range, real dynamic range, infradyne converter, digital automatic power supply and control circuits, dynamic regulation

For citation

Petrov S. A. “Digital” Approaches to Expanding the Dynamic Range of Broadband Microwave Receivers. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):356–368. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.002

1. Введение

Широкополосные приемные устройства СВЧ для систем пассивной радиолокации в настоящее время строятся в основном по инфрадинной схеме с двойным преобразованием частоты. Важнейшей составной частью этих устройств, во многом определяющей их технические характеристики, и в частности значение реального динамического диапазона (РДД) [1], является широкополосный инфрадинный преобразователь (ШИП) СВЧ. К приборам такого типа предъявляются высокие требования по технологичности, массогабаритным показателям и особенно электрическим характеристикам. Важной задачей при проектировании ШИП СВЧ является расширение его реального динамического диапазона. Границы РДД определяются предельной чувствительностью, верхней границей линейности амплитудной характеристики (ВГЛАХ), уровнями побочных каналов приема (ПКП) и собственных паразитных составляющих (СПС). Возможные схемотехнические пути улучшения этих характеристик подробно описаны в недавних публикациях [2–4].

Несмотря на достигнутые успехи, очевидно, что аналоговая СВЧ-схемотехника современных ШИП не в состоянии преодолеть всех факторов ограничения РДД, возникающих в широком диапазоне электрической перестройки в интервале рабочих температур. В настоящей статье рассмотрены системотехнические подходы к расширению РДД, основывающиеся на использовании в ШИП СВЧ автоматических схем питания и управления.

2. Постановка задачи

ШИП СВЧ по сути представляет собой сканирующий приемник с внешними гетеродинами и предназначен для последовательного переноса диапазона рабочих частот входных сигналов в полосу промежуточной частоты для дальнейшей обработки. Это технически сложный прибор, в технологическом цикле производства которого значительное место занимает комплексная

регулировка. Обобщенная структурная схема ШИП СВЧ представлена на рис. 1.

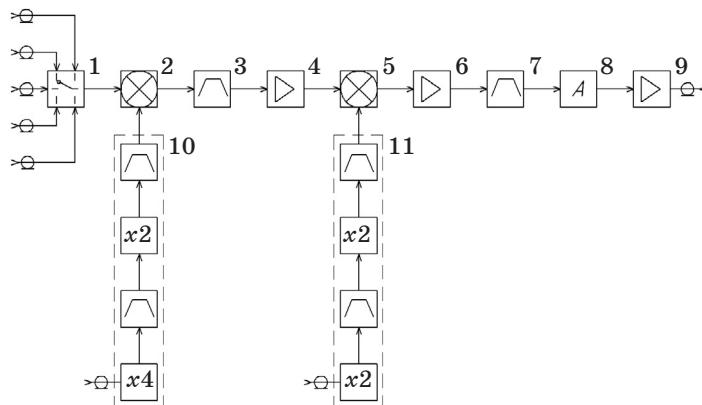


Рис. 1. Обобщенная структурная схема ШИП СВЧ:

1 – входная коммутационная схема, 2 – первый смеситель, 3 – усилитель первой промежуточной частоты (ПЧ1), 4 – фильтр ПЧ1, 5 – второй смеситель, 6 – усилитель второй промежуточной частоты (ПЧ2), 7 – фильтр ПЧ2, 8 – управляемый аттенюатор, 9 – выходной тракт, 10 – тракт первого гетеродина, 11 – тракт второго гетеродина

Fig. 1. Common block diagram of the infradyne converter:

1 – input switching circuit, 2 – first mixer, 3 – amplifier of the first intermediate frequency (IF1), 4 – filter IF1, 5 – second mixer, 6 – amplifier of the second intermediate frequency (IF2), 7 – filter IF2, 8 – regulated attenuator, 9 – output path, 10 – path of the first heterodyne, 11 – path of the second heterodyne

Нижняя граница РДД ШИП СВЧ, заданная предельной чувствительностью, вычисляется по формуле Найквиста:

$$P_{\min} = 10 \log(k \cdot T \cdot B \cdot F), \quad (1)$$

где P_{\min} – нижняя граница РДД, дБВт; k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/Гц; T – температура окружающей среды, градусы Кельвина; B – шумовая полоса, Гц; F – коэффициент шума, ед.

Коэффициент шума ШИП СВЧ определяется по формуле Фрииса для каскадно-включенных цепей:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{\prod_{i=1}^{n-1} G_i}, \quad (2)$$

где F_1, F_2, F_3 и F_n – коэффициенты шума первого, второго, третьего и последнего каскада соответственно, ед.; G_i – коэффициент передачи отдельного каскада, ед.

Помимо Найквистовых шумов, нижнюю границу РДД также ограничивают собственные паразитные спектральные составляющие. СПС представляют собой паразитные сигналы на выходе

ШИП, наличие которых не связано с входным сигналом. Превышение уровня СПС порога чувствительности приводит к появлению ложного отклика.

Верхняя граница РДД в большей степени связана с линейностью элементов выходного тракта. Приведенная ко входу верхняя граница зависит от коэффициента передачи ШИП СВЧ и уровня 1-дБ компрессии по выходу следующим образом:

$$P_{\max} = P1dB - G, \quad (3)$$

где P_{\max} – верхняя граница РДД, дБВт; $P1dB$ – точка однодицельной компрессии по выходу, дБВт; G – коэффициент передачи, дБ.

При заданном значении $P1dB$ неравномерность коэффициента передачи означает соответствующее уменьшение РДД. Фактически верхняя граница РДД снижается на величину суммарной неравномерности коэффициента передачи. В свою очередь суммарная неравномерность для ШИП СВЧ связана с мгновенной АЧХ и значением среднего коэффициента передачи следующим соотношением:

$$\Delta G_{\text{сум}} = |\sigma G_{\text{cp}}| + \Delta G_{\text{мгн}}, \quad (4)$$

где $\Delta G_{\text{мгн}}$ – неравномерность мгновенной АЧХ, дБ; $\Delta G_{\text{сум}}$ – суммарная неравномерность коэффициента передачи ШИП СВЧ, дБ; σG_{cp} – отклонение G_{cp} от номинального G_{cp} , дБ.

При этом неравномерность мгновенной АЧХ и средний коэффициент передачи для текущей частоты настройки определяется следующим образом:

$$\Delta G_{\text{мгн}} = G_{\max} - G_{\min} \text{ и } G_{\text{cp}} = (G_{\min} + G_{\max})/2, \quad (5)$$

где G_{cp} – средний коэффициент передачи, дБ; G_{\max} – максимальный коэффициент передачи, дБ; G_{\min} – минимальный коэффициент передачи, дБ.

Номинальное значение среднего коэффициента передачи определяется исходя из технических требований. Это значение является оптимальным с точки зрения соотношения чувствительности и динамического диапазона. На практике действующий G_{cp} отличается от номинального G_{cp} , а мгновенная АЧХ имеет неравномерность. Оба параметра связаны с частотой настройки ШИП СВЧ и зависят от рабочей температуры. Следовательно, необходимо решить задачу минимизации $\Delta G_{\text{сум}}$ и, в частности, величин σG_{cp} и $\Delta G_{\text{мгн}}$ для каждой частоты настройки в диапазоне рабочих температур.

Наличие побочных каналов приема в преобразовательном устройстве также ограничивает РДД. Обобщенная формула ПКП выглядит следующим образом:

$$f_{\text{ПКП}} = m/n \cdot f_{\text{рет}} \pm 1/n \cdot f_{\text{пч}}, \quad (6)$$

где $f_{\text{ПКП}}$ – частота побочного канала приема; $f_{\text{рет}}$ – частота гетеродина; $f_{\text{пч}}$ – промежуточная частота; m, n – целые числа.

По сути, в ШИП СВЧ присутствует бесконечное число ПКП, подавление которых зависит от выбранного частного плана, конструкции и характеристик активных и пассивных элементов схемы. Так как ПКП зависят от уровня входного сигнала, они ограничивают верхнюю границу РДД.

Фильтры и другие элементы с частотно-избирательными свойствами обеспечивают подавление наиболее мощных ПКП и СПС. Появление ПКП и СПС в том числе обусловлено неидеальностью узлов умножения первого и второго гетеродина. Неоптимальный режим работы СВЧ устройств гетеродинных трактов может приводить к возникновению паразитных сигналов, которые в свою очередь образуют ПКП и СПС. Для уменьшения уровня паразитных сигналов необходима настройка параметров питания соответствующих элементов. До недавнего времени регулировка усиительных и умножительных элементов ШИП СВЧ фактически осуществлялась вручную. Для изменения питающих напряжений приходилось многократно заменять элементы схем питания. То обстоятельство, что ШИП СВЧ должен работать в широком диапазоне температур, еще больше осложняло настройку.

Расширить возможности регулировки позволила схема с управляемыми источниками питания [5]. Эти устройства представляли собой многоканальные стабилизаторы, выходные напряжения которых устанавливались без изменения схемотехники с помощью специального программного обеспечения. Использование управляемых источников питания позволило снизить трудоемкость и существенно повысить эффективность комплексной регулировки. За счет этого удалось несколько улучшить электрические характеристики изделия.

Такая схема питания, однако, имела существенный недостаток. Регулировка с помощью управляемых источников питания носила технологический характер. Ее целью был подбор таких значений питающих напряжений, которые обеспечили бы работоспособность широкополосных активных элементов на всех частотах настройки и в полном диапазоне температур. Понятно, что такая регулировка носила компромиссный и усредненный характер. Чтобы достичь более высоких показателей подавления паразитных сигналов, необходимо управление режимами работы активных элементов гетеродинных трактов в процессе эксплуатации.

Оптимальное решение поставленных выше задач возможно только с помощью встроенных средств автоматической регулировки. В зависимости от текущего состояния изделия СВЧ-эле-

менты приемного и гетеродинного трактов должны управляться системой, интегрированной в модуль. По сути, необходима динамическая регулировка ШИП СВЧ.

3. Основные подходы

Структура приемного тракта ШИП СВЧ включает в себя как широкополосные элементы, так и элементы с частотно-избирательными свойствами. Последние фактически определяют форму мгновенной АЧХ. В их число входят фильтры и усилители первой и второй промежуточных частот. Широкополосные элементы, которыми являются входная коммутационная цепь и первый смеситель, в меньшей степени влияют на АЧХ мгновенной полосы частот. При этом мгновенная АЧХ формируется таким образом, что от частоты настройки меняется в основном только ее наклон. Корректируя наклон АЧХ в зависимости от частоты настройки можно добиться уменьшения ее неравномерности. Функцию активного корректора АЧХ в данном случае может выполнить СВЧ-эквалайзер. СВЧ-эквалайзер должен работать в диапазоне частот выходного тракта и обладать соответствующим быстродействием.

Помимо снижения неравномерности мгновенной АЧХ, на каждой частоте настройки необходимо минимизировать отклонение среднего коэффициента передачи от номинального значения. При этом средний коэффициент передачи ШИП СВЧ также зависит от температуры окружающей среды. Для его частотной и температурной компенсации в схему необходимо ввести управляемый аттенюатор СВЧ. Аттенюатор должен обладать малым временем переключения, высокой точностью ослабления и низкой неравномерностью АЧХ.

Одновременно с уменьшением разброса коэффициента передачи необходимо увеличение подавления уровня паразитных составляющих в выходном спектре гетеродинных трактов ШИП СВЧ. Это достижимо при помощи автоматической регулировки режимов работы усилительных и умножительных элементов. Осуществлять такую регулировку возможно посредством изменения их питающих напряжений с помощью управляемых источников питания.

В настоящее время с помощью быстродействующих ЦАП и устройств управления стало возможным использование цифровых автоматических схем питания и управления (АСПиУ). Внедрение АСПиУ дает возможность реализовать предложенные выше подходы к расширению РДД. Цифровые аппаратные и программные средства в сочетании с аналоговыми исполнительными устройствами позволяют осуществлять автоматиче-

скую регулировку СВЧ элементов приемного и гетеродинных трактов. На рис. 2 представлена упрощенная функциональная схема цифровой АСПиУ.

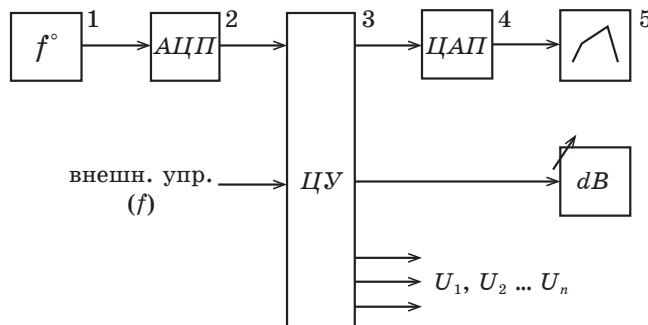


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема цифровой АСПиУ:

1 – датчик температуры; 2 – аналого-цифровой преобразователь; 3 – цифровое управляющее устройство; 4 – цифро-аналоговый преобразователь; 5 – аналоговый корректор АЧХ; 6 – цифровой дискретный аттенюатор

Fig. 2. Simplified function diagram of the digital automatic power and control circuit:

1 – temperature sensor; 2 – analog-to-digital converter; 3 – digital control device; 4 – digital-to-analog converter; 5 – analog frequency response corrector; 6 – digital discrete attenuator

4. Реализация АСПиУ в составе модуля ШИП СВЧ

На основе предложенных подходов в составе модуля ШИП СВЧ разработана автоматическая схема питания и управления. Плата питания и управления с АСПиУ изображена на рис. 3.

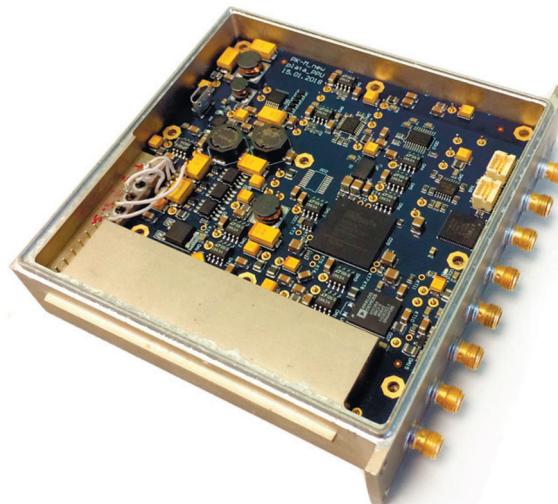


Рис. 3. Плата питания и управления с АСПиУ

Fig. 3. Construction of the automatic power and control circuit

Модуль имеет рабочий диапазон частот от 2 до 18 ГГц. Он выполнен в герметичном корпусе с раздельной СВЧ и НЧ частью. НЧ – цифровая часть, которая включает в себя АСПиУ, реализована на единой многослойной печатной плате с использованием ПЛИС в качестве управляющего устройства. Модуль с цифровой АСПиУ имеет свои конструктивные особенности. Импульсные и цифровые устройства в схеме питания при наличии паразитных связей приводят к появлению помех в СВЧ-трактах. При проектировании особое внимание было уделено обеспечению требуемой развязки между СВЧ- и НЧ-частями. Плата питания и управления спроектирована таким образом, чтобы обеспечить необходимую фильтрацию и минимизировать уровни просачивания тактовых сигналов и других помех.

Также для обеспечения работы АСПиУ ШИП СВЧ необходима начальная калибровка модуля. Такая калибровка состоит из нескольких циклов измерений и корректировок отдельных параметров СВЧ. В число измеряемых характеристик входят мгновенная АЧХ, коэффициент шума, уровень ПКП и СПС. Измерения параметров проводятся на всех частотах настройки в интервале рабочих температур.

На первом этапе необходимо выполнить калибровку мгновенной АЧХ. При измерении мгновенной АЧХ путем регулирования управляющего напряжения эквалайзера добиваются наименьшей разницы между минимальным и максимальным значением коэффициента передачи в мгновенной полосе частот. Полученные значения управляющего напряжения для каждой частоты настройки записываются в калибровочную таблицу в память управляющего устройства. Так как наклон АЧХ также линейно зависит от рабочей температуры, дополнительно задается корректирующий коэффициент.

На втором этапе с откалиброванной мгновенной АЧХ проводятся измерения среднего коэффициента передачи во всем рабочем диапазоне. Из полученных данных для автоматической корректировки вычисляются необходимые значения ослабления аттенюатора для каждой точки настройки, равные текущему $\sigma G_{\text{ср}}$. Путем измерений при пониженной и повышенной рабочей температуре определяется поправочный коэффициент для термокомпенсации.

После выравнивания мгновенной АЧХ и среднего коэффициента передачи проводятся измерения уровней ПКП и СПС. При необходимости путем регулировки режимов работы элементов приемного и гетеродинных трактов добиваются минимизации уровня ПКП или СПС. Значения соответствующих питающих

напряжений для каждой частоты настройки и температуры за-писываются в память АСПиУ.

Как правило, процесс калибровки включает в себя несколько итераций полного цикла измерений и корректировок. При этом для повышения точности калибровки и уменьшения времени ее проведения используется специализированный автоматизированный измерительный стенд [6].

После завершения процесса начальной калибровки АСПиУ может использовать полученные данные для автоматического регулирования ШИП СВЧ.

Далее представлены сравнительные данные измерений модуля с АСПиУ и без нее. На рис. 4 изображены мгновенные АЧХ, измеренные с шагом 500 МГц в полном рабочем диапазоне ча-стот. В верхней части график продемонстрирована АЧХ ШИП СВЧ без коррекции. Мгновенная АЧХ в некоторых точках име-ет неравномерность до 3 дБ. Значение σG_{cp} в худшей точке со-ставляет порядка 6 дБ. В целом разница между минимальным и максимальным значением коэффициента передачи во всем ди-апазоне рабочих частот составляет более 8 дБ. Такой разброс оз-начает соответствующее ухудшение РДД ШИП СВЧ.

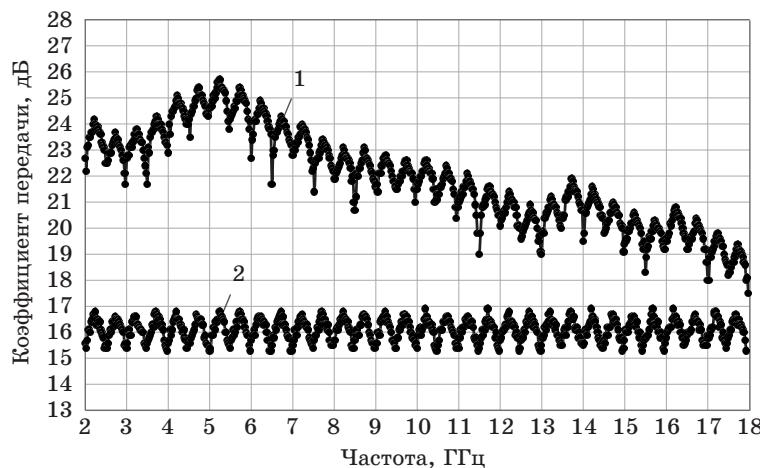


Рис. 4. Коэффициент передачи ШИП СВЧ:
1 – коэффициент передачи до коррекции; 2 – коэффициент передачи после коррекции

Fig. 4. Gain of intradyne converter:
1 — gain before correction, 2 — gain after correction

Путем коррекции с помощью АСПиУ удалось уменьшить $\Delta G_{\text{мгн}}$ и σG_{cp} .

Соответствующая АЧХ ШИП СВЧ изображена в нижней ча-стии рис. 4. $\Delta G_{\text{мгн}}$ в среднем ниже на 1–1,5, а σG_{cp} на всех ча-стотах настройки в интервале температур не превышает 1 дБ.

Необходимо отметить, что эффективность частотной и температурной компенсации непосредственно зависит от следующих факторов:

- шага ослабления аттенюатора;
- точности измерения датчика температуры;
- равномерности распределения тепла по элементам конструкции;
- величины температурного гистерезиса.

На рис. 5 отдельно представлена мгновенная АЧХ на частоте настройки 7,25 ГГц до и после коррекции с помощью эквалайзера СВЧ. Во втором случае неравномерность мгновенного АЧХ не превышает 1,7 дБ.

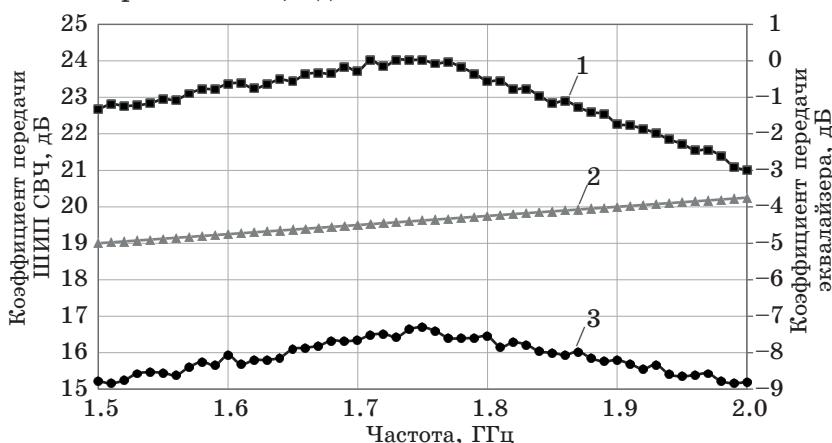


Рис. 5. Мгновенная АЧХ ШИП СВЧ:
1 – мгновенная АЧХ до коррекции; 2 – АЧХ эквалайзера СВЧ;
3 – мгновенная АЧХ после коррекции

Fig. 5. Instantaneous frequency response of the infradyne converter:
1 – instantaneous frequency response before correction; 2 – frequency response of the microwave equalizer; 3 – instantaneous frequency response after correction

На рис. 6 представлены результаты измерений ПКП и СПС ШИП СВЧ. Маркерами (\blacktriangle) обозначены уровни паразитных сигналов на выходе преобразователя, измеренные без использования автоматической регулировки с помощью АСПиУ. ПКП измерялись при сигнале с мощностью, приведенной к выходу, +10 дБм, равной значению $P1dB - 3dB$. Видно, что типичный уровень ПКП и СПС составляет от -60 до -55 дБм. Также в модуле присутствует ПКП с уровнем -46 дБм.

Отличие модуля с применением автоматической регулировкой заключается в существенно лучшем подавлении ПКП и СПС. Измеренные значения паразитных сигналов на выходе ШИП СВЧ для этого случая представлены на рис. 6 и обозначены соответ-

ствующими маркерами (■). Относительный уровень наибольшего ПКП не превышает минус 55 дБм. В целом это на 5–15 дБ лучше, чем для ШИП СВЧ без АСПиУ. Количество типичных ПКП и СПС, уровень которых составляет более –70 дБм, существенно уменьшено.

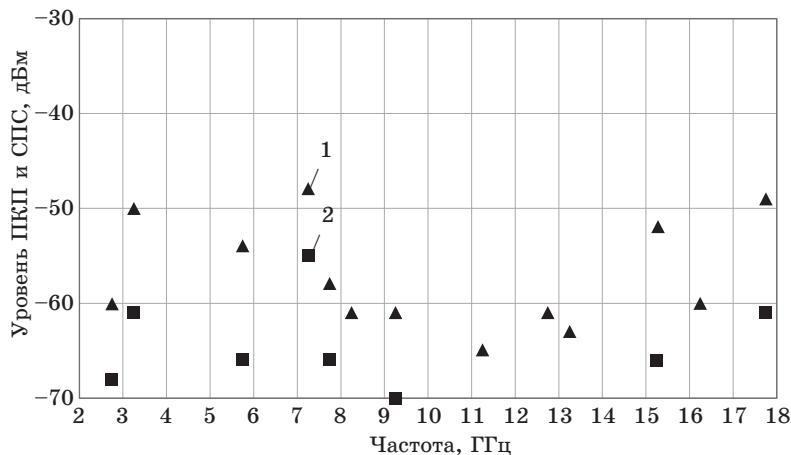


Рис. 6. Уровни подавления ПКП и СПС ШИП СВЧ:

1 – ПКП и СПС до коррекции; 2 – ПКП и СПС после коррекции

Fig. 6. Suppression level of spurious receiving channels (SRC) and self-parasitic components (SPC) of the infradyne converter:
1 – SRC and SPC before correction; 2 – SRC and SPC after correction

На основании проведенных измерений можно сделать вывод, что несмотря на некоторое усложнение конструкции, предложенные технические решения позволили существенно расширить РДД. Динамическая регулировка на базе цифровой АСПиУ обеспечила достижение практического максимума технических возможностей РДД ШИП СВЧ.

5. Заключение

В настоящее время для сложных систем пассивной радиолокации, помимо растущих требований по электрическим характеристикам, все более актуальной становится потребность в устройствах, разработанных для использования по принципу «без настройки». В компьютерной терминологии такая технология известна под названием «plug & play» (включил и работай).

Рассмотренные в статье подходы к проектированию не только позволили улучшить качественные и количественные показатели инфрадиных преобразователей ШИП СВЧ, но и получить функционально законченное устройство, использование которого возможно без дополнительной регулировки.

Представленный модуль имеет низкую суммарную неравномерность коэффициента передачи и высокое подавление паразитных сигналов за счет использования автоматической схемы питания и управления. Интегрированная цифровая схема питания и управления позволяет уменьшить функциональную нагрузженность на потребителя, повышая при этом надежность работы аппаратуры назначения.

Очевидно, что, кроме требований к электрическим характеристикам к ШИП СВЧ, дополнительно будут ставиться задачи повышения степени интеграции и функциональных возможностей. Возможность решения таких перспективных задач заложена в предложенных системотехнических подходах.

Список литературы

1. Куприянов П. В. Широкополосные приемные устройства СВЧ с расширенным динамическим диапазоном. *Радиотехника*. 2006;(3):8–13.
2. Cornwell G., Gupta Ch. *Investigate Wideband Frequency Converters*. Available at: <https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21846688/investigate-wideband-frequency-converters>
3. Cripps S. C. *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*. Artech House, Inc., 1999.
4. Katz A. *Linearizing High Power Amplifiers*. Available at: <https://www.lintech.com/PDF/hpa.pdf>
5. Андросов А. В., Куприянов П. В., Гутенко С. В., Лебедев К. В., Петров С. А., Кожин Е. С. Приемопередающий модуль цифрового радиолокатора 8-мм диапазона длин волн. *Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника*. 2015;(1):21–28.
6. Гусев А. П., Куликов А. В., Куприянов П. В., Пожидаев В. Н. Автоматизированный комплекс для измерения параметров широкополосных приемных устройств СВЧ с расширенным динамическим диапазоном. *Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника*. 2009;(2):23–30.

References

1. Kouprianov P. V. Wide-Band Microwave Receivers with an Extended Dynamic Range. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2006;(3):8–13. (In Russ.)
2. Cornwell G., Gupta Ch. *Investigate Wideband Frequency Converters*. Available at: <https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21846688/investigate-wideband-frequency-converters>
3. Cripps S. C. *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*. Artech House, Inc., 1999.
4. Katz A. *Linearizing High Power Amplifiers*. Available at: <https://www.lintech.com/PDF/hpa.pdf>
5. Androsov A. V., Kupriyanov P. V., Gutenko S. V., Lebedev K. V., Petrov S. A., Kozhin E. S. The transmit-receive module of 8-mm wave-

length range radar. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1: SVCh-tehnika = Electronic Engineering*. 2015;(1):21–28. (In Russ.)

6. Gusev A. P., Kulikov A. V., Kupriyanov P. V., Pozhidayev V. N. An automated complex for measuring parameters of wideband receiving microwave devices with expanded dynamic range. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1: SVCh-tehnika = Electronic Engineering*. 2009;(2):23–30. (In Russ.)

Информация об авторе

Петров Сергей Александрович, начальник сектора разработки РЭА СВЧ АО «НПК «Тристан»; Россия, 107014, г. Москва, ул. 2-я Боевская, 2.

Information about the author

Sergey A. Petrov, Head of the Development Sector, JVC “SPC “Tristan”; 2 Boevskaya, 2 Str., Moscow, 107014, Russia

Поступила / Received: 24.09.2019

Принята в печать / Accepted: 30.10.2019

DOI 10.15826/urej.2019.3.4.003

УДК 621.385.6

Мощные релятивистские генераторы на прямолинейных электронных потоках с электродинамическими фильтрами на концах

С. В. Колосов , **М. П. Батура**, **О. О. Шатилова**Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь
 kolosov@bsuir.by

Аннотация

Представлены результаты расчетов мощных генераторов СВЧ-излучения на прямолинейных электронных потоках на резонаторах с электродинамическими фильтрами на концах резонаторов. В основу методики расчета процессов в нерегулярном волноводе положены идеи А. Г. Свешникова, основанные на методе преобразования координат, который позволяет искать решение задачи возбуждения нерегулярного волновода путем разложения этого решения по системе базисных функций регулярного волновода. Это позволяет свести 3-мерную задачу к одномерной, что существенно сокращает объем вычислений и повышает точность решения. Расчеты проводились с помощью компьютерной программы Gyro-K. Наличие электродинамических фильтров на концах волновода позволило повысить добротность резонатора и уменьшить СВЧ-излучение в область катода. Было показано, что мощность таких генераторов может достигать 21 Мвт, что может обеспечить эффективное подавление работы электронных устройств предполагаемого противника.

Ключевые слова

генераторы СВЧ, нерегулярные волноводы, релятивистские электронные потоки

Для цитирования

Колосов С. В., Батура М. П., Шатилова О. О. Мощные релятивистские генераторы на прямолинейных электронных потоках с электродинамическими фильтрами на концах. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):369–377. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.003

Powerful relativistic generators on rectilinear electron beams with electrodynamic filters at the ends

S. V. Kolosov , **M. P. Batura**, **O. O. Shatilova**Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, st. P. Brovka, 6, Minsk, 220013, Belarus
 kolosov@bsuir.by

Abstract

This paper presents the results of the calculations of high-power generators of microwave radiation on the rectilinear electron beam on

resonators with electrodynamic filters at the ends of the resonators. The results of calculations of high-power generators of microwave radiation on rectilinear electron beam on resonators with electrodynamic filters at the ends of the resonators are presented. The methodology for calculating processes in the irregular waveguide is based on the ideas of A. G. Sveshnikov, based on the coordinate transformation method, which allows searching for a solution of the excitation problem of the irregular waveguide by expanding this solution into the system of basic functions of the regular waveguide. allows you to search for a solution to the excitation problem of an irregular waveguide by expanding this solution into a system of basic functions of a regular waveguide. This allows reducing the 3-dimensional problem to the one-dimensional one allows us to reduce a 3-dimensional problem to a one-dimensional one, which significantly reduces the amount of computation and increases the accuracy of the solution. The calculations are carried out using the computer program Gyro-K. The presence of electrodynamic filters at the ends of the waveguide makes it possible to increase the quality factor of the resonator and reduce microwave radiation to the cathode region. We demonstrate that the power of such generators may reach 21 MW, which may provide effective suppression of the electronic devices of the alleged enemy.

Keywords

microwave generators, irregular waveguides, relativistic electron beams

For citation

Kolosov S. V., Batura M. P., Shatilova O. O. Powerful relativistic generators on rectilinear electron beams with electrodynamic filters at the ends. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):369–377. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.003

1. Введение

Имеются прекрасные обзоры по релятивистской высокочастотной электронике и ее применению (например, [1]). Возможности создания высокоэффективных мощных электронных приборов СВЧ приведены в работах [2–5]. Однако приведенные в этих работах варианты Черенковских генераторов и клистрон-генераторов обладают одним недостатком. На входе пространства взаимодействия электронного потока с электромагнитными волнами стоит отражающий фильтр в виде одной круговой канавки. Он не может достаточно эффективно отражать бегущую на катод встречную волну. Это понижает КПД генератора и может привести к выходу его из строя. В данной работе была поставлена задача минимизировать проходящую на катод мощность встречной волны за счет поиска оптимальной конструкции заградительного фильтра на входе рабочей области генераторы СВЧ-излучения.

2. Результаты расчетов оптимальных конструкций релятивистских генераторов на прямолинейных электронных потоках

Теория, описывающая процессы взаимодействия электронных потоков с электромагнитными волнами в нерегулярных цилиндрических волноводах, приведена в [6; 7]. В основу методики расчета процессов в нерегулярном волноводе положены идеи А. Г. Свешникова [8], основанные на методе преобразования координат, который позволяет искать решение задачи возбуждения нерегулярного волновода путем разложения этого решения по системе базисных функций регулярного волновода. Это позволяет свести 3-мерную задачу к одномерной, что существенно сокращает объем вычислений и повышает точность решения. Расчеты проводились с использованием программы Gyro-K [9] и программы оптимизации Opti-K. В этих программах все используемые величины задаются в нормированном виде. Например, все длины задаются в радианах

$$l = \frac{2\pi L}{\lambda}.$$

Мощный электронный поток можно создать с помощью импульсных сильноточных электронных пушек с холодными кольцевыми катодами в режиме взрывной эмиссии, формирующих высокопервеанские релятивистские электронные пучки [10–12].

В работах [4; 5] были приведены результаты расчетов клистронных генераторов, но с единичными заграждающими фильтрами. Но такие варианты приборов не позволяют полностью отразить электромагнитную волну, идущую на катод, и на выходном фильтре должна создаваться очень высокая напряженность поля, что может вызвать эмиссию электронов со стенки волновода.

На рис. 1 показаны интегральные функции, описывающие процессы в таком приборе.

Как показано на рис. 1, основная отдача мощности электронным потоком происходит в районе последней канавки, что возможно только в очень сильной напряженности ВЧ электрического поля, и видно по кривой 6, что часть ВЧ-мощности идет обратно на катод. Функции продольной группировки по первой и второй гармониках рабочей частоты:

$$F_1(z) = 1 - \left[\left(\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \sin t_i \right)^2 + \left(\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \cos t_i \right)^2 \right],$$

$$F_2(z) = 1 - \left[\left(\frac{2}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \cos t_i \sin t_i \right)^2 + \left(\frac{2}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \cos^2 t_i - 1 \right)^2 \right],$$

где t_i – нормированное время (в радианах) прохождения сечения z i -м электроном.

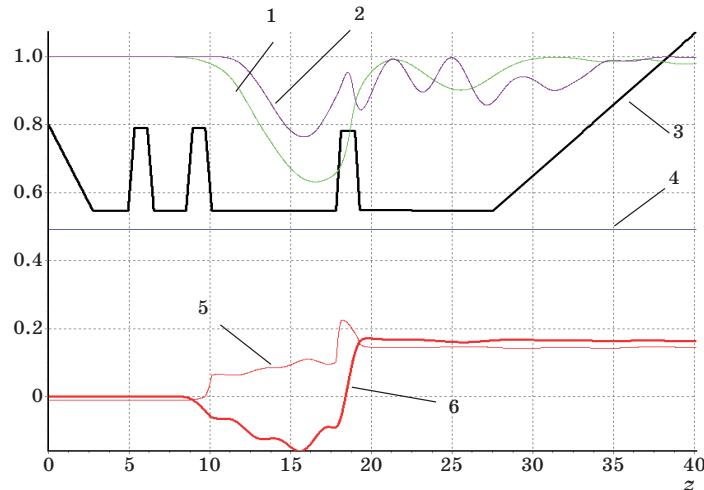


Рис. 1. Интегральные характеристики клистрон генератора с единичными фильтрующими канавками:

1 – функция продольной группировки по первой гармонике; 2 – функция группировки по второй гармонике; 3 – профиль волновода в длинах волны; 4 – радиус электронного потока; 5 – волновой КПД; 6 – электронный КПД

Fig. 1. Integral characteristics of a klystron generator with single filtering grooves:

1 – the function of longitudinal grouping by the first harmonic,
 2 – the function of grouping by the second harmonic, 3 – the waveguide profile at wavelengths, 4 – the radius of the electron beam, 5 – the wave efficiency,
 6 – the electronic efficiency

Электронный КПД

$$\eta_e = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \frac{1 - R_0/R_i}{1 - R_0},$$

где $R_i = \sqrt{1 - (\beta_{xi}^2 + \beta_{yi}^2 + \beta_{zi}^2)}$ и β_i – нормированные к скорости света скорости электронов по осям координат.

Волновые КПД

$$\eta_{np}^e = \frac{\pi R_0 e_{np}}{(1 - R_0) \sigma} \operatorname{Im} \{ A_{np}^e V_{np}^* \},$$

где

$$e_{np} = \frac{1}{2} \cdot J_{n-1}^2(v_{np}),$$

n – азимутальный индекс типа волны, p – радиальный индекс типа волны, v_{np} – корни функции Бесселя ($J_n(v_{ni}) = 0$), нормированный токовый параметр

$$\sigma = \frac{\eta_0 \mu_0}{c} I_0 = 0.73723 \cdot 10^{-3} I_0 [A],$$

нормированная напряженность электрической составляющей ВЧ-поля

$$\dot{A}_{mnp}^e = \frac{\dot{E}_{\perp mnp}^e \eta_0}{c^2}, \quad \dot{V}_{np} = -\frac{d\dot{A}_{np}^e}{dz} + v_{np} \dot{C}_{np}, \quad \dot{C}_{mnp} = \frac{\dot{E}_{znp}^e \eta_0}{\omega_0 c} -$$

нормированная напряженность электрической продольной составляющей ВЧ поля.

На следующем рисунке показано распределение электрической напряженности поля вдоль продольного сечения волновода (рис. 2).

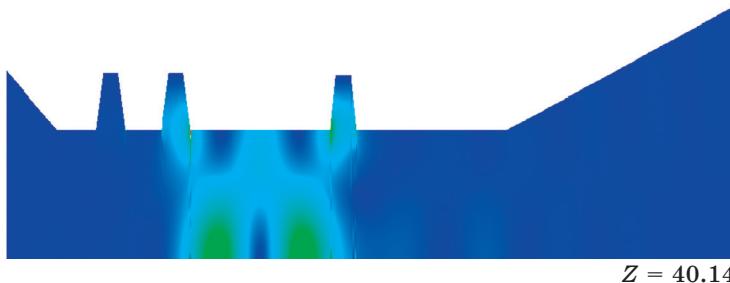


Рис. 2. Поперечное сечение распределения модуля электрической напряженности ВЧ-поля в генераторе

Fig. 2. Cross-section of the distribution of the module of the electric strength of the RF field in the generator

Предлагаемая структура электродинамической системы представляет собой отрезок круглого волновода с гребенчатыми фильтрами на концах волновода. Основным рабочим типом волны была выбрана мода E_{01} .

На первом шаге оптимизации был проведен поиск структуры электродинамического фильтра в начале волновода, который бы не допускал прохождение встречной волны в сторону катода. Была найдена такая структура четырехзвенного фильтра, которая пропускала не более 1 % мощности встречной волны, в то время как в вариантах из работ [4; 5] проходит в сторону катода более 4 % мощности встречной волны. В конце волновода тоже расположен уже трехзвенный фильтр. В итоге создается резонатор с холодной нагруженной добротностью $Q = 1/\Delta f \sim 500$ (Δf определяется по уровню 0,5 от квадрата напряженности поля на частотной характеристике резонатора), как это следует из частотной характеристики резонатора (рис. 3).

Оптимизация такого генератора привела к следующему результату. Ток электронного потока составил 1150А, ускоряющее напряжение – 79 Кв. Нормированная длина рабочей области генератора составила 13,5 рад., нормированный радиус цилиндрического электронного потока – 2,814 рад. КПД такого

го генератора достиг 23 %. В то время как рассчитанный в [3] клистрон с двумя резонансными канавками может обеспечить КПД не более 18 %. На рис. 4 приведены интегральные характеристики рассчитанного нами релятивистского клистрона, а на рис. 5 – поперечное сечение распределения модуля электрической напряженности ВЧ поля в генераторе.

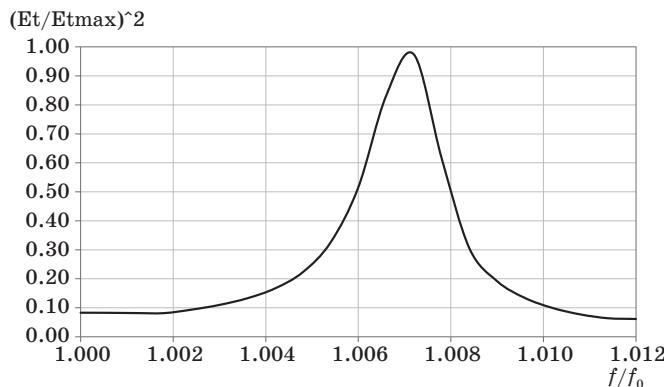


Рис. 3. Частотная характеристика резонатора

Fig. 3. Frequency response of the resonator

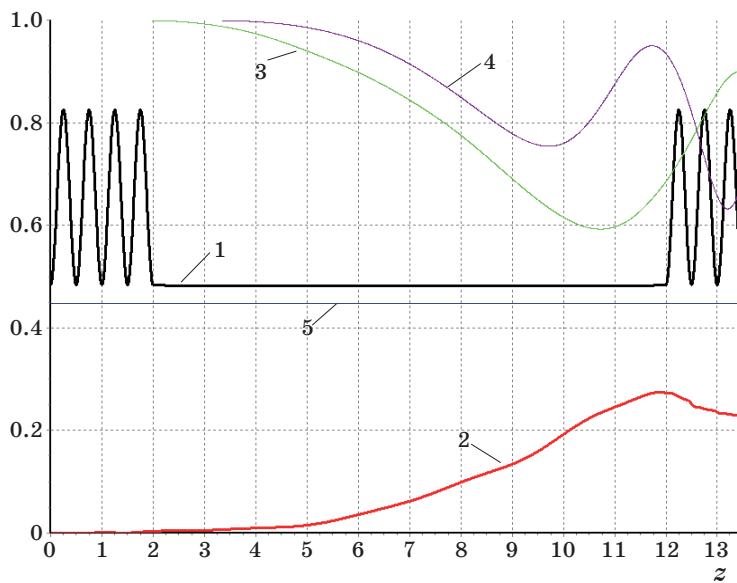


Рис. 4. Интегральные характеристики клистрона:

1 – профиль волновода; 2 – КПД; 3 – функция продольной группировки электронов по первой гармонике рабочей частоты; 4 – по второй гармонике; 5 – радиус электронного потока

Fig. 4. Integral characteristics of the klystron:

1 – waveguide profile, 2 – efficiency, 3 – function of the longitudinal bunching of electrons by the first harmonic of the operating frequency, 4 – by the second harmonic, 5 – radius of the electron beam



Рис. 5. Поперечное сечение распределения модуля электрической напряженности ВЧ- поля в генераторе

Fig. 5. Cross section of the distribution of the module of the electric field of the RF field

В расчетах учитывалось 8 типов волн от E_{01} до E_{08} , число шагов интегрирования составляло 4 000, число электронных траекторий – 64, что позволило с достаточной точностью симулировать процессы в генераторе с нерегулярной электродинамической системой.

3. Заключение

Мощность электронного потока на входе резонатора составляет 90,85 Мвт. При КПД прибора 23 %, выходная мощность ВЧ-волны E_{01} будет равна 21 Мвт. Как следует из рис. 4, электронный поток взаимодействует с ВЧ полем резонатора почти на всей его длине, что видно по характеру нарастания КПД в резонаторе. В вариантах клистрон-генераторов из [4], процесс отбора энергии от электронного потока происходит только при прохождении последней канавки резонатора, что из-за высокого значения напряженности ВЧ-поля может приводить к его пробою. Оптимизированный вариант генератора, описанный в данной работе, свободен от указанных выше недостатков.

Список литературы

1. Gaponov-Grekhov A. V., Granatstein V. L. *Applications of High-Power Microwaves*. Boston: Artech House; 1994.
2. Батура М. П., Кураев А. А. *Основы теории, расчета и оптимизации современных электронных приборов СВЧ*. Минск: БГУИР; 2007.
3. Корниленко В. Н., Черепенин В. А. Особенности формирования пространственно-временной структуры излучения многоволнового Черенковского генератора. *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. 2012;20(6):118–123. DOI: 10.18500/0869-6632-2012-20-6-118-123
4. Гуринович А. Б., Кураев А. А., Синицын А. К. Релятивистский клистрон-генератор с пространственно-развитым сильноточным пучком. *Доклады БГУИР*. 2009;(1):28–33.

5. Кураев А. А., Рак А. О., Гуринович А. Б. Чerenковские усилители и генераторы на нерегулярных волноводах. Lambert; 2017.
6. Колосов С. В. *Оптимизация электронных приборов СВЧ с нерегулярными волноводами*. Lambert; 2018.
7. Kolosov S. V. *Optimization of microwave electronic devices with irregular waveguides*. Lambert; 2019.
8. Свешников А. Г. К обоснованию метода расчета распространения электромагнитных колебаний в нерегулярных волноводах. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 1963;3(2):314–326.
9. Колосов С. В., Зайцева И. Е. Компьютерная программа GYRO-K для разработки и проектирования гирорезонансных приборов СВЧ. *СВЧ электроника*. 2017;(2):46–48.
10. Бугаев С. П., Литвинов А. Е., Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Взрывная эмиссия электронов. *Успехи физических наук*. 1975;115:101–120. DOI: 10.3367/UFNr.0115.197501d.0101
11. Месяц Г. А. Первичные и вторичные процессы взрывной электронной эмиссии. *Журнал прикладной механики и технической физики*. 1980;(5):138–144.
12. Месяц Г. А. (ред.) *Эмиссионная сильноточная электроника*. Новосибирск: Наука; 1984.

References

1. Gaponov-Grekhov A. V., Granatstein V. L. *Applications of High-Power Microwaves*. Boston: Artech House; 1994.
2. Batura M. P., Kuraev A. A., *Fundamentals of the theory, calculation and optimization of modern electronic microwave devices*. Minsk: Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics; 2007. (In Russ.)
3. Kornienko V. N., Cherepenin V. A. Features of time-spatial structure formation of the multiwave Cherenkov Oscillator radiation. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2012;20(6):118–123. (In Russ.) DOI: 10.18500/0869-6632-2012-20-6-118-123
4. Gurinovich A. B., Kuraev A. A., Sinitsyn A. K. Relativistic klystron generator with a spatially developed high-current beam. *Reports BSUIR*. 2009;1(39):28–33. (In Russ.)
5. Kuraev A. A., Rak A. O., Sinitsyn A. K. *Cherenkov amplifiers and generators on irregular waveguides*. Lambert; 2017.
6. Kolosov S. V. *Optimization of microwave electronic devices with irregular waveguides*. Lambert; 2018.
7. Kolosov S. V. *Optimization of microwave electronic devices with irregular waveguides*. Lambert; 2019.
8. Sveshnikov A. G. On the justification of the method for calculating the propagation of electromagnetic waves in irregular waveguides. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1963;3(2):314–326 (In Russ.)

9. Kolosov S. V., Zaitseva I. E. GYRO-K computer program for the development and design of gyroresonance devices microwave. *Microwave electronics*. 2017;(2):46–48. (In Russ.)
10. Bugaev S. P., Litvinov E. A., Mesyats G. A., Proskurovskii D. I. Explosive emission of electrons. *Sov. Phys. Usp.* 1975;115:101–120. (In Russ.) DOI: 10.3367/UFNr.0115.197501d.0101
11. Mesyats G. A. Primary and secondary processes of explosive electron emission. *J. Prikl. fur. and tech. Fiz.* 1980;(5):138–144. (In Russ.)
12. Mesyats G. A. (ed.) *Emission high-current electronics*. Novosibirsk: Nauka; 1984. (In Russ.)

Информация об авторах

Колосов Станислав Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

Батура Михаил Павлович, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

Шатилова Ольга Олеговна, старший преподаватель кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

Information about the authors

Stanislav V. Kolosov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Computational Methods and Programming, Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics, 6 P. Brovka st., Minsk, 220013, Belarus.

Mikhail P. Batura, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics, 6 P. Brovka st., Minsk, 220013, Belarus.

Olga O. Shatilova, Assistant, Department of Computational Methods and Programming, Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics, 6 P. Brovka st., Minsk, 220013, Belarus.

Поступила / Received: 24.11.2019

Принята в печать / Accepted: 06.12.2019

Регрессионные методы детализации изображений объектов дистанционного зондирования

Б. А. Лаговский

МИРЭА – Российский технологический университет,
Россия, 119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78

✉ robertlag@yandex.ru

Аннотация

Представлен и обоснован новый метод обработки радиолокационных сигналов, позволяющий превысить критерий Рэлея. Получение углового сверхразрешения основано на использовании нелинейной регрессии. Результаты численных экспериментов на математических моделях показали, что алгоритмы на основе развивающегося метода позволяют адекватно восстанавливать радиоизображения объектов дистанционного зондирования. Метод позволяет получать решения рассматриваемых обратных задач при существенно меньших значениях отношения сигнал/шум, чем известные методы достижения сверхразрешения.

Ключевые слова

сверхразрешение, критерий Рэлея, устойчивость решений, регуляризация обратных задач

Для цитирования

Лаговский Б. А. Регрессионные методы детализации изображений объектов дистанционного зондирования. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):378–384. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.004

Regression methods of detail images in remote sensing

Б. А. Lagovsky

Russian Technological University MIREA,
78, Vernadskogo Ave., Moscow, 119454, Russia

✉ robertlag@yandex.ru

Abstract

This paper presents a new method for processing radar signals. The method is theoretically justified and allows exceeding the Rayleigh criterion. We use nonlinear regression to obtain angular superresolution. The results of numerical experiments with mathematical models demonstrate that the algorithms based on the developed method allow us to restore the radio images of remote sensing objects adequately. The method allows obtaining solutions of the considered inverse problems with significantly lower signal-to-noise ratios than the known methods for achieving

superresolution. The obtained analytical results and the results of numerical experiments show that the use of nonlinear regression methods makes it possible to exceed the Rayleigh criterion by 2 to 4 or more times with significantly lower signal-to-noise ratios than many major methods.

Keywords

superresolution, Rayleigh criterion, stability of solutions, regularization of inverse problems

For citation

Lagovsky B. A. Regression methods of detail images in remote sensing. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):378–384. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.004

Введение

Увеличение эффективной угловой разрешающей способности до значений, превышающих критерий Рэлея, т. е. до сверхразрешения, позволяет раздельно наблюдать отдельные близко расположенные объекты, а также детализировать изображения исследуемых объектов.

Задача получения сверхразрешения относится к классу обратных неустойчивых задач. Предложен ряд методов достижения сверхразрешения [1–4]. Решения, однако, оказываются в достаточной степени устойчивыми и адекватными при отношении сигнал/шум не ниже 20–25 дБ. Еще одним недостатком является то, что методы получения сверхразрешения, в частности, такие как популярные в настоящее время MUSIC и ESPRIT, используют узкополосные сигналы и неэффективны для широкополосных и особенно сверхширокополосных радиолокаторов [5]. Быстродействие многих из упомянутых выше методов недостаточно для работы в режиме реального времени.

1. Постановка задачи и метод решения

Задача состоит в восстановлении углового распределение амплитуды сигнала, отраженного объектами исследования – $I(\phi, \theta)$ со сверхразрешением на основе анализа принятого сигнала $U(\phi, \theta)$ и известной ДН антенной системы $f(\phi, \theta)$ в условиях воздействия шумов и помех.

Поиск углового распределения $I(\phi, \theta)$ сводится к приближенному решению линейного интегрального уравнения Фредгольма первого рода типа свертки:

$$U(\phi, \theta) = \int_{\Omega} f(\phi - \alpha, \theta - \gamma) I(\alpha, \gamma) d\alpha d\gamma, \quad (1)$$

где Ω – угловая область расположения источников излучения.

Известно, что устойчивость решений обратных задач повышается при использовании какой-либо априори известной информа-

мации о решении [6; 7]. Дополнительная информация иногда позволяет провести регуляризацию задачи [5; 7–10]. Рассмотрим одну из задач такого типа.

Пусть, например, заранее известно, что источник сигнала при сканировании по одному из углов может быть с хорошей точностью представлен в виде N малоразмерных (близких к точечным) объектов. Требуется найти угловые положения этих объектов $\alpha_1 \dots \alpha_N$ и амплитуды отражаемых ими сигналов $I_1 \dots I_N$.

На основании приведенной априорной информации исследуемый объект можно с хорошей точностью описать в виде суперпозиции дельта-функций:

$$I(\alpha) = \sum_{n=1}^N I_n \delta(\alpha - \alpha_n). \quad (2)$$

Тогда принятый сигнал представляет собой сумму вида:

$$U_R(\alpha) = \sum_{n=1}^N I_n f(\alpha - \alpha_n). \quad (3)$$

Таким образом, задача восстановления изображения цели оказывается параметризованной, и сводится к задаче поиска $2N$ неизвестных.

Поиск неизвестных параметров может быть осуществлен как поиск минимума функции $2N$ переменных в виде среднеквадратической ошибки:

$$\delta^2 = \int_{\Theta} (U(\alpha) - U_R(\alpha, \alpha_1 \dots \alpha_N, I_1 \dots I_N))^2 d\alpha. \quad (4)$$

Численный поиск минимума (4) сводится к решению многоэкстремальной задачи и не гарантирует получение глобального минимума. Еще одна особенность задачи состоит в том, что в области глобального минимума ошибка в виде (4) при варьировании углов $\alpha_1 \dots \alpha_2$ изменяется очень плавно, что приводит к значительным ошибкам в определении положения отдельных объектов.

Существенно более эффективным оказывается алгоритм, основанный на методах регрессии, в рассматриваемой задаче нелинейной регрессии.

Введем функцию регрессии в виде (2). Дополним задачу условием, повышающим устойчивость численного решения, в виде равенства принимаемой энергии реального и синтезируемого в виде (3) сигналов:

$$\int_{\Theta} U(\alpha)^2 d\alpha = \int_{\Theta} U_R(\alpha, \alpha_1 \dots \alpha_N, I_1 \dots I_N)^2 d\alpha. \quad (5)$$

Дополнительное условие (5) не вносит каких-либо изменений в задачу, оно автоматически следует из ее постановки.

Численное решение рассматриваемой регрессионной задачи поиска неизвестных параметров функции (2), обеспечивающих выполнение (3, 4), успешно находится с помощью оптимизированного метода Левенберга – Марквардта [10].

2. Численные результаты

На математической модели плоской эквидистантной антенной решетки исследовались решения поставленной обратной задачи для различных объектов в различных условиях.

Вводился сложный объект в виде нескольких точечных источников сигнала с различными амплитудами отражаемых сигналов. Угловые расстояния между соседними источниками выбирались меньше ширины диаграммы направленности $\theta_{0,5}$.

Таким образом, без специальной обработки принятого сигнала отдельные источники не разрешались.

К полученным на модели значениям принимаемого при сканировании сигнала (2) добавлялась случайная составляющая в виде белого шума.

Далее, на основе использования изложенных методов регрессионного анализа решались обратные задачи восстановления изображения сложного объекта (2–5).

Характеристики повышения углового разрешения и его пределы исследовались в ходе численных экспериментов.

На рис. 1 показаны результаты восстановления изображения сложного объекта, состоящего из трех одинаковых малоразмерных объектов. Угловое расстояние между объектами составляло $0,25\theta_{0,5}$. Задача решалась при отношении сигнал/шум 25 дБ.

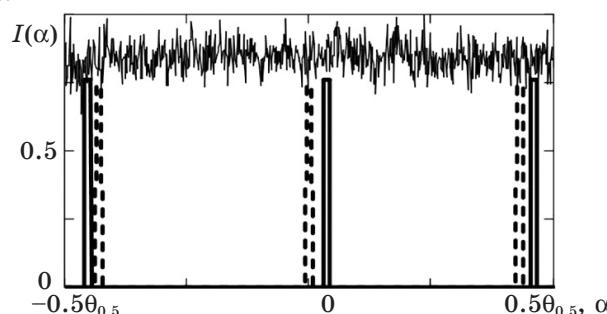


Рис. 1. Восстановленное изображение трехточечного объекта

Fig. 1. Restored image of the three-point object

В виде сплошной жирной линии на рисунке показано восстановленное изображение объекта, в виде штриховой линии приведен истинный вид объекта. Для иллюстрации задачи показан исследуемый сигнал в виде суммы полезного сигнала и шума – верхняя кривая.

В итоге все три малоразмерных объекта оказались разрешены, критерий Рэлея превышен в 2 раза, найденное положение объектов очень близко к их истинному расположению.

На рис. 2 показаны результаты восстановления изображения объекта, состоящего из двух малоразмерных источников сигналов с различными амплитудами отражаемых сигналов. Угловое расстояние между объектами составляло $0,25\theta_{0.5}$. Значения амплитуд отражаемых сигналов отличались в пять раз.

Задача решалась при отношении сигнал/шум 20 дБ.

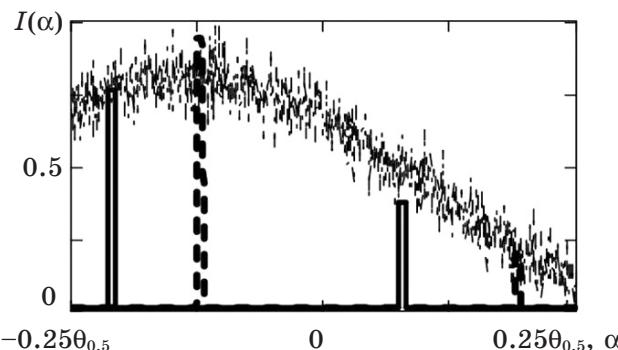


Рис. 2. Изображения малоразмерных источников сигналов с различными амплитудами

Fig. 2. Images of small-size signal sources with different amplitudes

В виде сплошной жирной линии показано восстановленное изображение объекта, в виде штриховой линии – истинное изображение. Верхняя кривая – исследуемый сигнал.

Два малоразмерных объекта оказались разрешены, найденное положение объектов найдено с некоторой ошибкой.

Ошибка при фиксированном расстоянии между точечными источниками возникает и увеличивается вместе с увеличением уровня шумов и разницей в амплитудах отражаемых сигналов.

На рис. 3 представлены результаты восстановления изображения объекта при очень высоком уровне случайных составляющих сигнала. Отношение сигнал/шум составляло 8 дБ. Объект представлял собой два малоразмерных источника сигналов с равными амплитудами. Угловое расстояние между объектами составляло $0,5\theta_{0.5}$.

В виде сплошной жирной линии показано восстановленное изображение объекта, в виде штриховой линии – истинное изображение. Приведен исследуемый принятый сигнал $U(\alpha)$, обработка которого позволила восстановить изображение сложной радиолокационной цели – верхняя кривая.

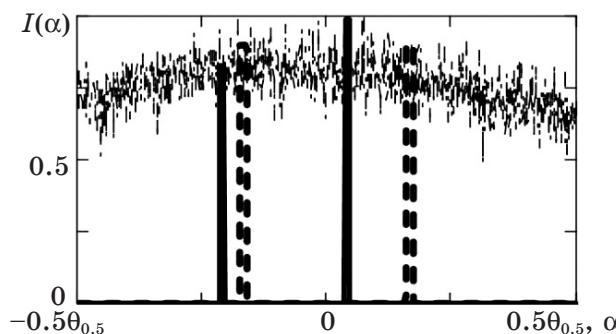


Рис. 3. Восстановленное изображение при высоком уровне шума

Fig. 3. Restored image at high noise level

Найденные угловые положения источников и амплитуды сигналов, отражаемых каждым источником, оказались близки к истинным, несмотря на очень высокий уровень шума. Качество восстановления изображений объектов следует признать вполне приемлемым.

Заключение

Предложен новый метод достижения углового сверхразрешения, основанный на методах нелинейной регрессии. Полученные аналитические результаты и результаты численных экспериментов показывают, что использование методов нелинейной регрессии позволяет превысить критерий Рэлея в 2–4 и более раз при существенно меньших отношениях сигнал/шум, чем многие известные методы. С хорошей точностью определяются угловые координаты отдельных целей и амплитуды отражаемых каждым объектом сигналов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 17-07-00185.

Acknowledgment

This research is supported by grant No. 17-07-00185 from the Russian Foundation for basic research.

Список литературы / References

1. Park S. C., Park M. K., Kang M. G. Super-resolution image reconstruction: a technical overview. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2003;20(3):21–36. DOI: 10.1109/MSP.2003.1203207
2. Zhang Y., Jakobsson A., Yang J. Range-Recursive IAA for Scanning Radar Angular Super-Resolution. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2017;14(10):1675–1679. DOI: 10.1109/LGRS.2017.2728038

3. Lagovsky B. Superresolution by Extrapolation for Solving Remote Sensing Problems. In: *Proceedings of the 25th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2015), Sevastopol, September 6–12, 2015*. Sevastopol; 2015. Vol. 1, pp. 1144–1146.
4. Lagovsky B., Samokhin A. Shestopalov Y. Superresolution Based on the Methods of Extrapolation. In: *36th Progress In Electromagnetics Research Symposium – PIERS 2015, Prague, Czech Republic, January, 2015*. 2015, pp. 1548–1551.
5. Lagovsky B. A., Samokhin A. B., Shestopalov Y. V. Increasing accuracy of angular measurements using UWB signals. In: *11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). IEEE Conference Publications*. Paris; 2017, pp. 1083–1086.
6. Lagovsky B. A., Chikina A. G. Superresolution in signal processing using a priori information. In: *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS), St. Petersburg, May 22–25, 2017*, pp. 944–947. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8261879
7. Lagovsky B. A., Samokhin A. B. Superresolution in signal processing using a priori information. In: *2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). Verona, Italy, September 11–15, 2017*, pp. 779–783. DOI: 10.1109/ICEAA.2017.8065365
8. Lagovsky B., Samokhin A., Shestopalov Y. Increasing Effective Angular Resolution Measuring Systems Based on Antenna Arrays. In: *2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS). Espoo, Finland, August 14–18, 2016*, pp. 432–434. DOI: 10.1109/ursi-emts.2016.7571418
9. Lagovsky B. A., Samokhin A. B., Shestopalov Y. V. Creating Two-Dimensional Images of Objects with High Angular Resolution. In: *2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Auckland, New Zealand, August 5–8, 2018*, pp. 114–115. DOI: 10.1109/APCAP.2018.8538220
10. Lagovsky B. A., Samokhin A. B., Shestopalov Y. V. Regression Methods of Obtaining Angular Superresolution. In: *2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC), New Delhi, India, March 9–15, 2019*. DOI: 10.23919/URSIAP-RASC.2019.8738539

Информация об авторе

Лаговский Борис Андреевич, доктор технических наук, профессор, МИРЭА – Российский технологический университет – РТУ МИРЭА, Россия, 119454, Москва, пр-т Вернадского, 78.

Information about the author

Boris A. Lagovsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, MIREA – Russian Technological University – RTU MIREA, 78, Vernadskogo Ave., Moscow, 119454, Russia.

Поступила / Received: 21.10.2019

Принята в печать / Accepted: 15.11.2019

Повышение селективности СВЧ-тракта с помощью электронно-управляемого МПЛ-фильтра

Г. Е. Говоров

Южный федеральный университет,
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 5

✉ gorjet86@gmail.com

Аннотация

Разработан и экспериментально исследован электрически перестраиваемый полосно-пропускающий СВЧ-фильтр (ППФ). Устройство состоит из двух короткозамкнутых резонаторов с кондуктивным подключением портов. Перестройка полосы пропускания реализована с помощью варакторных диодов, включенных в разомкнутый конец резонаторов и управляемых напряжением в диапазоне 1,5–12 В. По результатам макетирования получен фильтр с перестройкой полосы пропускания 15 %, максимальными вносимыми потерями 2,6 дБ и значением КСВН в рабочей полосе частот не хуже 2. За счет использования четвертьволновых резонаторов и дополнительных сосредоточенных емкостей, получены габариты изделия в пределах 12×15 мм.

Ключевые слова

полосно-пропускающий фильтр, перестраиваемый фильтр, варикап, ФНЧ-прототип

Для цитирования

Говоров Г. Е. Повышение селективности СВЧ-тракта с помощью электронно-управляемого МПЛ-фильтра. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):385–398. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.004

Microwave channel selectivity enhancement technique based on usage of the electrically controlled microstrip filter

Г. Е. Govorov

South Federal University, 5 Zorge Str, Rostov on Don, 34090, Russia

✉ gorjet86@gmail.com

Abstract

This paper presents the computer aided design and experimental investigation of electrically tuned bandpass microwave filter. The bandpass filter design is based on two regular shunt resonators with the conductive input/output port switching. The bandpass control is implemented by means of varactors which are loaded at the open end of the resonators and operate within the voltage range 1.5–12V. The following exper-

imental characteristics of the filter are obtained: the bandpass tuning range is 15 %, the maximal insertion loss is 2.6 dB and the VSWR within operational frequency band is 2. The outer dimensions of the filter are 12x15 mm. We achieve compact dimensions due to the use of quarter-wave resonators and extra lumped capacitor.

Keywords

bandpass filter, tunable filter, varactor, low-pass filter prototype

For citation

Govorov G. E. Microwave channel selectivity enhancement technique based on usage of the electrically controlled microstrip filter. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):385–398. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.004

Введение

Управляемые устройства (УУ) являются неотъемлемой частью многих радиотехнических систем. Разработка таких элементов приобрела особую актуальность в связи с современными тенденциями построения приемо-передающих трактов коммуникационных многоканальных систем. Управление селективностью радиочастотного тракта в каждом канале позволяет внедрить более совершенные методы обработки сигналов и за счет этого существенно повысить чувствительность приемников и уменьшить мощность передатчиков.

Устройства на основе микрополосковых линий нашли широкое применение в электронике. Одним из актуальных направлений в этой области является разработка перестраиваемых резонаторов на их основе. Эти элементы являются важнейшей частью перестраиваемых фильтров и фазовращателей [1, с. 157–164; 2, с. 59–70].

Постановка задачи

Требуется разработать перестраиваемый СВЧ-фильтр, повышающий селективность СВЧ-тракта. Необходимые параметры изучаемого устройства и задачи приведены ниже:

1. Технология исполнения – на основе микрополосковых линий.
2. Способ перестройки – посредством управляемых напряжениями варикапов.
3. Ширина полосы перестройки частоты от $f_{\text{н}}$ до $f_{\text{в}}$ по уровню -1 dB – не менее 15 %.
4. Вносимые потери в полосе пропускания – не более 3 dB с неравномерностью не более 1 dB, КСВН не хуже 2.
5. Внеполосное подавление при отстройке на $0.9f_{\text{н}}$ и $1.1f_{\text{в}}$ относительно уровня в полосе пропускания – не хуже -20 dB.
6. Полоса пропускания не менее 5 %.

7. Проанализировать поведение устройства в диапазоне температур (0 \div +50) $^{\circ}$ С

Наиболее актуальные и технологичные способы перестройки микрополосковых резонаторов

При рассмотрении основных способов реализации перестройки ВЧ-устройств можно провести их сравнение с выбранным в данной работе способом управления на основе варикторных диодов.

Одним из динамично развивающихся в настоящее время направлений в создании управляемых устройств СВЧ является технология микроэлектромеханических структур (МЭМС). Достижениями механических УУ являются высокая повторяемость и малый уровень амплитудных и фазовых шумов. МЭМС-технология дает возможность производить механические, электромеханические и электрохимические приборы с уровнем интеграции и миниатюризации близким к современным полупроводниковым элементам. Но управляемым устройствам на основе МЭМС-технологии присущи и недостатки: низкая стойкость к механическим воздействиям, ограниченное количество переключений, возможный «дребезг» контактов, сравнительно низкое быстродействие, а также существование механических резонансов мембран на частотах порядка 20–100 кГц.

Наиболее распространенным способом реализации магнитоуправляемых устройств, в том числе и фильтров, является использование пленок, подложек и сфер на основе железо-итриевого граната (ЖИГ). Перестройка таких устройств происходит за счет изменения значения эффективной магнитной проницаемости материала под воздействием внешнего магнитного поля. Основными преимуществами таких фильтров являются широкая полоса перестройки, достигающая нескольких октав и относительно низкие вносимые потери. При этом недостатки, такие как сложные цепи питания, низкая скорость перестройки (порядка нескольких микросекунд) и большие габариты, существенно ограничивают применимость таких фильтров в современных системах связи.

Новые фундаментальные исследования в области физики и технологии тонких сегнето-электрических пленок позволили к настоящему времени разработать различные устройства на их основе: фазовращатели, управляемые линии задержки, перестраиваемые полосовые фильтры и др. Сейчас в СВЧ-диапазоне наиболее широко применяются пленки на основе твердых растворов $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BSTO) и $SrTiO_3$ (STO), относительная диэлектрическая проницаемость которых по отношению к СВЧ-полю может изменяться в 10 раз при подаче внешнего электри-

ческого поля напряженностью 200–300 кВ/см. Относительная диэлектрическая проницаемость BSTO материала составляет порядка 1000, и по этой причине сегнетоэлектрики в миллиметровом диапазоне могут быть использованы только в виде пленок, нанесенных на кристаллическую диэлектрическую подложку из сапфира или кварца.

Управляемые устройства на основе полупроводниковых элементов являются наиболее массовыми и часто применяемыми в современных радиотехнических системах. В последнее десятилетие ведутся интенсивные исследования по их развитию и усовершенствованию, что связано с внедрением массовых средств связи и навигации гражданского применения. Основой таких устройств в большинстве случаев служат полупроводниковые компоненты – диоды и транзисторы, изготавливаемые на основе традиционных полупроводниковых материалов Si, GaAs, InP. Благодаря своей относительной простоте и большому числу положительных свойств полупроводниковые *p-i-n*-структуры и варикторы нашли широчайшее применение в конструкциях многих разновидностей электрически управляемых устройств. Наиболее уверенно они заняли свою нишу в ВЧ- и СВЧ-диапазонах для управления уровнем и/или фазой сигналов, для защиты радиотехнической аппаратуры от случайных импульсов, для стабилизации мощности, а также в аттенюаторах.

Таблица 1. Сравнение основных технологий
перестраиваемых СВЧ устройств

Table 1. Comparison of Typical Tunable RF devices

Технология перестройки	МЭМС	ЖИГ	BSTO	PIN диод	Варикторный диод
Ненагруженная добротность	50–400	> 500	30–50*	$R_s = (1-4)$ Ом**	30–50*
Скорость перестройки	> 10 мкс	> 10 мкс	> 30 нс	1–5 нс	1–5 нс
Питание	20–100 В	< 150 мА	< 30 В	10–40 мА	< 30 В
Допустимый уровень мощ- ности	1–2 Вт	2 Вт	1–10 мВт	1–10 мВт	1–10 мВт
Энергопотре- бление	незначи- тельное	высокое	незначи- тельное	среднее	низкое
Габариты	небольшие	большие	небольшие	неболь- шие	неболь- шие
Стоимость	средняя	высокая	низкая	низкая	низкая
Возможность интеграции	есть	затруднен- но	есть	есть	есть

Примечание: * на частоте 10 ГГц; ** в случае *pin* диода, его принято характеризовать не параметром добротности, а последовательным сопротивлением R_s .

Источник/Source: JIA NI. Development of Tunable and Miniature Microwave Filters for Modern Wireless Communications.

В табл. 1 представлено сравнение основных современных технологий организации перестраиваемых устройств, описанных выше [3–7]. Согласно данным табл. 1, вариант перестройки на варикапах наиболее эффективен с точки зрения получаемых характеристик и простоты технологии.

Моделирование перестраиваемого фильтра

На основании вышеизложенного выбран способ построения перестраиваемого фильтра на основе микрополосковых линий с управлением варикапами. В такой схеме варикап выступает в роли переменной емкости, значение которой зависит от поданного на него обратного напряжения смещения. P - n -переход представляет собой аналогию с классическим конденсатором, где параллельные проводящие пластины это области p и n , а диэлектрик между ними – обедненная зона. При этом с ростом обратного напряжения увеличивается обедненная зона и уменьшается емкость конденсатора. В области напряжений около 0 В емкость варикапа максимальна, но добротность при этом очень низкая. Поэтому применение режима смещения от 0 до 1,5–2 В не целесообразно. На рис. 1 представлены типовые значения вольт-фарадных характеристик некоторых из современных варикапов.

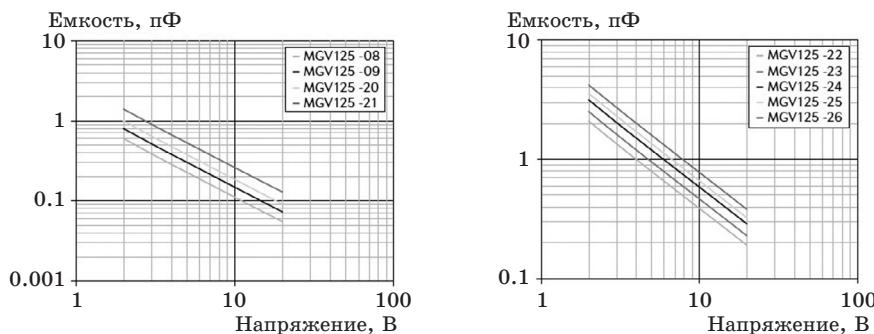


Рис. 1. Типовые вольт-фарадные характеристики варикапов от фирмы AeroflexMetelics

Fig. 1. Typical capacity-voltage characteristics of AeroflexMetelics varicaps

При расчете схемы с участием варикапов следует использовать уточненные SPICE-модели. Такая модель представляет собой схему, учитывающую паразитные параметры корпуса варикапа и его внутренние характеристики, предоставляемые производителем [8, pp. 5–11, 38–43]. SPICE-модель используемого в данной работе варикапа MGV125-08 от фирмы AeroflexMetelics представлена на рис. 2.

Выбор данной модели варикапа связан с тем, что она обладает наибольшей добротностью среди подобных образцов, минимальными паразитными параметрами корпуса и достаточным значением коэффициента перекрытия по емкости для реализации требуемой ширины полосы перестройки в 15 %.

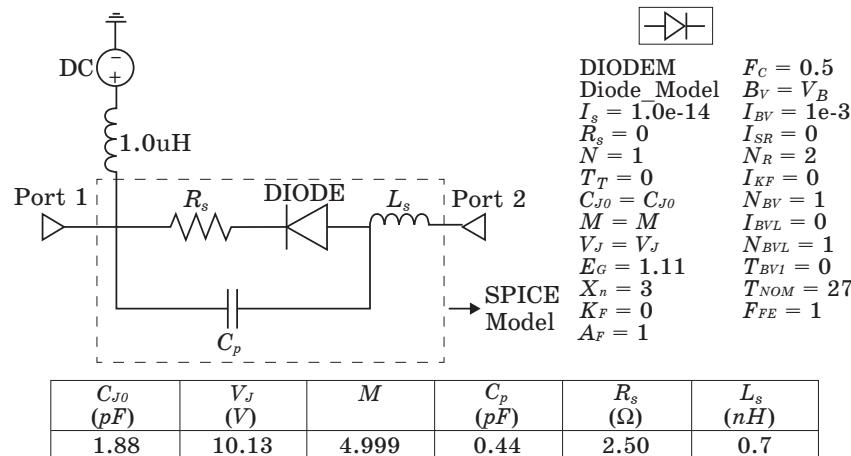


Рис. 2. SPICE модель варикапа MGV125-08 с паразитными параметрами корпуса

Fig. 2. MGV125-08 SPICE model with package stray parameters

В качестве топологии фильтра выбрано микрополосковое исполнение в виде двух связанных четвертьволновых короткозамкнутых резонаторов постоянной ширины. Для расчета основных параметров фильтра следует рассмотреть схему ФНЧ-прототипа на основе сосредоточенных элементов [9], которая представляет собой последовательно соединенные LC-контуры. Из значений табличных элементов g_i для прототипа ФНЧ с эквивалентной неравномерностью, можно для $N = 3$ (число реактивных элементов прототипа) определить значения реактивных элементов L и C [9]:

$$g_1 = g_3 = C_k = 1.5963; \quad g_2 = L_k = 1.0967.$$

Для этого необходимо перевести полученные табличные значения g_i , справедливые для нормализованного случая ФНЧ с входным импедансом $R_s = 1\Omega$ и частотой отсечки $\omega_c = 1 \text{ rad/sec}$ в характеристики искомого фильтра:

$$L = \frac{R_0 L_k}{\omega_c}; \quad C = \frac{C_k}{R_0 \omega_c}. \quad (1)$$

Далее необходимо рассмотреть эквивалентные схемы разрабатываемого ППФ в виде сосредоточенных элементов (рис. 3) [9].

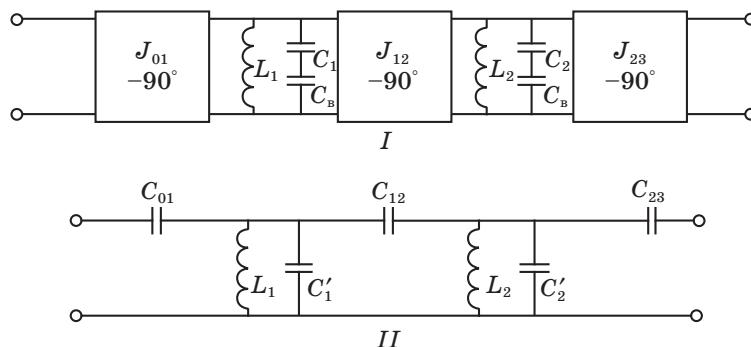


Рис. 3. Эквивалентные схемы ППФ:

I – общая схема фильтра с использованием преобразователей адmittанса;
II – схема после замены преобразователей на эквивалентные емкости

Fig. 3. BPF equivalent circuit:

I – Common circuit with admittance transformer;
II – Transformer to equivalent capacities replacement circuit

На рис. 3 видно, что схема состоит из двух параллельных LC -контуров и трех преобразователей адmittанса $J_{n, n+1}$. Последние используются для преобразования параллельных резонаторов в последовательные и масштабирования входного импеданса в импеданс фильтра. Учитывая, что эквивалентная схема преобразователя представляет собой π -исполнение с использованием конденсаторов, преобразуем схему (I) в (II). При этом:

$$C'_1 = -C_{01} + \frac{C_1 + C_{\text{в}}}{C_1 C_{\text{в}}} - C_{12}, \quad (2)$$

где C_{01} , C_{12} – элементы эквивалентного π -исполнения преобразователя адmittанса; C_1 – емкость микрополоскового шлейфа; $C_{\text{в}}$ – переменная емкость варикапа; C'_1 , C'_2 – эквивалентная емкость структуры шлейф + варикап с учетом преобразователей адmittанса.

Далее можно определить значения преобразователей адmittанса и разделительных конденсаторов (емкость зазора) [9]:

$$\begin{aligned} Z_0 J_{01} &= \sqrt{\frac{\pi \Delta}{4 g_1}}; & C_{01} &= \frac{J_{01}}{\omega_0 \sqrt{1 - (Z_0 J_{01})^2}}; \\ Z_0 J_{n, n+1} &= \frac{\pi \Delta}{4 \sqrt{g_n g_{n+1}}}; & C_{n, n+1} &= \frac{J_{n, n+1}}{\omega_0}; \\ Z_0 J_{N, N+1} &= \sqrt{\frac{\pi \Delta}{4 g_N g_{N+1}}}; & C_{N, N+1} &= \frac{J_{N, N+1}}{\omega_0 \sqrt{1 - (Z_0 J_{N, N+1})^2}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где ω_0 – центральная частота; $\Delta = (\omega_2 - \omega_1) / \omega_0$ – относительная ширина полосы фильтра.

На основании полученных параметров рассчитывается длина резонаторов. Исходя из теории [9], для короткозамкнутого резонатора длина l_n равна $\frac{\lambda}{4}$ плюс укорачивающая длина Δl . Итоговая формула имеет вид:

$$l_n = \frac{\lambda}{4} + \Delta l = \frac{\lambda}{4} + \frac{Z_0 \omega_0 \Delta C_n}{2\pi} \lambda,$$

где $\Delta C_n = -C_{n-1, n} - C_{n, n+1}$ представляет собой добавочную емкость резонатора, связанную с параллельными элементами преобразователя адmittанса.

В соответствии с полученными значениями емкости зазора между резонаторами и их длиной, получена схема для моделирования фильтра в среде САПР (рис. 4). В качестве материала подложки выбран RO4003 от фирмы Rogers, с толщиной $h = 0.508$ мм и значением диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = 3.55$. Выбор данного материала обусловлен его технологичностью, доступностью и низким значением тангенса потерь. Основной частью схемы является топология фильтра, рассчитанная выше и представляющая собой два связанных четвертьволновых короткозамкнутых резонатора постоянной ширины. Конденсаторы С1–С4 являются блокирующими элементами по постоянному току и выбираются так, чтобы вносить минимальные потери по рабочей частоте. Контуры 1 и 2 представляют собой уточненные SPICE модели варикапов, учитывающие их внутренние свойства и паразитные параметры корпуса. LC -контуры 3 и 4 – это цепи питания варикапов, включенные во входной и выходной отрезки микрополосковой линии. Такое расположение питающих элементов и подбор значений L и C полностью исключает их влияние на параметры фильтра.

На этапе проектирования получена избыточная расчетная полоса перестройки, равная 19 % по уровню -1 дБ, при этом требуемое значение перестройки согласно поставленной задаче 15 %. Поэтому в схему введены конденсаторы С5 и С6, которые дали увеличение емкости резонаторов фильтра, что позволило уменьшить топологические размеры изделия. Побочным негативным эффектом введения С5 и С6 явилось сокращение диапазона перестройки фильтра за счет снижения эквивалентной параллельной емкости варикап-конденсатор. Семейство характеристик перестраиваемого фильтра при напряжениях (1.5–12) В представлено на рис. 5. Фильтр перестраивается от нижней частоты f_n при значении напряжения 1.5 В и емкости варикапа $C_b \approx 2.1$ пФ до верхней частоты f_v при значении 12 В и емкости варикапа $C_b \approx 0.9$ пФ.

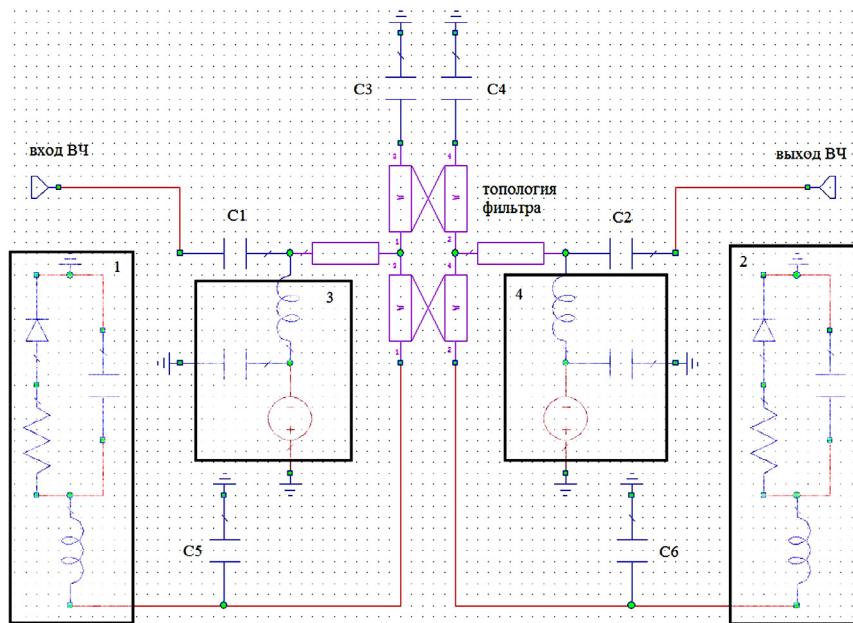


Рис. 4. Расчетная схема фильтра для моделирования в среде САПР

Fig. 4. Filter design circuit for CAD

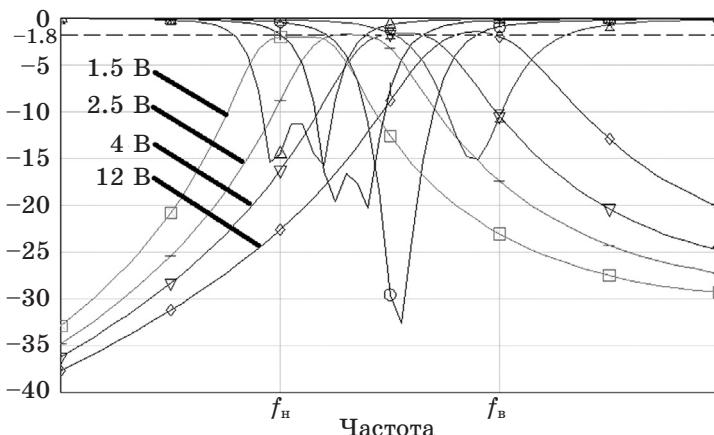


Рис. 5. Семейство расчетных АЧХ перестраиваемого фильтра

Fig. 5. Set of the tunable filter design amplitude-frequency characteristics

Практическая реализация перестраиваемого фильтра

На основании расчета был изготовлен макет фильтра рис. 6 с габаритами 12x15 мм. Материал подложки RO4003. Основными сложностями практической реализации схемы являются:

– создание широкополосной фильтрующей цепи питания (контуры 3 и 4 рис. 4). Она должна не только обеспечивать минимальные дополнительные потери в диапазоне перестройки фильтра, но и исключение просачивания со входа на выход фильтра внеполосных составляющих. Широкополосные свойства этого узла определяет прежде всего конденсатор, входящий в него. В классическом варианте принято использовать набор параллельных емкостей возрастающего номинала, перекрывающий весь диапазон рабочих частот. В данном макете был использован один высокочастотный конденсатор типа ATC 520L производства фирмы ATC номиналом 0.01 мкФ. Данное схемотехническое решение очевидно является более эффективным и технологичным, по сравнению с классическим вариантом;

– выбор точки кондуктивного включения в резонаторы фильтра и определение зазора между ними. Положение входного/выходного полоска относительно места заземления резонатора и ширина зазора между резонаторами значительно влияет на АЧХ-фильтра. Так, чем «чем ближе» точка включения к короткому замыканию, тем сильнее связаны резонаторы, что аналогично уменьшению ширине зазора. При этом также увеличивается нагруженная добротность фильтра и улучшается внеполосное давление. Поэтому положение входного/выходного ВЧ-полоска и зазор являются очень важными и чувствительными областями топологии всего фильтра, точности проектирования и изготовления которых следует уделить особое внимание.

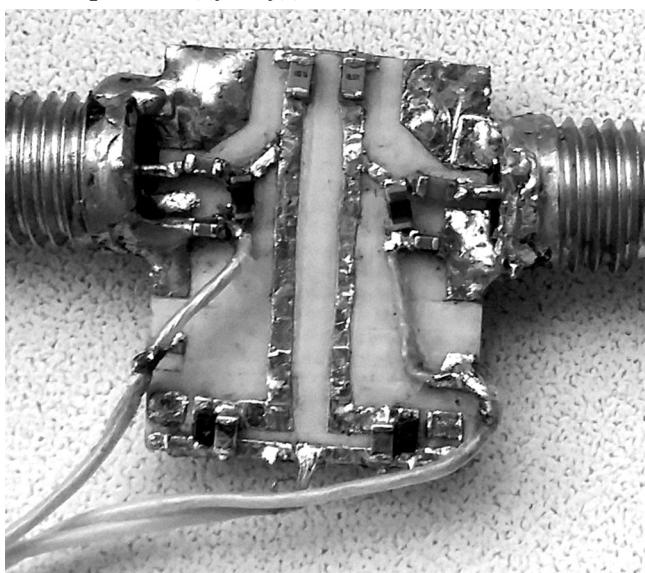


Рис. 6. Фото макета перестраиваемого фильтра

Fig. 6. Photo of the tunable filter model

Результаты измерений макета представлены на рис. 7. Измерения проведены в диапазоне обратных напряжений 1,5–12 В с последующим сохранением результатов в виде файлов *S*-параметров. На графике представлены наиболее характерные кривые АЧХ разработанного фильтра, исходя из которых видно:

- изделие обеспечивает перестройку в диапазоне от f_n до f_b в *L*-диапазоне с результирующей шириной полосы 15 %;
- КСВН в рабочей полосе пропускания не хуже 2;
- максимальные потери на центральной частоте в диапазоне перестройки фильтра 2,6 dB с неравномерностью 0,6 dB;
- внеполосное подавление при отстройке на $0.9f_n$ и $1.1f_b$ относительно уровня полосы пропускания не менее 11 dB;
- ширина полосы пропускания перестраиваемого фильтра по уровню -1 dB меняется в диапазоне 6–6,5 % при перестройке от минимального значения напряжения обратного питания до максимального.
- ширина полосы пропускания перестраиваемого фильтра по уровню -20 dB изменяется от 32 до 36 % при перестройке от минимального значения напряжения обратного питания до максимального.

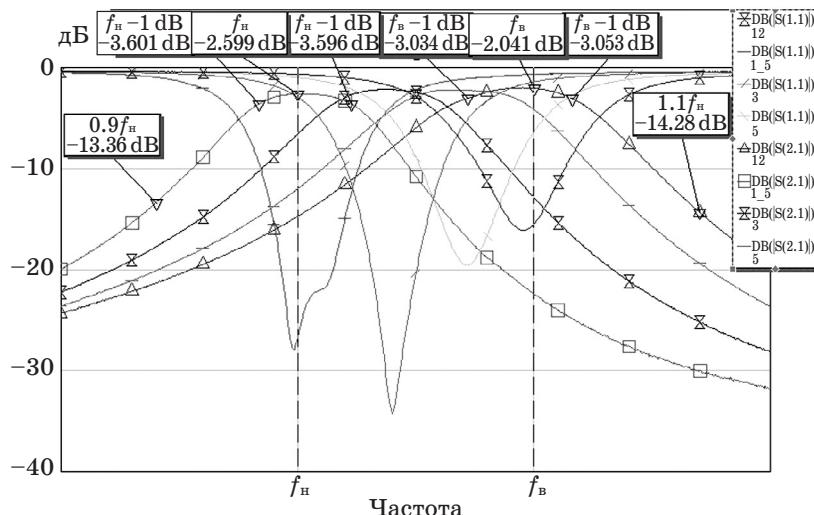


Рис. 7. АЧХ-макета перестриваемого фильтра

Fig. 7. Set of the tunable filter amplitude-frequency characteristics of the model

Также для данного макета фильтра было проведено испытание в климатической камере на изменение его параметров при различных температурах: 0, +25, +50 °C для двух значений управляющих напряжений: 1 В и 9 В. АЧХ-испытаний фильтра при изменении температуры приведены на рис. 8.

Получены следующие результаты изменений электрических параметров фильтра на температуре относительно нормальных условий (+25 °C):

1. При управляющем напряжении 1 В и изменении температуры в камере от 0 до +50: коэффициент передачи изменяется на 1 дБ; ширина полосы пропускания по уровню –1 дБ относительно максимума не изменяется; значение центральной частоты уменьшается на 10 МГц.

2. При управляющем напряжении 9 В и изменении температуры в камере от 0 до +50: коэффициент передачи изменяется на 0,55 дБ; ширина полосы по уровню –1 дБ относительно максимума не изменяется; значение центральной частоты уменьшается на 6 МГц.

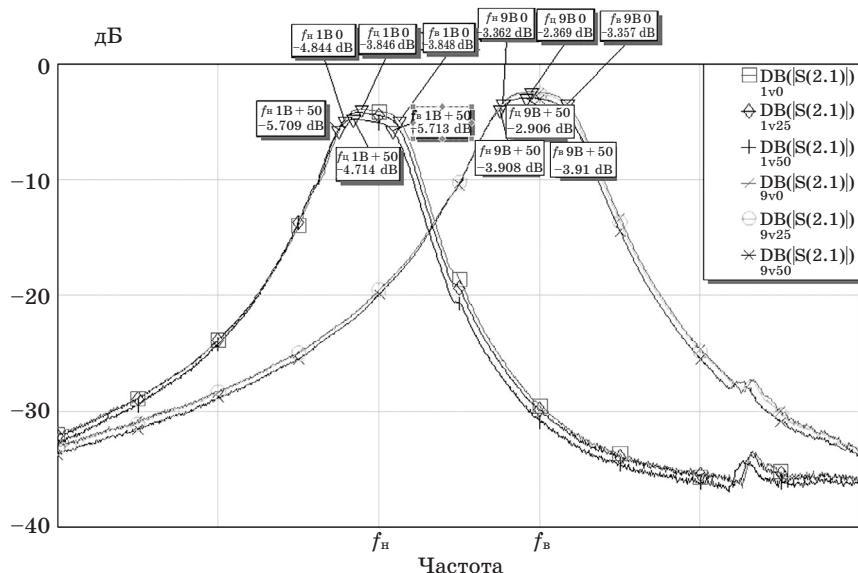


Рис. 8. АЧХ макета при температурных испытаниях

Fig. 8. Set of the amplitude-frequency characteristics of the model over temperature

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- разработан экспериментальный макет перестраиваемого ВЧ-фильтра на основе вариакапов. Полученные результаты испытаний показывают высокий уровень корреляции с расчетной моделью;
- параметры фильтра, такие как полоса пропускания, КСВН, неравномерность и потери передачи удовлетворяют поставленным требованиям по разработке ППФ приемного ВЧ-тракта;

– показатели внеполосного подавления и прямоугольности АЧХ не удовлетворяют заданным параметрам разрабатываемого ППФ приемного ВЧ-тракта. Это прежде всего связано с тем, что в качестве топологии фильтра был выбран простейший базовый вариант. Также данная схема перестройки обладает свойством расширения абсолютной полосы пропускания с ростом напряжения питания. В дальнейшем возможно улучшить эти параметры выбором более сложной топологии с лучшими частотно-селективными свойствами или каскадированием нескольких фильтров. Для устранения эффекта расширения ПП следует внести корректиры в схему устройства, либо исключающие этот эффект, либо позволяющие управлять им;

– фильтр обладает достаточной температурной устойчивостью в диапазоне (0 ч +50) °С относительно нормальных условий (+25 °С): коэффициент передачи изменяется на 15 % в большую или меньшую сторону; центральная частота перемещается на 4 % в область низких или высоких значений.

Список литературы

1. Вольман В. И. *Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств*. М.: Радио и связь; 1982.
2. Знаменский А. Е., Попов Е. С. *Перестраиваемые электрические фильтры*. М.: Связь; 1979.
3. Haeng-Seon Lee, Sang-Won Yun. Microwave Planar Varactor Tuned Bandpass Filters: Historical Overview. In: *Dept. of Electronics Engineering Sogang University, Seoul, Korea, April 2003*. P. 559–562.
4. Huang F., Mansour R. R. Tunable Compact Dielectric Resonator Filters. In: *Proceedings of the 42st European Microwave Conference. October 2009*. P. 559–562.
5. Tsai C. S., Qiu G. Wideband microwave filters using ferromagnetic resonance tuning in flip-chip YIG-GaAs layer structures. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009;45(2):656–660. DOI: 10.1109/TMAG.2008.2010466
6. Chun Y.-H., Hong J. S., Bao P., Jackson T. J. BST-Varactor Tunable Dual-Mode Filter Using Variable ZC Transmission Line. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2008;18(3):167–169. DOI: 10.1109/LMWC.2008.916778
7. Dussopt L., Rebeiz G. M. Intermodulation distortion and power handling in RF MEMS switches, varactors, and tunable filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2003;51(4):1247–1256. DOI: 10.1109/TMTT.2003.809650
8. Ni, Jia. *Development of Tunable and Miniature Microwave Filters for Modern Wireless Communications*. Heriot-Watt University. Dissertation for the degree of PhD. Edinburgh, Scotland; 2014. Available at: <https://www.ros.hw.ac.uk/handle/10399/2843>
9. David M. *Pozar Microwave Engineering*. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc.; 2012.

References

1. Volman V. I. *Microwave stripe devices engineering handbook*. Moscow: Radio i Svyaz; 1982. (In Russ.)
2. Znamenskiy A.E., Popov E.S. *The tunable electrical filters*. Moscow: Svyaz; 1979. (In Russ.)
3. Haeng-Seon Lee, Sang-Won Yun. Microwave Planar Varactor Tuned Bandpass Filters: Historical Overview. In: *Dept. of Electronics Engineering Sogang University, Seoul, Korea, April 2003*. P. 559–562.
4. Huang F., Mansour R. R. Tunable Compact Dielectric Resonator Filters. In: *Proceedings of the 42st European Microwave Conference. October 2009*. P. 559–562.
5. Tsai C. S., Qiu G. Wideband microwave filters using ferromagnetic resonance tuning in flip-chip YIG-GaAs layer structures. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009;45(2):656–660. DOI: 10.1109/TMAG.2008.2010466
6. Chun Y.-H., Hong J. S., Bao P., Jackson T. J. BST-Varactor Tunable Dual-Mode Filter Using Variable ZC Transmission Line. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2008;18(3):167–169. DOI: 10.1109/LMWC.2008.916778
7. Dussopt L., Rebeiz G. M. Intermodulation distortion and power handling in RF MEMS switches, varactors, and tunable filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2003;51(4):1247–1256. DOI: 10.1109/TMTT.2003.809650
8. Ni, Jia. *Development of Tunable and Miniature Microwave Filters for Modern Wireless Communications*. Heriot-Watt University. Dissertation for the degree of PhD. Edinburgh, Scotland; 2014. Available at: <https://www.ros.hw.ac.uk/handle/10399/2843>
9. David M. *Pozar Microwave Engineering*. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc.; 2012.

Информация об авторе

Говоров Георгий Евгеньевич – аспирант, Южный федеральный университет; Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 5.

Information about the author

Georgy E. Govorov – postgrad, South Federal University; 5 Zorge Str, Rostov on Don, 34090, Russia.

Поступила / Received: 21.10.2019

Принята в печать / Accepted: 06.12.2019

Publication Requirements for Articles Submitted to “Ural Radio Engineering Journal”

The journal accepts for publication authors' original articles in Russian and English which correspond to the subject of the Ural Radio Engineering Journal.

The submitted papers should not be published in other scientific journals in parallel.

All papers are submitted over automated editorial media on the website of the journal (<https://journals.urfu.ru/index.php/urj>) or via email (urejournal@gmail.com). A paper is considered being submitted if a reply message with confirmation is received.

A paper is submitted in formats readable by MS Word. The final paper length should be between 8 to 30 pages (including references).

The text file of the paper should start with the information about the authors: complete name, affiliation (place of work, study, etc.), postal address for journal delivery, e-mail address, and phone numbers.

The text file of the paper should contain a required number of UDC classification codes, abstract, key words and the text of the article in Russian or English. The style of the paper should be scientific and meet the requirements of anonymization.

Paper Title

The paper title should be informative and concise. Only commonly accepted abbreviations should be used.

Abstract

Abstract functions as an autonomous source of information. It should be informative, intelligent, brief and structured. If the paper is published in Russian the English abstract should be more extensive (and differs from the Russian one).

Abstract may start with the phrases: *This paper focuses on...*, *This paper aims at explaining...*, *Our paper is concerned with...* and etc.

Abstract in English represents the main content of the paper and its conclusions. The abstract structure as in the paper is welcomed:

Introduction, Target and Research Questions, Methodology, Results and Conclusion. The results of the research are described accurately and informatively. The conclusion may include recommendations, assessments and proposals from the article.

The text of the abstract should be laconic and concrete, deprived of peripheral issues, extra parenthetical words and general enunciations.

Keywords

3–8 words or established terms. IEEE taxonomy is recommended.

Mathematical Formulas

All mathematical formulas in the paper should be unified. MathType, import from MatLab or analogous editable mathematical package are recommended.

Tables

All tables should have titles and a legend explaining any included abbreviations.

Figures

All figures should be prepared in the raster formats JPEG, TIFF with the resolution not less than 600 dpi. Lowercase letters (a, b и т.д.) are used for the identification of different parts of the figure. Symbols used for marking and heading the figures should be identical with their inscription in the paper.

Files with figures are duplicated in a separate folder. The number of the figure in the paper is the name of the file.

Figures, graphics and etc. in MS Excel should also be sent in Excel files.

Acknowledgements

Acknowledgements should be as short as possible. All grants required references should be listed. The full titles of financing organizations should be listed.

References

The list of the references should be given at the end of the paper. References are numbered in brackets by order of appearance in the document (e.g. [1; 2]).

References should include only articles quoted in the paper and already published or accepted for publication. Articles published in the Internet should be quoted with Digital Object Identifier (DOI).

References in the paper in Russian are also provided in English. Titles of the resources in Russian are provided transliterated and translated.

Author Credentials

Information about the authors is at the end of the article: full name, academic degree, position, place of work, e-mail, postal address. All is in two languages.

Plagiarism

Plagiarism in any form is a serious violation of the main principles of science and therefore is unacceptable.

Inadmissible:

1. Copying of parts of papers of other authors word for word without putting them between quotation marks in accordance to the rules of scientific citation.
 2. Use of particularly unique term taken from science literature without its author's or source's indication.
 3. Paraphrasing, abridgment or changing of ideas of other authors without their name indication.
 4. Pseudo citation: the material doesn't apply to the source it is taken from.
 5. Falsified data — data which is falsified or changed in laboratory or during an experiment (it is not practically a plagiarism though it is obvious academic fraud).
 6. Unconfirmed co-authorship or co-operation: the contribution of every author or co-author should be absolutely defined.
 7. Self-plagiarism/republication: presentation of one and the same or similar paper for two or more submissions concurrently.
- Editorial board reserves the right to return a paper to the author if the paper doesn't meet the requirements. No explanation is given. The information about the reviewers can't be disclosed to the authors or the third person party.

Требования к статьям, публикуемым в журнале Ural Radio Engineering Journal

Журнал принимает к публикации оригинальные авторские статьи на русском и английском языке, соответствующие тематике. Присланные на рассмотрение и рецензирование статьи не должны одновременно печататься в другом научном журнале.

Все статьи принимаются через автоматизированную редакционную среду на сайте журнала (<https://journals.urfu.ru/index.php/urj>) или по электронной почте (urj@urfu.ru). Статья считается принятой в случае получения ответного сообщения/письма с подтверждением.

Статья принимается в форматах, читаемых MS Word. Объем статьи должен составлять от 0.5 до 1.5 авт. л.

Текстовый файл статьи следует начинать с информации об авторах: имена, аффилиация (место работы, учебы и др.), почтовый адрес для пересылки журнала, адрес электронной почты, номера контактных телефонов для связи.

В текстовом файле должны быть приведены: необходимое количество кодов классификации УДК, аннотация, ключевые слова и непосредственно текст статьи — **на русском или английском языках**. Изложение текста в статье должно отвечать научной стилистике и требованиям анонимизации.

Заглавие статьи

Заглавие научной статьи должно быть информативным и кратким. Можно использовать только общепринятые сокращения.

Аннотация

Аннотация призвана выполнять функцию независимого от статьи источника информации, она должна быть информативной, содержательной, компактной и структурированной. В случае публикации статьи на русском языке английский вариант аннотации должен быть более развернутым (он может отличаться от русского). Аннотация может начинаться со слов: „This paper focuses on...“, „This paper aims at explaining...“, „Our paper is concerned with...“ и т. п.

Аннотация на английском языке должна отражать основное содержание статьи и ее выводы. Приветствуется построение аннотации, повторяющее структуру статьи, включая введение, цели и задачи, методологию исследования, результаты, заключение. Результаты работы описываются предельно точно и ин-

формативно. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, приведенными в статье.

Текст аннотации должен быть лаконичен и конкретен, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих формулировок.

Ключевые слова

От 3 до 8 слов или устоявшихся словосочетаний. Рекомендуется использовать таксономию IEEE.

Математические формулы

Все математические формулы в тексте должны быть набраны единообразно. Рекомендуется использовать MathType, импорт из MatLab или аналогичных математических пакетов с возможностью редактирования.

Таблицы

Все таблицы должны иметь заглавие и легенду, объясняющую любые упомянутые в них сокращения.

Рисунки

Все иллюстрации должны быть подготовлены в растром формате JPEG, TIFF, разрешение не менее 600 dpi. Для идентификации частей иллюстрации следует использовать строчные буквы (*а*, *б* и т.д.). Начертание символов, используемых для обозначений на рисунках и в подписях к ним, должно совпадать с их написанием в тексте статьи.

Файлы с рисунками дублируются в отдельной папке. В названиях файлов должны быть указаны номера иллюстраций в тексте статьи.

Иллюстрации, графики и пр., выполненные в MS Excel, необходимо дополнительно выслать в виде файла Excel.

Благодарности

Благодарности должны быть как можно более краткими. Следует указать все гранты, в правилах которых требуется упоминание. Названия финансирующих организаций нужно писать целиком.

Список литературы

В тексте и в сносках ссылки на источники должны приводиться в [квадратных скобках], нумерация сквозная. Описание всех ссылок дается в списке литературы в конце статьи.

Список литературы должен включать только те работы, которые цитируются в тексте и которые были опубликованы или

приняты к публикации. Статьи, опубликованные в интернете и не прошедшие в печать, должны цитироваться с использованием цифрового идентификатора объекта (Digital Object Identifier (DOI)). При наличии DOI также может быть добавлен и к опубликованным материалам из списка литературы.

Для статьи на русском языке список литературы приводится также и на английском, при этом названия русскоязычных источников представляются как в транслитерации, так и в переводе.

Информация об авторах

В конце статьи приводится информация об авторах: ФИО, научная степень, должность, место работы, e-mail, почтовый адрес — также на двух языках.

Плагиат

Плагиат в любой форме представляет собой серьезное нарушение одного из самых основных принципов науки и не может быть приемлем.

Недопустимы:

1. Копирование слово в слово частей чужой работы без заключения скопированного отрывка в кавычки и указания источника в соответствии с правилами научного цитирования.
2. Использование особо уникального термина или понятия, найденного при чтении литературы, без указания автора или источника.
3. Перефразирование или сокращенная, измененная формулировка чужой идеи без указания того, чей труд был взят за основу.
4. Ложное цитирование: материал не должен быть отнесен к источнику, из которого он не был получен.
5. Ложные данные — данные, которые были сфабрикованы или изменены в лаборатории или в процессе эксперимента (хотя и не являются буквально плагиатом, тем не менее представляют собой явное академическое мошенничество).
6. Неподтвержденное соавторство или сотрудничество: вклад каждого автора или соавтора должен быть совершенно определенным.
7. Самоплагиат/вторичная публикация: представление одной и той же или похожей до степени сродства статьи для двух или более публикаций одновременно.

Редакция оставляет за собой право на возвращение авторам любой рукописи, которая, по их мнению, не подходит для публикации, без объяснения причин. Ни при каких обстоятельствах личность рецензентов и референтов по отдельным статьям не может быть раскрыта авторам или третьей стороне.

Publication Ethics

General

The editorial board of the journal “Ural Radio Engineering Jornal” honors the ethical criteria established for international scholarly publications, like integrity, confidentiality, transparency, conflict of interests and other aspects. We are guided by recommendations of the Committee on Publication Ethics. Being a member of Association of Science Editors and Publishers (ASEP), we adhere to the basic ethical principles manifested in the ASEP Declaration.

- The editorial board grants that all materials submitted for publication will be peer reviewed and accepted based on the principles of editorial independence and unbiased judgment.
- The editorial board is responsible for the quality of published scientific papers and supports the initiatives aimed at prevention of misconduct or unethical actions on the part of the authors or reviewers.
- Ethical rules are accepted as a must for all parties of the scholar publications: authors, reviewers, editorial board members, as well as persons and entities interested in the information disseminated by the Journal.
- Materials submitted to the editorial board are not returned to the authors. The authors will receive no remuneration (royalties) for the published materials. All scientific papers are published on free of charge basis.
- The editorial board adheres to the COPE ethical criteria, such as:
 - impartiality;
 - observance of scientific ethics when reviewing the papers, encouragement of scholarly discussions between the authors and reviewers;
 - assistance to protection of intellectual property and copyright;
 - papers will be rejected in case of plagiarism when another’s publications, words, or ideas are used without attribution to the original source, which is to be identified by the plagiarism detection software Antiplagiat;

- confidentiality (non-disclosure of the authors' and the reviewers' personal information and other information obtained within the professional interaction);
- making editorial correction in papers by agreement with authors.

Responsibilities and ethics of editors

The editorial board should:

- strive to meet the needs of readers and authors;
- take appropriate measures to maintain a high quality of the material published;
- take appropriate measures to maintain a high quality of the material published;
- preclude commercial needs from compromising intellectual standards;
- always be willing to publish corrections, clarifications, retractions and apologies, if required.

Author's responsibilities and ethics

The author shall cooperate with the editorial board throughout the publication process by introducing appropriate corrections, if required. The author is fully responsible for any plagiarisms in the text, illustrations or other materials.

The manuscripts submitted to the Journal's editorial staff should comply with the research paper manuscript formatting rules stated on the Journal web site.

The author is not entitled to submit the same paper for several scientific publications. The authors are obliged to observe the following ethical principles:

- compliance of the materials with the ethics and legal standards including copyright protection laws (in particular, the materials protected by the copyright including tables, digits or long quotations can be reproduced only by the owner's permission);
- research originality and scientific novelty;
- researchers should use best endeavors to describe the work performance methodology clear and definitely in such way that their results can be approved by other researchers, if required;
- impartial discussion of the research importance;
- acknowledgement of other persons' contributions, mandatory references to the deliberations used for the benefit of submitted materials;

- presentation of all major contributors to the research as coauthors;
- informing about significant errors or inaccuracies, if any, found in the publication and interacting with the editorial staff with the purpose of the quickest error correction or removal of the publication;
- no adoptions without proper references to primary sources (plagiarism).

The authors are fully responsible for reliability of the information contained in the submitted materials, for compliance of the materials with the statutory regulations, the moral rules and the ethics standards.

Responsibilities and ethics of authors

According to the Journal policy the editorial board establishes the review procedures for the materials to be published. In the process of reviewing the manuscripts the information about the authors and the reviewers will be held in confidence. Disclosures in breach of the confidence are allowed only in case of suspected deception or falsification on the part of the authors or the reviewers. Reviewers are not entitled to use the reviewed manuscripts for personal purposes or provide these manuscripts to third parties without prior permission of senior editors. They are obliged to return or delete the manuscript copy after presenting the review. The manuscripts rejected by the editorial board are not preserved. The reviewer remarks are not published or made public otherwise without permission of the reviewer, the manuscript author or the editor. Reviewers shall provide fair and unbiased judgment of the manuscript, giving clearly and well-grounded comments to appraise the paper's scientific content only. Personal criticism of the author is unacceptable. The reviewers are obliged to be guided by the following ethical principles:

- to review only those manuscripts which the reviewer has sufficient knowledge to judge;
- to prepare a review in time based on the constructive approach;
- to maintain confidentiality;
- to be impartial preparing a review;
- to inform the editor in case the materials have been published earlier in this or another publication;
- to inform the editor and, if required, to pass the manuscript to another reviewer in case of potential conflict of interests (existing of financial, organizational or other relations between the reviewer and the author);

- the review contents should not be influenced by the manuscript origin, the authors' nationality, sex, religion or political commitments;
- not to use the information obtained within the reviewing process for the personal purposes and in the interests of other persons.

Privacy

E-mail addresses intimated by the authors will be used exclusively for communication with the authors and referees and shall not be disclosed to other persons or entities.

Disclosure and conflict of interest policy

Referees deemed to have conflicts of interest in view of personal, financial or organization benefits, as well as competition with any submitting authors (companies, organizations) will not be appointed to review the manuscripts in question.

Публикационная этика

Общие положения

- Редакция журнала *Ural Radio Engineering Jornal* руководствуется в своей работе международными этическими правилами научных публикаций, в основе которых лежит порядочность, конфиденциальность, надзор за публикациями, разрешение возможных конфликтов интересов и др. В своей деятельности редакция следует рекомендациям Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics), опирается на принципы публикационной этики, принятые Декларацией АНРИ.
- Редакция гарантирует рассмотрение всех представленных к публикации материалов, соблюдение редакторской независимости и добросовестности, принятие объективных решений.
- Редакция несет ответственность за качество опубликованных научных статей и поддерживает инициативы, направленные на снижение числа некорректных действий со стороны авторов и рецензентов и нарушений норм этики.
- Этическим правилам журнала должны следовать все участники процесса публикации результатов научных исследований: авторы, рецензенты, члены редакционной коллегии, сотрудники редакции, а также лица и организации, заинтересованные в информации, представляемой журналом.
- Материалы, направляемые в редакцию журнала, авторам не возвращаются. Вознаграждение (гонорар) за опубликованные материалы не выплачивается. Все научные статьи публикуются в журнале на безвозмездной основе.
- Редакция журнала руководствуется такими этическими принципами COPE, как:
 - беспристрастность;
 - соблюдение научной этики при рецензировании статей, поощрение научной дискуссии между авторами и рецензентами;
 - содействие защите интеллектуальной собственности и авторских прав;

- отклонение рукописи статьи при выявлении плагиата — опубликованных ранее материалов других авторов без ссылки на первоисточники; проверка осуществляется с помощью системы «Антиплагиат»;
- конфиденциальность (неразглашение персональных данных авторов и рецензентов и прочей информации, полученной в ходе профессионального взаимодействия);
- внесение в статью редакционных правок после согласования с авторами.

Ответственность и этические принципы сотрудников редакции

Редакция журнала:

- обеспечивает выполнение запросов читателей и авторов;
- предпринимает необходимые меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов;
- гарантирует свободу выражения мнений всем членам научного сообщества;
- не допускает превалирования коммерческих соображений над интеллектуальными критериями;
- по мере необходимости обеспечивает публикацию поправок, разъяснений, опровержений и извинений.

Ответственность и этические принципы авторов

На протяжении всего процесса публикации автор обязан сотрудничать с редакцией журнала, исправляя статью в случае необходимости.

Автор полностью берет на себя ответственность за возможный плагиат текста, рисунков и других заимствованных материалов.

Рукописи, предоставляемые на рассмотрение в редакцию журнала, должны соответствовать правилам оформления рукописи научной статьи, представленным на сайте журнала.

Автор не имеет права представлять одну статью на публикацию в несколько научных изданий.

Авторам необходимо придерживаться следующих этических принципов:

- соответствие материалов этическим и юридическим нормам, в т. ч. законодательству о защите авторских прав (в частности, материалы, защищенные авторским правом, в т. ч. таблицы, цифры или крупные цитаты, могут воспроизводиться только с разрешения их владельцев);
- оригинальность и научная новизна исследований;

- достоверность полученных результатов;
- четкость в описании методологии выполнения работ, чтобы их результаты могли быть подтверждены при необходимости другими исследователями;
- объективное обсуждение значимости исследований;
- признание вклада других лиц, обязательное наличие библиографических ссылок на использованные работы;
- представление в качестве соавторов всех участников, внесших существенный вклад в исследование;
- информирование об обнаружении ошибок или неточностей в публикации и взаимодействие с редакцией с целью скрытого исправления ошибок или изъятия публикации;
- отсутствие в статье заимствований без ссылок на первоисточники (плагиата).

Авторы несут всю ответственность за достоверность информации, содержащейся в представляемых материалах, за соответствие материалов нормам законодательства, морали и этики.

Ответственность и этические принципы рецензентов

В соответствии с политикой журнала редакция устанавливает процедуру проведения рецензирования представленных к опубликованию материалов.

При рецензировании рукописей обеспечивается конфиденциальность информации об авторах и о рецензентах. Нарушение конфиденциальности допускается только при подозрении фальсификации со стороны авторов либо рецензентов.

Рецензенты не имеют права использовать полученные рукописи в личных целях или предоставлять их другим лицам без разрешения ответственного члена редколлегии. Замечания рецензентов не публикуются и не обнародуются иным образом без разрешения рецензента, авторов рукописи и редактора.

Рецензенты должны давать честную и объективную оценку рукописи, четко и аргументированно формулировать свои замечания, оценивая исключительно научное содержание статьи. Неприемлема критика личности автора.

Рецензент обязан руководствоваться следующими этическими принципами:

- осуществлять рецензирование только тех рукописей, для оценки которых он обладает достаточными знаниями;
- готовить рецензию своевременно на основе конструктивного подхода;

- соблюдать конфиденциальность;
- при составлении рецензии быть объективным;
- предупредить редактора о материалах, опубликованных ранее в данном или другом издании, при их наличии;
- предупредить редактора и, если необходимо, передать статью другому рецензенту в случае потенциального конфликта интересов (финансовых, организационных или других отношений между рецензентом и автором);
- не использовать информацию, полученную при рецензировании, в личных целях или интересах иных лиц.

На содержание рецензии не должно оказывать влияние происхождение рукописи, национальность, пол, религиозные или политические убеждения авторов.

Приватность

Представленные авторами имена и адреса электронной почты используются исключительно в деловых целях (для контакта с авторами или с рецензентами при подготовке статьи к публикации) и не могут быть предоставлены другим лицам и организациям.

Политика раскрытия и конфликты интересов

При наличии конфликтов интересов вследствие личной, финансовой или организационной заинтересованности, а также конкурентных отношений с любыми авторами (компаниями, организациями), представляющими рукопись, рецензенты не участвуют в ее рассмотрении.

Правила оформления статьи

Article Submission Guidelines

УДК 000.000

Название статьи

И. О. Фамилия автора¹

¹ Место работы, город, страна
e-mail

Аннотация

Аннотация должна содержать не более 300 слов и представлять основную идею статьи.

Ключевые слова

От трех до восьми слов или устоявшихся словосочетаний. Рекомендуется использовать таксономию IEEE.

Paper Title

Author Name¹

Author Affiliation, City, Country
e-mail address

Abstract

The abstract should contain no more than 300 words and represent the main idea of the article.

Keywords

3–8 words or established terms. IEEE taxonomy is recommended.

Введение (Introduction)

В введении необходимо представить основную идею работы, описать исследования, которые были проведены. И дать понять читателю, о чем пойдет речь в основной части статьи.

Introduction contains the main idea of the article and the description of the completed research. Introduction outlines the concept of the main part of the paper.

Заголовок 1 (Heading 1)

Рисунки должны иметь подписи на русском и английском языке.



Рис. 1. Название рисунка

Fig. 1. Example of a figure caption

Figure captions should be below the figures; table heads should appear above the tables. Insert figures and tables after they are cited in the text. Use the abbreviation “Fig. 1”, even at the beginning of a sentence.

Заголовок 2 (Heading 2)

Название таблицы указывается на русском и английском языках. В конце таблицы необходимо указать источник, в противном случае вы являетесь автором таблицы.

Table heads are in Russian and English. The source of the table is indicated after the table, otherwise you are the author of the table.

Таблица 1. Заголовок таблицы

Table 1. Table head

Source/источник:

Заголовок 3 (Heading 3)

Формулы должны быть набраны шрифтами Times New Roman и/или Symbol. Нельзя использовать встроенный редактор формул редактора Word версий 2010 и выше, так как он использует нестандартный математический шрифт. Используйте простой набор математических выражений в строку или редакторы MathType или MS Equation. Для создания многоуровневых формул используйте редакторы формул MathType или MS Equation.

Нумеруйте формулы последовательно. Нумерация выполняется с выравниванием по правому краю.

Названия переменных: латинские буквы наклонные, русские буквы прямые: $U_{\text{ном}}$. Названия функций и операторы: прямые латинские буквы: $pi = di/dt$. Греческие буквы всегда прямые.

Помните, что формулы включаются в текст с использованием знаков препинания, например, следующая за этим текстом формула должна завершиться точкой, так как это будет конец предложения:

$$a + b = \gamma. \quad (1)$$

Удостоверьтесь, что все переменные, используемые в формуле, были определены до или сразу после формулы. Ссылаясь на формулу, пишите «... в (1)...», но не «... в уравнении (1)...», за исключением начала предложения: «Уравнение (1)...».

Несколько распространенных ошибок

- Не используйте букву «о» вместо «0» (нуля), и наоборот: « μ_0 », но не « μ_o ».
- Все греческие буквы в формулах должны быть прямые, хотя по умолчанию редакторы формул считают иначе.
- Запятые, точки и т. д. ставятся вплотную к словам, после этих знаков обязательно ставится пробел: «Запятые, точки...», но не «Запятые ,точки..»
- Тире ставится одновременным нажатием клавиш ALT + SHIFT + «–» (на дополнительной цифровой клавиатуре). Не используйте дефис, или короткое тире, или минус вместо тире.

The equations are an exception to the prescribed specifications of this template. You will need to determine whether or not your equation should be typed using either the Times New Roman or the Symbol font (please no other font). To create multilevelled

equations, it may be necessary to treat the equation as a graphic and insert it into the text after your paper is styled.

Number equations consecutively. Equation numbers, within parentheses, are to position flush right, as in (1), using a right tab stop.

To make your equations more compact, you may use the solidus (/), the exp function, or appropriate exponents. Italicize Roman symbols for quantities and variables, but not Greek symbols. Use a long dash rather than a hyphen for a minus sign. Punctuate equations with commas or periods when they are part of a sentence, as in

$$\alpha + \beta = \phi. \quad (1)$$

Note that the equation is centered using a center tab stop. Be sure that the symbols in your equation have been defined before or immediately following the equation. Use “(1),” not “Eq. (1)” or “equation (1),” except at the beginning of a sentence: “Equation (1) is ...”

Some Common Mistakes

- The word “data” is plural, not singular.
- The subscript for the permeability of vacuum m_0 , and other common scientific constants, is zero with subscript formatting, not a lowercase letter “o”.
- In American English, commas, semi-/colons, periods, question and exclamation marks are located within quotation marks only when a complete thought or name is cited, such as a title or full quotation. When quotation marks are used, instead of a bold or italic typeface, to highlight a word or phrase, punctuation should appear outside of the quotation marks. A parenthetical phrase or statement at the end of a sentence is punctuated outside of the closing parenthesis (like this). (A parenthetical sentence is punctuated within the parentheses.)
- A graph within a graph is an “inset,” not an “insert.” The word alternatively is preferred to the word “alternately” (unless you really mean something that alternates).
- Do not use the word “essentially” to mean “approximately” or “effectively”.
- In your paper title, if the words “that uses” can accurately replace the word using, capitalize the “u”; if not, keep using lower-cased.

- Be aware of the different meanings of the homophones “affect” and “effect,” “complement” and “compliment,” “discreet” and “discrete,” “principal” and “principle”.
- Do not confuse “imply” and “infer”.
- The prefix “non” is not a word; it should be joined to the word it modifies, usually without a hyphen.
- There is no period after the “et” in the Latin abbreviation “et al.”.
- The abbreviation “i. e.” means “that is,” and the abbreviation “e. g.” means “for example”.

Заключение (Conclusion)

В заключении должны быть сформулированы основные выводы по работе.

Conclusion contains the main outputs of the research/paper.

Благодарности (Acknowledgment)

Здесь можно расположить благодарности, в том числе указать гранты и другие виды спонсорства, которые способствовали проведению исследований по теме публикации.

Here you can place the gratitude, including grants and other types of sponsorship that contributed to the research on the topic of publication.

The preferred spelling of the word “acknowledgment” in America is without an “e” after the “g.” Avoid the stilted expression “one of us (R. B. G.) thanks ...”. Instead, try “R. B. G. thanks...”. Put sponsor acknowledgments in the unnumbered footnote on the first page.

Список литературы/References

Библиографический список нумеруется. При цитировании номер ссылки включается в текст в квадратных скобках. Помните, что знаки препинания следуют после скобки: [1]. Ссылка делается без пояснений вида «... в статье [3]...», за исключением случая, когда она стоит в начале предложения: «Статья [4] содержит...»

The Reference list is numbered. When quoting, the reference number is included in the text in square brackets. Note that

punctuation marks come before the parentheses [1]. The reference is made without explanation (“... in the article/paper [3]...”), except when it is at the beginning of a sentence: “The article/paper [4] ...”.

Информация об авторе

Фамилия Имя Отчество, научная степень, должность, место работы, e-mail, город, страна.

Information about the author

Full name, academic degree, position, place of work, e-mail, City, Country.

URAL RADIO ENGINEERING JOURNAL

2019, Vol. 3, No. 4

Founded by Ural Federal University
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
19, Mira st., 620002, Ekaterinburg, Russia

Journal Registration Certificate
PI № FS77-69790 as of 18.05.2017

Adress of Journal
Office 129a, Mira st.,
620002, Ekaterinburg, Russia
Phone: +7 343 375-97-02
E-mail: urj@urfu.ru
Website: <https://journals.urfu.ru/index.php/urj>

Format 70x100 1/16. Circulation 500 cop.

Publisher — Ural Federal University
Publishing Center
4, Turgenev st., 620083 Ekaterinburg, Russia
Phone: +7 343 358-93-06, +7 343 350-58-20, +7 343 350-90-13
Fax: +7 343 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

УРАЛЬСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2019, Т. 3, № 4

Учредитель — Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Ответственный за выпуск Н.В. Папуловская
Редактор Е.Е. Крамаревская
Переводчик А.Г. Ковалева
Верстка Т.А. Лоскутовой
Дизайн обложки А.А. Кобелев

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-69790 от 18.05.2017

Адрес редакции:
Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 32, оф. 129а
Тел.: +7 (343) 375-97-02
E-mail: urj@urfu.ru
<https://journals.urfu.ru/index.php/urj>

Формат 70x100 1/16. Тираж 500 экз. Уч.-изд. л. 5,25.
Дата выхода в свет 30.12.2019. Заказ 326.

Отпечатано в типографии
Издательско-полиграфического центра УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>



URAL JOURNAL
RADIO ENGINEERING