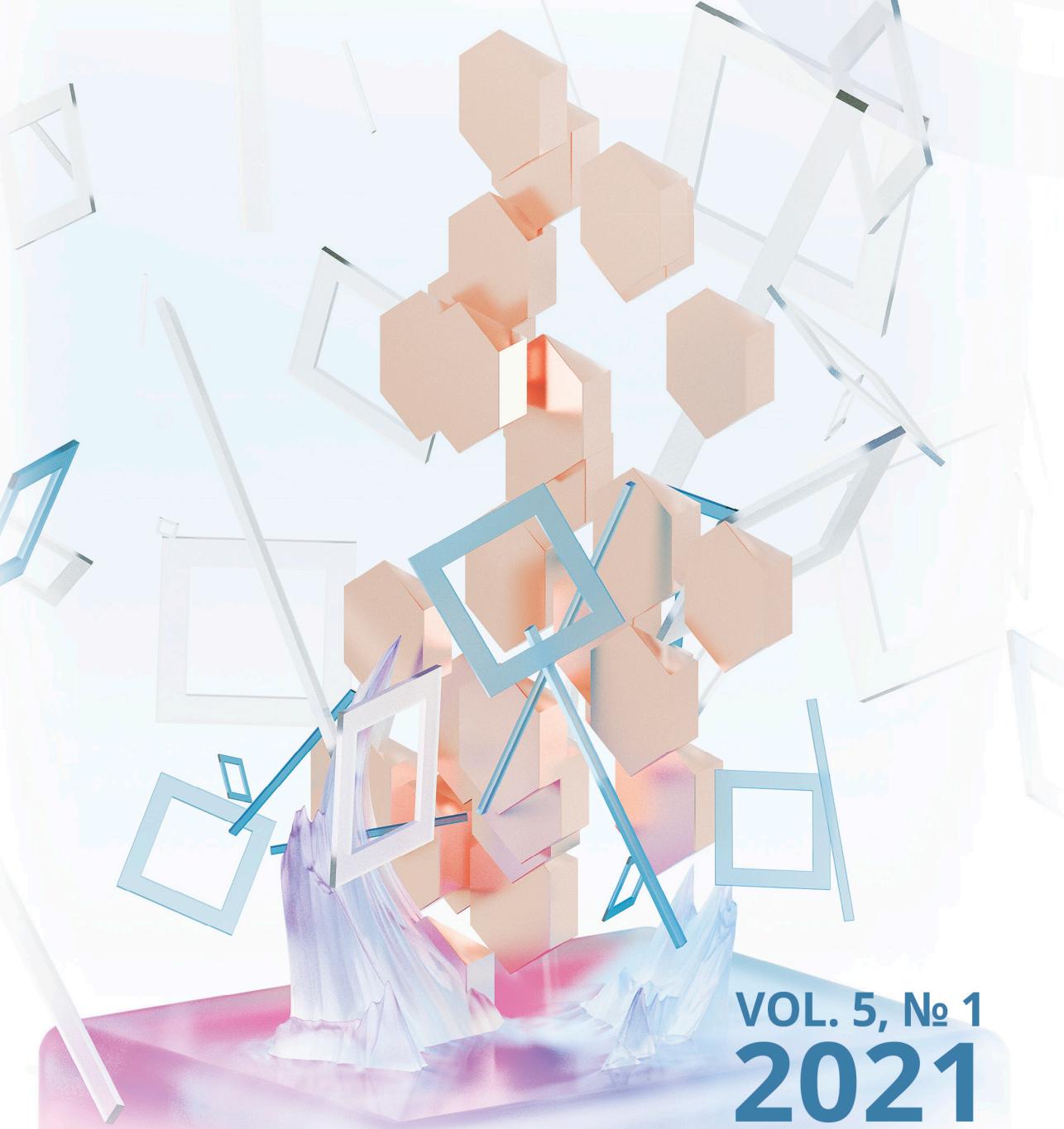


ISSN 2588-0454
ISSNe 2588-0462

URAL RADIO ENGINEERING JOURNAL



VOL. 5, № 1
2021



Ural Radio Engineering Journal

2021, Vol. 5, No. 1

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

2021, Т. 5, № 1

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

2021, Vol. 5, No. 1

Editor in Chief

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

Deputy Editor in Chief

Kirill M. Zeyde, 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

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

2021, Т. 5, № 1

Главный редактор

Князев Сергей Тихонович, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Россия

Заместитель главного редактора

Зейде Кирилл Михайлович, 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 радиоэлектронники, 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

Клэтте 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

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**2021, Vol. 5, No. 1****CONTENTS**

<i>Shirokov I. B., Serdyuk I. V., Azarov A. A., Shirokova E. I.</i> System for wireless power transfer.....	7
<i>Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Leksikov An. A., Bal'va Ya. F., Galeev R. G.</i> Miniaturized bandpass filter based on double spiral stripline resonators	21
<i>Bukrin I. V., Gusev A. V., Kudinov S. I., Ivanov V. E., Plokhikh O. V., Shabunin S. N.</i> Application of aerological radar to determine the wind profile in the lower troposphere	32
<i>Lvovich I. Ya., Lvovich Ya. E., Preobrazhenskiy A. P., Preobrazhenskiy Yu. P., Choporov O. N.</i> Investigation of the characteristics of complex diffractive structures based on a combined approach	49
Publication Requirements for Articles Submitted to <i>Ural Radio Engineering Journal</i>	63
Publication Ethics	69
Article Submission Guidelines	77

Ural Radio Engineering Journal**2021, Т. 5, № 1****СОДЕРЖАНИЕ**

<i>Широков И. Б., Сердюк И. В., Азаров А. А., Широкова Е. И.</i> Система беспроводной передачи энергии	7
<i>Беляев Б. А., Сержантов А. М., Лексиков Ан. А., Бальва Я. Ф.,</i> <i>Галеев Р. Г.</i> Миниатюрный полосно-пропускающий фильтр на двойных спиральных полосковых резонаторах	21
<i>Букрин И. В., Гусев А. В., Кудинов С. И., Иванов В. Э.,</i> <i>Плохих О. В., Шабунин С. Н.</i> Применение аэрометрического радиолокатора для определения профиля ветра в приземной атмосфере	32
<i>Львович И. Я., Львович Я. Е., Преображенский А. П.,</i> <i>Преображенский Ю. П., Чопоров О. Н.</i> Исследование характеристик сложных дифракционных структур на основе комбинированного подхода	49
<i>Требования к статьям, публикуемым в журнале</i> <i>Ural Radio Engineering Journal</i>	66
Публикационная этика	73
Правила оформления статьи	77

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2021.5.1.001

УДК 621.3.051.025

Система беспроводной передачи энергии

И. Б. Широков , **И. В. Сердюк**, **А. А. Азаров**, **Е. И. Широкова**Севастопольский государственный университет,
Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 shirokov@ieee.org**Аннотация**

Рассмотрены вопросы беспроводной передачи энергии на малые расстояния. Подход может быть применим для беспроводной зарядки батарей беспилотных транспортных средств. Предлагается для передачи энергии использовать технику микрополосковых структур. При приближении микрополосковых структур друг к другу с лицевой части они образуют направленный ответвитель на симметричных полосковых линиях. Длина линий взаимодействия выбирается в несколько раз большей, чем четверть длины волны. Балластные сопротивления из схемы исключаются. Такой подход приводит к малым потерям передачи энергии при изменении расстояния между микрополосковыми структурами в широких пределах. Осуществлено моделирование работы системы передачи энергии, изготовлен экспериментальный образец и проведены экспериментальные исследования. Моделирование и эксперимент хорошо согласуются друг с другом.

Ключевые слова

беспроводная передача энергии, микрополосковые структуры, направленный ответвитель, коэффициент стоячей волны

Для цитированияШироков И. Б., Сердюк И. В., Азаров А. А., Широкова Е. И. Система беспроводной передачи энергии. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):7–20. DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.001.

System for wireless power transfer

I. B. Shirokov , **I. V. Serdyuk**, **A. A. Azarov**, **E. I. Shirokova**Sevastopol State University,
33 Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russia shirokov@ieee.org**Abstract**

The issues of wireless power transfer over short distances are considered. The approach may be used for wireless charging of batteries in unmanned vehicles. It is proposed to use the technique of microstrip structures for power transfer. The microstrip structures form a directional coupler on

symmetrical strip lines when approaching by front parts. The length of the interaction lines is chosen several times longer than a quarter of the wavelength. Ballast resistors are excluded from the circuit. This approach leads to small losses of power transfer when the distance between microstrip structures changes over a wide range. Modeling of the operation of the power transfer system has been carried out, an experimental sample has been made and experimental studies have been carried out. The simulation and experiment are well accorded.

Keywords

wireless power transmission, microstrip structures, directional coupler, standing wave ratio

For citation

Shirokov I. B., Serdyuk I. V., Azarov A. A., Shirokova E. I. System for wireless power transfer. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):7–20. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.001.

Введение

Электротранспортные системы стремительно развиваются во всем мире. В последнее время очень популярными являются системы беспроводной подзарядки аккумуляторных батарей, которые широко используется во всех сферах жизни человека. Одной из основных задач, решаемых данного рода системами, может являться подзарядка аккумуляторных батарей беспилотных летательных аппаратов (БпЛА).

Потребление электроэнергии двигателями приводит к быстрой разрядке аккумулятора. Стремление к увеличению полезной нагрузки приводит к уменьшению веса батарей и, как следствие, их емкости. В результате полезное время разряда батареи ограничивается 1 часом полета или около того, и соответственно, с такой же периодичностью аккумулятор должен заряжаться.

Контактные способы зарядки аккумуляторов позволяют решить эту задачу практически без потерь энергии, однако включают в себя множество других значимых недостатков. Во-первых, частое механическое переключение зарядного разъема резко сокращает срок его службы. Во-вторых, механическое соединение аккумулятора и системы зарядки требует либо присутствия человека на зарядной станции, либо автоматической системы высокопрецизионной посадки БпЛА на стол зарядной станции. Иногда эти подходы могут не реализоваться в принципе, например, при обслуживании БпЛА в пустыне. Также необходимо учитывать, что чистота поверхностей электрических контактов должна быть безупречной.

Беспроводная зарядка аккумуляторов лишена перечисленных проблем, а зарядка аккумулятора любой транспортной систе-

мы может осуществляться в автоматическом режиме. Современный подход к беспроводной зарядке аккумуляторов мобильных телефонов и других современных гаджетов предполагает использование так называемого стандарта Qi¹. Этот стандарт подразумевает использование магнитной связи между плоскими катушками индуктивности, которая возникает при относительно низких рабочих частотах, десятки и сотни килогерц. Однако этот способ передачи энергии характеризуется чрезвычайно малым рабочим расстоянием между элементами системы передачи энергии. Эффективная передача энергии происходит практически при полном контакте плоских катушек. При расстоянии между катушками уже в 3–5 мм передача энергии практически полностью прекращается.

Работа устройства с увеличенным рабочим расстоянием, основанная на принципе магниторезонансной передачи энергии, описана в [1–3]. По мнению авторов, передача энергии может осуществляться изотропно и на значительные расстояния, достигающие нескольких метров. Однако работа такого устройства небезопасна для живых организмов в непосредственной близости от беспроводной системы передачи энергии, особенно если уровень мощности передаваемого излучения повышен до нескольких ватт и более.

Другой подход к беспроводной передаче энергии описан в [4; 5]. По описанию автора, такое устройство состоит из двух магнитных антенн, каждая из которых состоит из двух спиралей, намотанных в разные стороны. В результате такая антenna не излучает электромагнитную энергию, находясь в свободном пространстве. Поле, излучаемое отдельно спиралью, взаимно компенсируется; излучение энергии при этом отсутствует. При наличии такой магнитной антennы в непосредственной близости к второй подобной в одной плоскости между этими магнитными антennами возникает сильная магнитная связь и передается энергия. Рабочее расстояние такой системы, по утверждению авторов, может достигать нескольких сантиметров и более. К сожалению, в статьях не приводятся данные о практической реализации этого метода и не приводятся результаты моделирования работы таких устройств. Дальнейшее развитие этого направления этими авторами не велось, несмотря на его очевидную перспективность; по крайней мере, невозможно было отследить исследования в этой области. Кроме того, сами

¹ Global Qi Standard Powers Up Wireless Charging» (Electronics resource). Available at: <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-qistandard-powers-up-wireless-charging-102043348.html> ; Guidelines for Automotive Aftermarket Qi / Chargers The Wireless Power Consortium 2012 2012/10/01.

устройства, судя по чертежам, приведенным в работах, довольно сложны в изготовлении.

Новый подход к проблеме

Основная цель исследований, описанных в данной статье, – упрощение конструкции элементов беспроводной системы передачи энергии, снижение непроизводительных потерь энергии из-за ее излучения в свободное пространство и потерь в фидерах и конструктивных элементах генерирующих устройств, а также снижение вредного влияния энергии высокочастотного излучения на людей и другие биологические объекты, расположенные в непосредственной близости от системы беспроводной передачи энергии.

Предлагается использовать полосковую технологию для беспроводной передачи энергии. Представляют интерес два типа полосковых структур. Первый вид – это асимметричная или микрополосковая структура. Для этого типа структуры электромагнитное поле сосредоточено исключительно между микрополосковой линией с ее внутренней стороны и заземляющей пластиной. Второй тип включает структуру симметричных полосковых линий, в которой электромагнитное поле сосредоточено между обеими сторонами полосковой линии и обеими заземляющими пластинами. Обе конструкции имеют незначительные потери электромагнитной энергии и не излучают электромагнитную энергию в свободном пространстве.

При этом направленные ответвители с приемлемыми параметрами качества могут быть реализованы на симметричной полосковой линии; и лучший результат получается, если организовать лицевую связь между входными и выходными полосками. В любом случае в структуре возможна передача энергии только от одной полосковой линии в другую. Это свойство структуры, связанной с симметричной полосковой линией, может использоваться для беспроводной передачи энергии.

Таким образом, система передачи энергии состоит из двух симметричных идентичных частей, каждая из которых представляет собой асимметричную микрополосковую линию передачи определенной длины, закороченную или разомкнутую на одном конце и возбужденную с другого конца. Для предотвращения непроизводительных потерь энергии в конструкциях не используются согласованные нагрузки 50 Ом (или любое другое сопротивление) [6]. Структуры из полосковых линий передачи практически не излучают электромагнитную энергию в свободное пространство; это хорошо известный факт [7]. Таким образом, непроизводительные потери энергии отсутствуют.

Моделирование системы передачи энергии

Структура полосковых линий была смоделирована в среде проектирования AWR DE. Модель конструкции представлена на рис. 1.

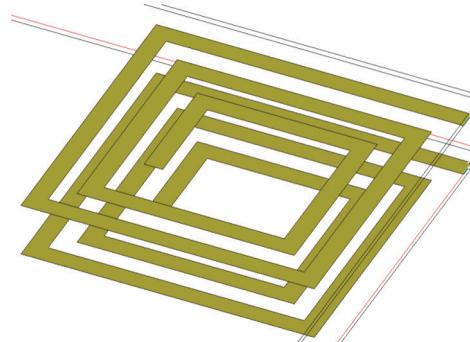


Рис. 1. Модель узла передачи энергии в AWR DE

Fig. 1. Model of a power transmission unit in AWR DE

Для экономии места обе микрополосковые линии были свернуты в спирали, причем симметрично. Микрополосковые линии были оставлены свободными с одного конца. С другого конца микрополосковые линии оканчивались портами 50 Ом (1 и 2). Первая линия возбуждалась через порт 1; анализировалась энергия на выходе второй линии, через порт 2.

Микрополосковые линии помещались на диэлектрические подложки. В качестве диэлектрического материала использовался поликарбонат, диэлектрическая проницаемость которого $\epsilon = 3,9$ и потери $\operatorname{tg}\delta = 0,005$. Толщина подложек составляла 5 мм. Расстояние между полосками в процессе моделирования изменялось от 5 мм до 30 мм.

Внутренний диэлектрик (между полосковыми линиями) представлял собой воздух с диэлектрической проницаемостью 1. Общая длина обеих полосковых линий составляла около 1,6 м, ширина полосковых линий составляла 10 мм, а их толщина составляла 35 мкм. Размер обеих заземляющих плоскостей (токопроводящих подложек) составлял 220×220 мм² толщиной 35 мкм.

Результаты моделирования электромагнитной структуры для расстояния между полосковыми линиями 10 мм показаны на рис. 2.

На этом рисунке показаны три графика: обратные потери (синие треугольники), переходное затухание (красные квадраты) и коэффициент стоячей волны напряжения, КСВН (зеленые ромбы).

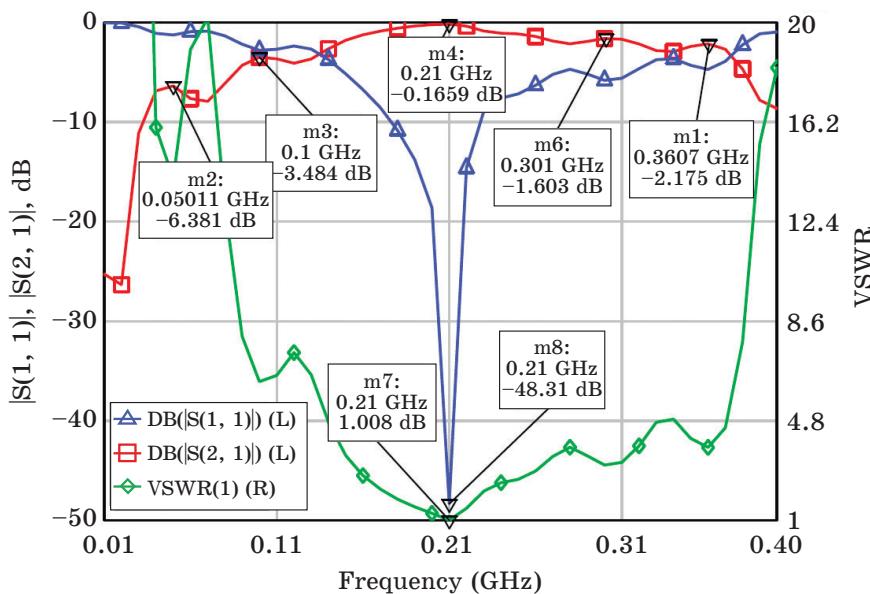


Рис. 2. Результаты моделирования в AWR DE

Fig. 2. Results of simulation in AWR DE

Очевидно, что наблюдались несколько максимумов передачи энергии в диапазоне частот. Первый максимум соответствует основной частоте (четверть длины волны в полосковой линии). Остальные максимумы соответствуют частотам, кратным основной частоте. Как видно, переходное затухание на основной частоте (50 МГц) достигает значения в $-6,4$ дБ, а на удвоенной частоте (100 МГц) затухание снижается до $-3,5$ дБ. Затухание достигает минимума $-0,17$ дБ на частоте 210 МГц (длина полосы в четыре четверти длины волны).

Очевидно, что полученные затухания нельзя квалифицировать как непродуктивные потери энергии. В наилучшей точке (210 МГц) КСВ имеет значение 1,008 (обратные потери $-48,3$ дБ). Совершенно объективно можно сказать, что эффективность передачи энергии в этом случае высока. При этом затуханием энергии на расстоянии в 10 мм можно пренебречь (в сравнении с 3 мм расстоянии для передачи энергии для стандарта Qi).

Экспериментальные исследования

Изготовлены две микрополосковые линейные структуры как фрагменты беспроводной системы передачи энергии и проведены предварительные экспериментальные исследования. Фотография структуры микрополосковой линии представлена на рис. 3. Медная полоска приклеена к поликарбонату.

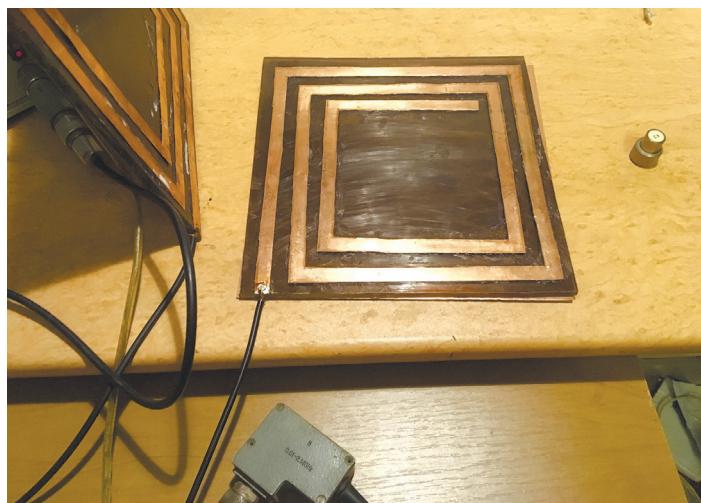


Рис. 3. Внешний вид микрополосковой структуры

Fig. 3. Appearance of the microstrip structure

Толщина полосковых линий составляла 0,3 мм (больше, чем при моделировании). В качестве заземляющего слоя использовался фольгированный двухсторонний стеклотекстолит марки FR-4 с толщиной диэлектрика в 1 мм и толщиной меди 35 мкм с обеих сторон. Электрическое соединение между медными сторонами FR-4 было емкостным (очевидно, неидеальное решение). Эта комбинированная заземляющая пластина также была приклеена к поликарбонату.

Как видно на фото, конструкция микрополосковой структуры была несовершенной, поскольку изготовление велось вручную.

Для анализа использовался измеритель КСВН и ослабления Р2-102 (производство СССР). Сначала было установлено расстояние между полосковыми линиями 10 мм, которое использовалось при моделировании. Это расстояние выдерживалось пузырчатым двухслойным полиэтиленом, каждый слой был порядка 6 мм. Диэлектрическая проницаемость этого материала была принята равной 1. Необходимое расстояние устанавливалось путем прикладывания внешней нагрузки на «сэндвич» (два мощных трансформатора на 50 Гц). При этом полиэтилен деформировался до определенной толщины.

Экспериментальная установка показана на рис. 4. С помощью металлического уголка (справа) измерялось расстояние.

Диапазон частот был установлен от 10 МГц до 400 МГц (как в моделировании). На экране измерителя показаны две кривые. Верхняя кривая – КСВН первой микрополосковой структуры (показания цифрового индикатора слева верхнего изме-

рительного блока). Нижняя кривая – коэффициент передачи энергии (показания цифрового индикатора справа верхнего измерительного блока).



Рис. 4. Внешний вид испытательного стенда

Fig. 4. Appearance of the test bench

Как видно на рис. 4, кривая передачи энергии носит колебательный характер. Затухание передаваемой энергии составило 0,22 дБ на частоте 220 МГц (маркер). Те же кривые, но с маркерами на частотах 49 МГц и 115 МГц показаны на рис. 5 (показания крайне правого цифрового индикатора нижнего измерительного блока).

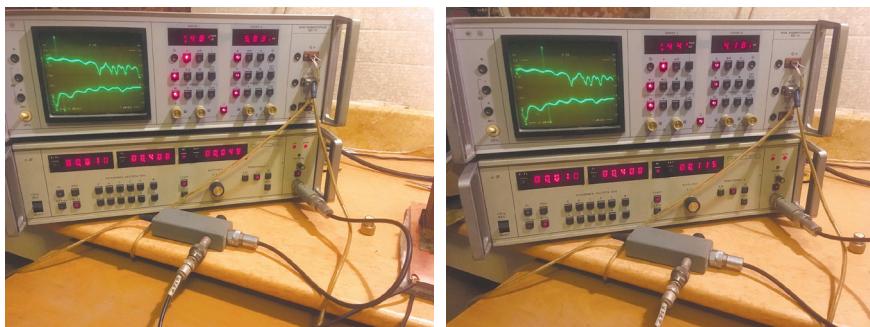


Рис. 5. Измерения на частотах 49 МГц и 115 МГц

Fig. 5. Measurements at 49 MHz and 115 MHz

Затухание при передаче энергии составило 5,93 дБ на частоте 49 МГц и 4,18 дБ на частоте 115 МГц (показания правого цифрового индикатора верхнего измерительного блока). Все полу-

ченные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами моделирования.

Далее были проведены измерения для расстояния между полосковыми структурами приблизительно 6 мм. Результаты измерений представлены на рис. 6.

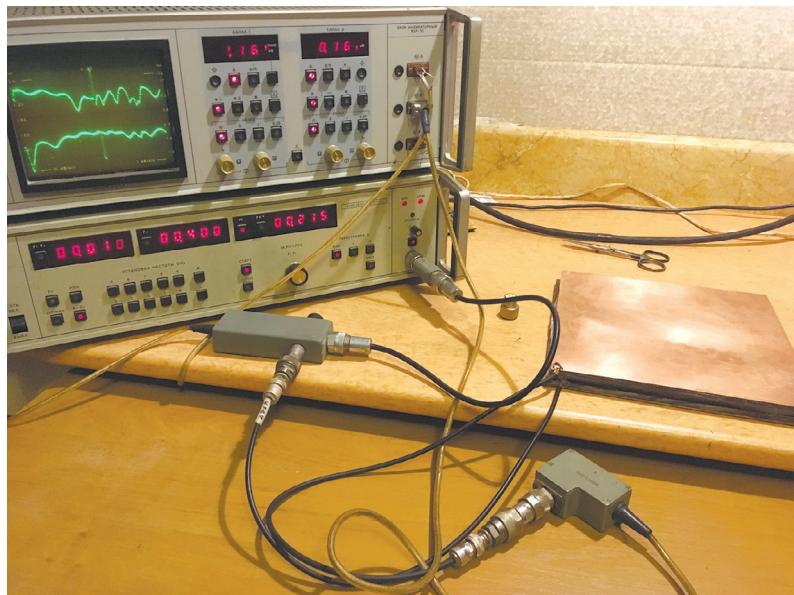


Рис. 6. Измерения при расстоянии между структурами 5 мм
Fig. 6. Measurements at a distance between structures in 5 mm

Как видно, ситуация принципиально не изменилась, и на той же рабочей частоте в 215 МГц затухание снизилось до 0,16 дБ. Другими словами, для передачи энергии не имеет значения установка расстояния между микрополосковыми структурами в пределах 5–10 мм. В любом случае затуханием при передаче энергии можно пренебречь.

Дополнительные мероприятия

Передача энергии имеет смысл, пока присутствует потребитель энергии. В других случаях (транспортное устройство удалилось, и вторая микрополосковая структура переместилась далеко) постоянное возбуждение первой микрополосковой структуры приведет к непродуктивным потерям энергии. Потери энергии за счет излучения в свободное пространство не учитываются. Для уменьшения непроизводительных потерь энергии предлагается измерять КСВН первой микрополосковой структуры и изменять режим работы высокочастотного генератора, как это показано на рис. 7 [6].

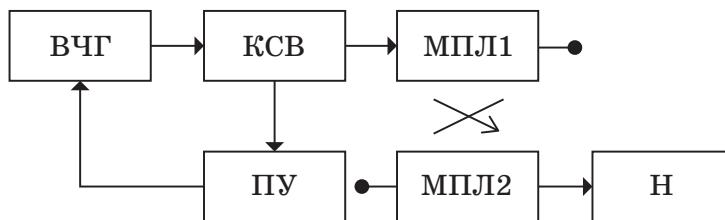


Рис. 7. Структурная схема системы передачи энергии
Fig. 7. Block diagram of the power transmission system

Система беспроводной передачи энергии состоит из высокочастотного генератора (ГВЧ), измерителя коэффициента стоячей волны напряжения (КСВ), порогового устройства (ПУ), первой микрополосковой линии (МПЛ1), второй микрополосковой линии (МПЛ2) и нагрузки (Н).

Сначала ГВЧ генерирует высокочастотные колебания малой мощности. Эти высокочастотные колебания проходят через измеритель КСВ и попадают на первый вывод МПЛ1. Второй вывод МПЛ1 оставлен свободным, что обеспечивает полное отражение от этого вывода высокочастотных колебаний, распространяющихся от его первого вывода ко второму. При этом непродуктивные потери энергии в самой МПЛ1 отсутствуют. При отсутствии МПЛ2 вся энергия высокочастотного сигнала отражается от свободного конца МПЛ1 и возвращается в ГВЧ через измеритель КСВ. На выходе измерителя КСВ формируется уровень напряжения, пропорциональный коэффициенту стоячей волны. Это напряжение сравнивается в ПУ с определенным пороговым уровнем, характеризующим пороговое значение коэффициента стоячей волны. Когда это напряжение превышает заданный пороговый уровень, ПУ формирует на своем выходе соответствующий сигнал управления, подаваемый на вход ГВЧ. При высоком значении КСВ управляющий сигнал оставляет ГВЧ в режиме генерации маломощного сигнала.

При приближении к первой МПЛ1 другой микрополосковой структуры (МПЛ2) часть высокочастотной энергии переходит от МПЛ1 к МПЛ2. При этом высокочастотные колебания распространяются в МПЛ2 от его второго вывода к первому, и энергия этих высокочастотных колебаний попадает в нагрузку Н.

Другая часть энергии, которая не прошла от МПЛ1 к МПЛ2, распространяется в МПЛ1 в направлении ее второго вывода, где высокочастотные колебания полностью отражаются и распространяются дальше от ее второго вывода к первому. Часть энергии этих колебаний также поступает в МПЛ2, где высокочастотные колебания распространяются уже от ее (МПЛ2) перв-

вого вывода ко второму. Отразившись от ее свободного второго конца, высокочастотные колебания распространяются в сторону первого конца МПЛ2 и попадают в нагрузку Н. В результате этого многократного взаимодействия происходит повышение уровня передачи энергии от МПЛ1 к МПЛ2.

На рабочей частоте системы при приближении микрополосковых структур друг к другу обратные потери снижаются. Когда они падают ниже уровня -10 дБ, что соответствует уменьшению коэффициента стоячей волны ниже 2, это значение можно принять равным пороговому. В этом случае пороговое устройство ПУ переключает ГВЧ в режим максимальной мощности, тем самым обеспечивая эффективную передачу энергии высокочастотных колебаний от ГВЧ к нагрузке.

Непроизводительные потери энергии высокочастотных колебаний в этом случае сведены к минимуму. Другой аспект повышения эффективности использования описанного подхода связан с исключением вредного воздействия высокочастотной энергии на человека и другие биологические объекты, которые находятся в непосредственной близости от системы беспроводной передачи энергии. Когда две микрополосковые линии объединяются в один направленный ответвитель на симметричных полосковых линиях с лицевой связью, излучение высокочастотной энергии в свободное пространство почти полностью отсутствует и не оказывает влияния на людей и другие биологические объекты. При удалении второй микрополосковой линии достаточно далеко вредное воздействие на биологические объекты также отсутствует. Это связано с тем, что микрополосковая линия передачи также имеет небольшое паразитное излучение энергии сигнала, распространяющееся в ней, с одной стороны. С другой – при отсутствии второй связанной микрополосковой линии передачи коэффициент стоячей волны в первой микрополосковой линии передачи становится большим. Когда этот коэффициент превышает определенное пороговое значение, уровень высокочастотных колебаний мощности, создаваемых ГВЧ, снижается до чрезвычайно малой величины, которая полностью безопасна для человека, даже если принять во внимание его полное излучение в свободное пространство. Эта низкая мощность устанавливается на уровне, необходимом и достаточном для измерения коэффициента стоячей волны в МПЛ1.

Помимо отсутствия вредного воздействия на биологические организмы, в последнем случае происходит значительная экономия энергии, так как ГВЧ в режиме малой мощности также характеризуется небольшими непродуктивными потерями.

Заключение

Таким образом, представлена система передачи энергии для беспроводной зарядки аккумуляторов БпЛА. Система состоит из двух микрополосковых структур, соединенных лицевыми сторонами. Система обеспечивает передачу энергии на разумных расстояниях между микрополосковыми структурами. Так, на расстоянии до 10 мм между полосками переходное затухание не превышает значения в 0,2 дБ. Это незначительное затухание имеет место на любом рабочем расстоянии в пределах 5–10 мм. Использование спиральных микрополосковых линий существенно уменьшает размер электромагнитных структур и открывает широкие возможности по снижению требований по взаимному расположению элементов зарядной системы.

Экономический эффект от использования предложенного подхода связан с появлением возможности эффективно с минимальными потерями передавать энергию высокочастотного сигнала генератора на нагрузку без проводов.

Конструкция устройства, реализующего данный метод беспроводной передачи энергии, предельно проста. Излучение высокочастотной энергии в свободное пространство практически полностью отсутствует и не оказывает влияния на человека и другие биологические объекты, находящиеся в непосредственной близости от системы беспроводной передачи энергии.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Севастопольского региона, проект № 20-48-920001.

Acknowledgments

The research is carried out with the financial support of the RFBR and the Sevastopol region, project № 20-48-920001.

Список литературы

1. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J. D., Fisher P., Soljačić M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. *Science*, 2007;317(5834):83–866. DOI: 10.1126/science.1143254.
2. Karalis A., Joannopoulos J. D., Soljačić M. Efficient wireless *non-radiative mid-range* energy transfer. *Annals of Physics*, 2008;323(1):34–48. DOI: 10.1016/j.aop.2007.04.017.
3. Hadley F. *Goodbye wires! MIT team experimentally demonstrates wireless power transfer, potentially useful for powering laptops, cell phones without cords.* June 7, 2007. Available at: <http://news.mit.edu/2007/wireless-0607>

4. Pchelnikov Yu. N. Features of slow waves and potential for their nontraditional application. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2003;48(4):494–507.
5. Pchelnikov Yu. N., Yelizarov A. A., Pchelnikov A. G. Wireless charging mechanism for outdoor appliance. In: *IEEE Proc. 23rd International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 9–13 September 2013*, pp. 1058–1059.
6. Широков И. Б. Способ беспроводной передачи электрической энергии высокой частоты. Патент на изобретение № 2704602 С1 Россия. МПК H02J 50/00, СПК H02J 50/20, H02J 50/90, H01Q 7/08. Опубл. 30.10.2019. Бюл. № 31.
7. Вольман В. И., Пименов Ю. В. *Техническая электродинамика*. М.: Связь; 1971. 487 с.

References

1. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J. D., Fisher P., Soljačić M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. *Science*, 2007;317(5834):83–866. DOI: 10.1126/science.1143254.
2. Karalis A., Joannopoulos J. D., Soljačić M. Efficient wireless *non-radiative mid-range* energy transfer. *Annals of Physics*, 2008;323(1):34–48. DOI: 10.1016/j.aop.2007.04.017.
3. Hadley F. *Goodbye wires! MIT team experimentally demonstrates wireless power transfer, potentially useful for powering laptops, cell phones without cords*. June 7, 2007. Available at: <http://news.mit.edu/2007/wireless-0607>
4. Pchelnikov Yu. N. Features of slow waves and potential for their nontraditional application. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2003;48(4):494–507.
5. Pchelnikov Yu. N., Yelizarov A. A., Pchelnikov A. G. Wireless charging mechanism for outdoor appliance. In: *IEEE Proc. 23rd International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 9–13 September 2013*, pp. 1058–1059.
6. Shirokov I. B. *Method for wireless transmission of high-frequency electrical energy*. Patent for invention No. 2704602 С1 Russia, IPC H02J 50/00, CPC H02J 50/20, H02J 50/90, H01Q 7/08, Publ. 30.10.2019,. Bul. No. 31.
7. Volman V. I., Pimenov Yu. V. *Technical electrodynamics*. Moscow: Communication, 1971. 487 p.

Информация об авторах

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-6425-5385, shirokov@ieee.org

Сердюк Игорь Владимирович, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация, serdyuk@ieee.org

Азаров Андрей Андреевич, аспирант Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация, azarov@ieee.org

Широкова Елена Игоревна, студентка Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация, shirokova@ieee.org

Information about the authors

Igor B. Shirokov, professor at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation; ORCID 0000-0001-6425-5385, shirokov@ieee.org

Igor V. Serdyuk, associate professor Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, serdyuk@ieee.org

Andrey A. Azarov, graduate student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, azarov@ieee.org

Elena I. Shirokova, student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, shirokova@ieee.org

Поступила / Received: 15.02.2021

Принята в печать / Accepted: 10.03.2021

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2021.5.1.002

УДК 621.3.029.6

Миниатюрный полосно-пропускающий фильтр на двойных спиральных полосковых резонаторах

Б. А. Беляев^{1, 2} , А. М. Сержантов^{1, 2}, Ан. А. Лексиков³,
Я. Ф. Бальва³, Р. Г. Галеев^{1, 4}

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий
им. М.Ф. Решетнева, Россия, 660037, г. Красноярск, ул. им. Газеты
«Красноярский рабочий»

² Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск,
Проспект Свободный, 79

³ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Россия, 660036,
г. Красноярск, Академгородок 50, строение 38

⁴ АО НПП «Радиосвязь», Россия, 660021, г. Красноярск,
ул. Декабристов 19

 belyaev@iph.krasn.ru

Аннотация

Разработана новая миниатюрная монолитная конструкция полосно-пропускающего фильтра, которая может изготавливаться по технологии многослойных печатных плат. Каждый резонатор в фильтре образован вставленными друг в друга металлическими спиральными левой и правой закрутки, у которых одна пара смежных концов замкнута на экран, а другая – свободна. Витки из полосковых проводников в форме одинаковых прямоугольных рамок выполнены на диэлектрических пластинах и располагаются в многослойной структуре строго друг под другом с чередованием витков левой и правой спиралей. Конструкция фильтра на таких многопроводниковых двусpirальных резонаторах имеет не только малые размеры, но и обладает высокой селективностью, что доказывают измеренные характеристики фильтра четвертого порядка, резонаторы которого изготовлены на пяти диэлектрических слоях из материала RO4350BTM. Центральная частота полосы пропускания фильтра $f_0 = 60$ МГц, ее относительная ширина $\Delta f / f_0 = 18\%$, при этом размеры устройства $34 \times 16.5 \times 4.3$ мм³ ($0.007\lambda_0 \times 0.003\lambda_0 \times 0.001\lambda_0$, где λ_0 – длина волны в вакууме на частоте f_0). Фильтр обладает протяженной полосой заграждения, которая по уровню -38 дБ простирается до частоты $16f_0$.

Ключевые слова

полосно-пропускающий фильтр, резонатор, диэлектрическая пластина, полосковые проводники

Для цитирования

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

© Беляев Б. А., Сержантов А. М., Лексиков Ан. А.,
Бальва Я. Ф., Галеев Р. Г., 2021

спиральных полосковых резонаторах. *Ural Radio Engineering Journal.* 2021;5(1):21–31. DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.002.

Miniaturized bandpass filter based on double spiral stripline resonators

B. A. Belyaev^{1, 2} , A. M. Serzhantov^{1, 2}, An. A. Leksikov³

Ya. F. Bal'va³, R. G. Galeev^{1, 4}

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russia

² Siberian Federal University, 79 Svobodny Pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia

³ Kirensky Institute of Physics SB RAS, Akademgorodok 50, stroenie 38, Krasnoyarsk, 660036, Russia

⁴ JSC “Radiosvyaz”, 19 Dekabristov Str., Krasnoyarsk, 660021, Russia

 belyaev@iph.krasn.ru

Abstract

A new miniature monolithic bandpass filter, which can be manufactured using multilayer standard all-PCB technology, is presented. Each resonator in the filter is formed by metal spirals of the left and right twist inserted into each other, in which one pair of adjacent ends is grounded, and the other is free. Spiral inductors have the form of identical rectangular frames and are designed on dielectric substrates, located on a multilayer structure strictly under each other with alternating turns of the left and right spirals. The design of the filter based on such multilayer double-spiral resonators is both small in size, and highly selective, which is proved by the measured characteristics of the fourth order filter fabricated at seven dielectric layers of RO4350B material. The filter has the central frequency of the passband $f_0 = 60$ MHz, and the fractional bandwidth $\Delta f / f_0 = 18\%$, while the size of the device is of the device are only $34 \times 16.5 \times 4.3$ mm³ ($0.007\lambda_0 \times 0.003\lambda_0 \times 0.001\lambda_0$, where λ_0 is the wavelength at the center frequency f_0). The filter has a wide stopband, which extends up to the frequency of $16f_0$ at a level of -38 dB.

Keywords

bandpass filter, resonator, dielectric plate, stripline resonators

For citation

Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Leksikov An. A., Bal'va Ya. F., Galeev R. G. Miniaturized bandpass filter based on double spiral stripline resonators. *Ural Radio Engineering Journal.* 2021;5(1):21–31. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.002.

Миниатюризация частотно-селективных сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств и, в частности, фильтров является важной и всегда актуальной задачей радиотехники. При этом развитие современных систем связи, радиолокации, радионавигации,

специальной и измерительной радиоаппаратуры требует уменьшения габаритов и одновременного улучшения электрических характеристик таких устройств, а также высокую технологичность их изготовления и низкую стоимость при массовом производстве. В значительной степени всем этим требованиям отвечают микрополосковые и полосковые конструкции [1–3], поэтому они находят очень широкое применение в СВЧ-технике. Отметим, что в дециметровом, и особенно в метровом, диапазонах длин волн проблема миниатюризации фильтров по своей важности нередко ставится на первое место. Однако при разрешении этой проблемы исследователи сталкиваются с большими трудностями, связанными с существенным ухудшением характеристик фильтров.

Традиционно проблема миниатюризации полосковых конструкций решается различным сворачиванием проводников, например в форму шпильки [4; 5], спирали или меандра [6–8], а также созданием квазисредоточенных элементов [9; 10]. При этом практически все названные способы миниатюризации хотя и приводят к уменьшению размеров устройств, но сопровождаются снижением собственной добротности резонаторов, что соответственно ухудшает частотно-селективные свойства фильтров. Рекордно высокую собственную добротность полосковые и микрополосковые резонаторы имеют, если их проводники изготовлены из пленок высокотемпературных сверхпроводящих материалов [11], но большая стоимость и необходимость использования криогенных температур ограничивает их широкое применение. К наилучшим полосковым и микрополосковым резонаторам по совокупности таких характеристик, как миниатюрность, величина собственной добротности и технологичность, в производстве можно отнести многопроводниковые конструкции [12–14]. Однако на частотах метрового диапазона длин волн фильтры даже на таких резонаторах имеют неприемлемо большие размеры, в сравнении, например, с фильтрами на сосредоточенных элементах. В настоящей работе исследована новая конструкция полоскового многопроводникового двусpirального резонатора, отличающаяся существенно меньшими размерами по сравнению со всеми известными миниатюрными полосковыми и микрополосковыми конструкциями.

Исследуемый резонатор состоит из двух спиралей левой и правой закрутки, вставленных друг в друга (рис. 1). Витки спиралей образованы полосковыми проводниками с фиксированной шириной 1 мм, сформированными на поверхностях пяти диэлектрических пластин толщиной h , которые не показаны,

чтобы не загромождать рисунок. Спирали имеют по три витка в виде одинаковых прямоугольных рамок с размерами окна w и W , при этом рамки в конструкции резонатора располагаются строго друг под другом с чередованием витков левой и правой спиралей. Для этого используются соединения соответствующих витков в каждой спирали посредством металлизированных отверстий в диэлектрических пластинах. Одна пара смежных концов спиралей соединена с экраном, другая – свободна. Эта пятислойная структура размещается между двумя дополнительными диэлектрическими слоями толщиной H (на рисунке не показаны), наружные поверхности которых металлизированы и играют роль экранов.

Благодаря взаимному расположению витков многослойных спиралей в рассматриваемой конструкции резонатора, на его нижайшей mode колебаний напряжения на разомкнутых концах проводников противоположны по знаку, а токи имеют одинаковый знак во всех проводниках спиралей, то есть текут в одном направлении. Очевидно, что эквивалентную схему такого резонатора можно представить в виде колебательного контура, емкость которого подключена к двум взаимодействующим индуктивностям, противоположные концы которых соединены с экраном. Очевидно также, что величина индуктивностей спиралей, существенно увеличенная за счет взаимоиндукции, не только сильно понизит резонансную частоту контура, но и повысит его собственную добротность, как это имеет место в многопроводниковом резонаторе другой конструкции [15].

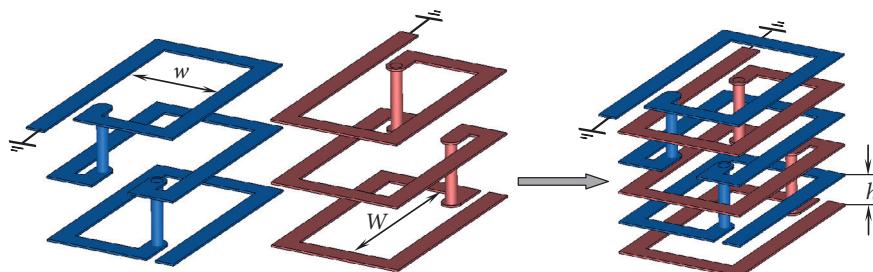


Рис. 1. Конструкция двусpirального полоскового резонатора

Fig. 1. Double spiral stripline resonator structure

Исследование влияния основных конструктивных параметров резонатора на резонансную частоту его первой моды колебаний f_1 , на собственную добротность резонанса Q_1 и на отношение резонансных частот второй моды колебаний к первой f_2 / f_1 , которое, как известно, определяет протяженность поло-

сы заграждения фильтра, проводилось численным электродинамическим анализом 3D-модели рассматриваемой конструкции. На рис. 2 представлены зависимости частот первой моды колебаний двусpirального резонатора (сплошные линии) и отношений f_2 / f_1 (штриховые линии), построенные от толщины диэлектрических слоев h (при фиксированном суммарном количестве витков в двух спиральях $N = 6$) и от количества витков в двух спиральях N (при фиксированном $h = 0.102$ мм). Зависимости рассчитывались для полосковых структур, закрытых сверху и снизу диэлектрическими слоями толщиной $H = 1.524$ мм, металлизированными снаружи. В конструкции резонатора все диэлектрические слои из материала RO4350BTM с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3.66$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta = 0.0037$. В многослойных спиральях размеры окна плоских витков в форме прямоугольных рамок (см. рис. 1) $W = 12.0$ мм и $w = 5.2$ мм, а образующие их медные полосковые проводники толщиной 18 мкм имели ширину 1 мм.

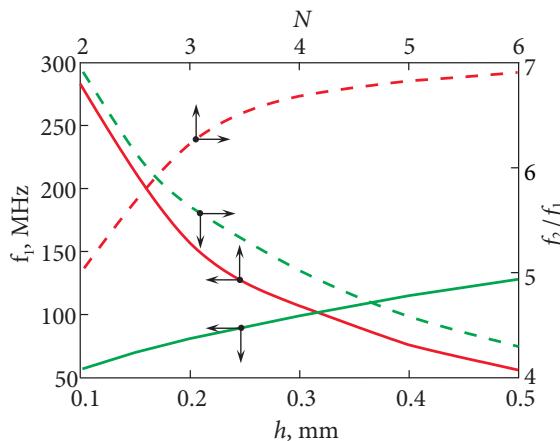


Рис. 2. Зависимости частоты первой моды колебаний f_1 (сплошные линии) и отношения f_2 / f_1 (штриховые линии) от толщины диэлектрических слоев h при суммарном количестве витков в спиральях $N = 6$ и от N при $h = 0.102$ мм

Fig. 2. Frequency dependences of the first oscillation mode f_1 (solid lines) and the f_2 / f_1 ratio (dashed lines) versus the thickness of the dielectric layers h for the total number of spiral turns $N = 6$ and versus N for $h = 0.102$ mm

Исследования показали, что с уменьшением толщины слоев и с увеличением количества витков в спиральях частота нижайшей (рабочей) моды колебаний резонатора f_1 быстро уменьшается. Очевидно, что при фиксированной резонансной частоте эти действия приведут к значительному уменьшению размеров конструкции.

структурки. На рис. 2 видно, что при толщине слоев $h = 0.102$ мм с увеличением количества витков в спиралах с двух до шести частота f_1 уменьшается в ~5.7 раза, а отношение f_2 / f_1 увеличивается с 5 до 6.9. Видно также, что с уменьшением h в пределах 0.5–0.1 мм частота f_1 для резонатора с суммарным количеством витков $N = 6$ монотонно падает от 130 почти до 50 МГц, а отношение f_2 / f_1 растет с 4.1 до 6.9. Однако важно отметить, что зависимость $f_2 / f_1(N)$ быстро выходит на насыщение, поэтому в полосно-пропускающем фильтре на двусpirальных резонаторах увеличение количества витков в спиралах свыше 6 не приведет к заметному расширению высокочастотной полосы заграждения.

Исследования собственной добротности Q_1 от толщины диэлектрических слоев h и отношения сторон прямоугольной спирали W/w (см. рис. 1) проводились на фиксированной частоте $f_1 = 60$ МГц двусpirального резонатора с $N = 6$. При этом для каждого значений h , изменяющихся в пределах 0.5–0.1 мм, и отношений W/w , изменяющихся в пределах 1–3, частота f_1 настраивалась пропорциональным изменением размеров w и W . Обнаружено, что варьирование конструктивных параметров в указанных пределах не приводит заметному изменению собственной добротности резонатора $Q_1 \approx 100$. Заметим, что на частоте 60 МГц толщина металлизации (18 мкм) сравнима с толщиной скин-слоя, поэтому основные потери в резонаторе обусловлены исключительно омическими потерями. Заметим, что при размерах окна плоских витков $W = 12.0$ мм и $w = 5.2$ мм габариты резонатора очень малы: $15.5 \times 7.2 \times 4.3$ мм³, то есть наибольший размер конструкции в 320 раз меньше длины волны в вакууме на частоте резонанса.

Как известно, относительная ширина полосы пропускания фильтра определяется величиной коэффициентов связи его резонаторов, которая зависит от расстояния между ними. При разработке миниатюрных конструкций фильтров целесообразно использовать такое взаимное расположение резонаторов, которое обеспечит минимальное расстояние между ним при заданной ширине полосы пропускания. На рис. 3 представлены зависимости коэффициентов связи от расстояния S между парами двусpirальных резонаторов с $N = 6$, построенные для трех вариантов их взаимного расположения. Конструктивные параметры резонаторов были следующими: $h = 0.102$ мм, $H = 1.524$ мм, $W = 12.0$ мм и $w = 5.2$ мм. Величина коэффициента связи резонаторов находилась непосредственно из частотной зависимости коэффициента передачи взаимодействующих резонаторов при их слабой связи с внешними линиями передачи, как, на-

пример, в работе [2]. Представленные зависимости показывают, что наименьший зазор для любой фиксированной величины коэффициента связи резонаторов обеспечивает третий вариант их взаимного расположения, а наибольший зазор – первый вариант. Отметим, что невозможно реализовать фильтр высокого порядка, используя только один вариант взаимной ориентации резонаторов.

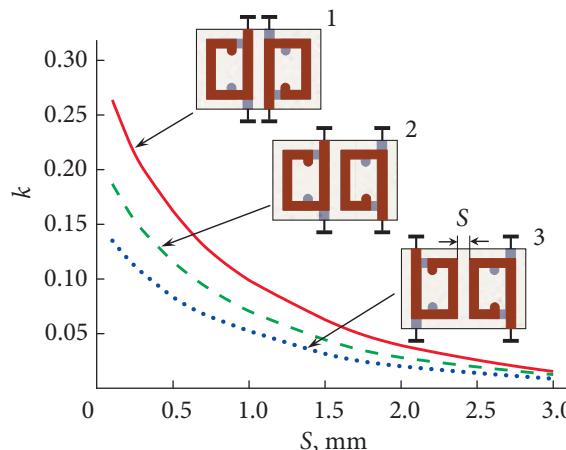


Рис. 3. Зависимости коэффициентов связи для трех пар двусpirальных резонаторов различной конфигурации от расстояния между ними

Fig. 3. Dependences of the coupling coefficients for three pairs of double-spiral resonators of different configurations on the distance between them

Экспериментальная проверка работоспособности предложенной конструкции резонатора проводилась на полосно-пропускающем фильтре четвертого порядка с волновым сопротивлением портов 50 Ом. Для определенности центральная частота полосы пропускания фильтра задана $f_0 = 60$ МГц, а ее относительная ширина по уровню -3 dB $\Delta f / f_0 = 18\%$. Конструктивные параметры резонаторов в фильтре указаны выше, но в нем для соединения диэлектрических слоев добавлены слои препрега RO4450TTM толщиной 91 мкм ($\epsilon_r = 3.52$, $\tg\delta = 0.0041$). Величина зазоров S между резонаторами находилась параметрическим синтезом конструкции фильтра с использованием численного электродинамического анализа его 3D-модели (рис. 4). Для уменьшения размеров фильтра конфигурация крайних пар резонаторов выбрана по варианту 2 (см. рис. 3), а средней пары – по варианту 3. Синтез определил величину зазоров между крайними резонаторами 0.70 мм, а между средними 0.65 мм.

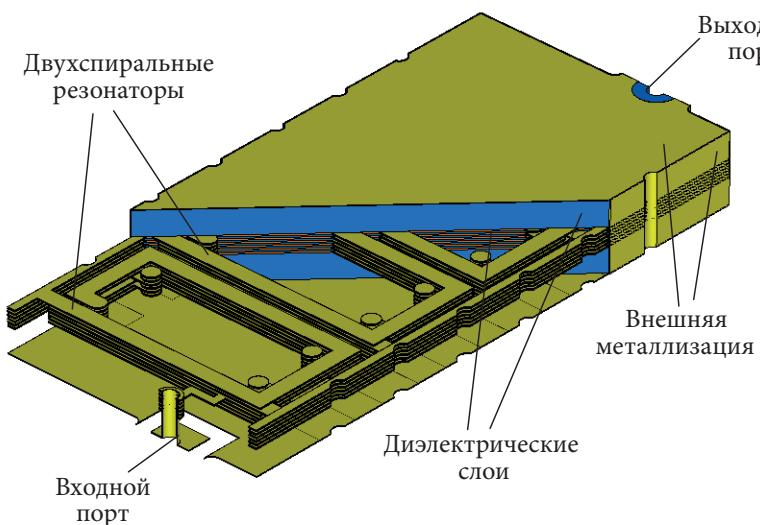


Рис. 4. Конструкция фильтра четвертого порядка в монолитном исполнении

Fig. 4. Monolithic 4-pole filter design

Синтезированный фильтр был изготовлен по технологии многослойных печатных плат с применением фотолитографии. Размеры фильтра составляют $34 \times 16.5 \times 4.3$ мм³ или в длинах волн λ_0 в вакууме на центральной частоте полосы пропускания $0.007\lambda_0 \times 0.003\lambda_0 \times 0.001\lambda_0$, масса фильтра – всего 5.0 г. Измеренные частотные зависимости прямых $S_{21}(f)$ и обратных $S_{11}(f)$ потерь экспериментального образца фильтра показаны точками на рис. 5а, сплошной линией показаны расчетные зависимости. Фотографии фильтра (вид снизу и вид сверху) представлены на рис. 5б. Видно, что рассчитанные частотные зависимости прямых $S_{21}(f)$ и обратных потерь $S_{11}(f)$ достаточно хорошо совпадают с измеренными. Фильтр имеет центральную частоту полосы пропускания $f_0 = 60$ МГц при относительной ширине полосы пропускания по уровню -3 дБ $\Delta f / f_0 = 18\%$. Измеренное минимальное вносимое затухание в полосе пропускания фильтра составило 2.9 дБ при максимальном уровне отражений в ней -15 дБ. Следует отметить, что вносимое затухание в полосе пропускания фильтра можно существенно уменьшить, если увеличить толщину проводников до нескольких толщин скин-слоя на центральной частоте и использовать диэлектрики с меньшим значением диэлектрических потерь. Важным достоинством исследованного фильтра является протяженная высокочастотная полоса заграждения, верхний край которой по уровню -38 дБ простирается до частоты $16 f_0$.

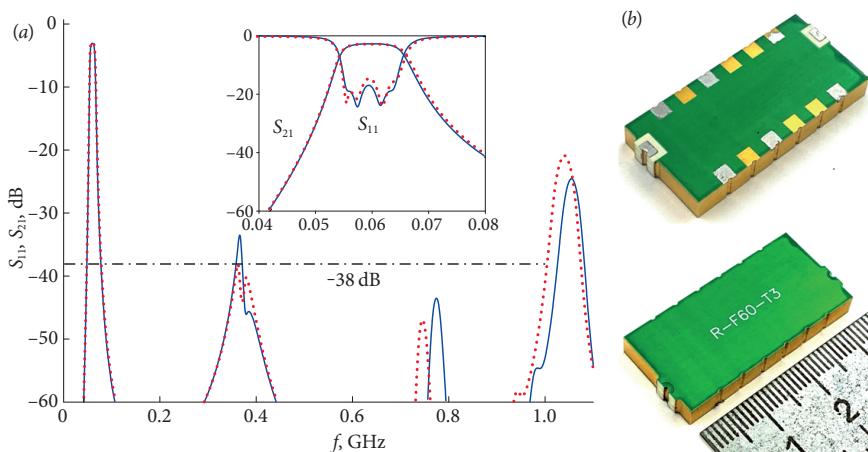


Рис. 5. Рассчитанные (сплошная линия) и измеренные (точки) АЧХ макета фильтра (а), а также фотография изготовленного фильтра (б)

Fig. 5. Calculated (solid line) and measured frequency response (dotted line) of the filter (a), as well as a photograph of the manufactured filter (b)

Таким образом, в работе исследован миниатюрный полосковый полосно-пропускающий фильтр в монолитном исполнении, изготовленный по технологии многослойных печатных плат. Миниатюрность и высокие частотно-селективные свойства фильтра обусловлены использованием в нем новой конструкции многослойного полоскового двусpirального резонатора, который на частоте первой моды колебаний $f_1 = 60$ МГц имеет длину в 320 раз меньше длины волны в вакууме. Разработанная конструкция обеспечивает не только хорошие массогабаритные показатели, высокие частотно-селективные свойства, к которым прежде всего следует отнести протяженную полосу заграждения, но и как показали измерения серии из 10 опытных образцов отличную повторяемость характеристик таких устройств при тиражировании.

Благодарности

Финансирование работы: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России по госзаданию № FEFE-2020-0013 «Развитие теории самоконфигурирующихся алгоритмов машинного обучения для моделирования и прогнозирования характеристик компонентов сложных систем».

Acknowledgments

This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, state assignment no. FEFE-2020-0013 “Development of the Theory of Self-Configurable Machine-Learning Algorithms for Simulating and Predicting Characteristics of Complex Systems.”

Список литературы / References

1. Morgan M. A. *Reflectionless Filters*. Boston, London: Artech House Microwave Library; 2017. 277 p.
2. Lei Zhu, Sheng Sun, Rui Li. *Microwave Bandpass Filters for Wideband Communications*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken; 2012. 221 p.
3. Hong J.S., Lancaster M.J. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. N.Y., Chichester; Wein heim; Brisbane; Singapore; Toronto: Wiley; 2001.
4. Belyaev B. A., Voloshin A. S., Morozov N. V., Galeev R. G. Broadband Microstrip Antenna with a Hairpin Bandpass Filter. *Technical Physics Letters*. 2015;41(3):238–241. DOI: 10.1134/S1063785015030025.
5. Leksikov A. A., Serzhantov A. M., Govorun I. V., Afonin A. O., Ugryumov A. V., Leksikov A. A. Miniaturized Suspended-Substrate Two-Conductors Resonator and a Filter on its Base. *Progress in Electromagnetics Research M*. 2019;84:127–135. DOI: 10.2528/pierm19060604.
6. Gye-An Lee, M. A. Megahed F. De Flaviis. Low-cost compact spiral inductor resonator filters for system-in-a-package. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 2005;28(4):761–771. DOI: 10.1109/tadvp.2005.850504.
7. Maric A. M., Radosavljevic G. J., Smetana W., Zivanov L. D. Comparison of LTCC inductors on different substrate configurations with PCB inductor. *Microelectronics International*. 2013;31(1):32–41. DOI: 10.1108/mi-04-2013-0017.
8. Belyaev B. A., Khodenkov S. A., Galeev R. G., Shabanov V. F. Investigation of Microstrip Structures of Wideband Bandpass Filters. *Doklady Physics*. 2015;60(3):95–101. DOI: 10.1134/s1028335815030015.
9. Menzel W., Balalem A. Quasi-Lumped Suspended Stripline Filters and Diplexers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2005;53(10):3230–3237. DOI: 10.1109/tmtt.2005.855139.
10. Belyaev B. A., Leksikov A. A., Serzhantov A. M., Tyurnev V. V. Highly Selective Suspended Stipline Dual-Mode Filter. *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2011;25:57–66. DOI: 10.2528/pierl11053001.
11. Sitnikova M. F., Vendik I. B., Vendik O. G., Kholodnyak D. V., Tural'chuk P. A., Kolmakova I. V., Belyavskii P. Yu., Semenov A. A. Modeling and experimental investigation of microstrip resonators and filters based on High-Temperature Superconductor films. *Technical Physics Letters*. 2010;36(9):862–864. DOI: 10.1134/s1063785010090257.
12. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Leksikov A. A., Bal'va Y. F., Leksikov An. A. Multilayred multiconductor stripline resonator and its application to bandpass filter with wide stopband. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2017;59(9):2212–2216. DOI: 10.1002/mop.30706.
13. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Bal'va Ya. F., Leksikov A. A., Galeev R. G. A New Design of a Miniature Microstrip Resonator with Interdigital Structure. *Technical Physics Letters*. 2014;40(11):1010–1013. DOI: 10.1134/s1063785014110194.

14. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Tyurnev V. V., Bal'va Y. F., Leksikov A. A. Planar Bandpass Filter with 100-dB Suppression Up to Tenfold Passband Frequency. *Progress in Electromagnetics Research C*. 2014;48:37–44. DOI: 10.2528/pierc14013003.
15. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Leksikov A. A., Bal'va Y. F., Leksikov An. A. High-Quality Compact Interdigital Microstrip Resonator and Its Application to Bandpass Filter. *Progress in Electromagnetics Research C*. 2017;72:91–103. DOI: 10.2528/pierc16101303.

Информация об авторах

Беляев Борис Афанасьевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель России, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева; Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.

Сержантов Алексей Михайлович, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева; Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.

Лексиков Андрей Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, Россия.

Бальва Ярослав Федорович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, Россия.

Галеев Ринат Гайсеевич, доктор технических наук, генеральный директор АО «НПП «Радиосвязь»; Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия.

Information about the authors

Boris A. Belyaev, Doctor of Technical Science, Professor, Honored Inventor of Russia, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Alexey M. Serzhantov, Doctor of Technical Science, Associate Professor, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Andrey A. Leksikov, Candidate of Technical Science, Senior Researcher, Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia.

Yaroslav F. Bal'va, Candidate of Physical and Mathematical Science, Researcher, Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia.

Rinat G. Galeev, Doctor of Technical Science, General Director of JSC “Radiosvyaz”, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia.

Поступила / Received: 01.03.2021

Принята в печать / Accepted: 18.03.2021

Применение аэрологического радиолокатора для определения профиля ветра в приземной атмосфере

И. В. Букрин, А. В. Гусев , С. И. Кудинов, В. Э. Иванов,
О. В. Плохих, С. Н. Шабунин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

 a.v.gusev@urfu.ru

Аннотация

В настоящее время для обеспечения оперативных прогнозов погоды и климата широко используются радиолокационные и радионавигационные системы аэрологического зондирования атмосферы с помощью запускаемых в атмосферу аэрологических радиозондов. Для получения оперативных данных о свободной атмосфере разработаны и эксплуатируются метеорологические радиолокационные системы различного назначения, обеспечивающие измерение метеорологических параметров неконтактными методами. Одним из важнейших метеорологических параметров, является вертикальный профиль ветра. Для определения распределения направления и скорости ветра по высоте созданы специализированные радиолокаторы, позволяющие измерять динамические параметры ветра в реальном масштабе времени. В статье рассматривается возможность создания радиолокатора параметров ветра приземной атмосферы на основе модернизации серийного отечественного аэрологического радиолокатора. Технические характеристики радиолокатора – импульсная мощность передающего устройства, чувствительность приемного устройства, возможность точного управления диаграммой направленности антенны по угловым координатам позволяют принципиально обеспечить измерение ветра в приземном слое атмосферы. Основные вопросы модернизации связаны с необходимостью реализации когерентного режима работы приемопередающей системы радиолокатора и обеспечение когерентного накопления энергии отраженного сигнала в течение интервала статистической устойчивости атмосферы. Информация о ветре на измеряемой высоте оценивается по доплеровскому спектру отраженного сигнала от метеорологических неоднородностей. Возможность точного наведения антенны в течение сеанса зондирования позволяет определять вертикальный профиль ветра в диапазоне высот даже в условиях ясного неба.

Ключевые слова

радиолокатор, зондирование атмосферы, метеорологические параметры атмосферы, профиль ветра, когерентное накопление, зондирую-

щие радиоимпульсы, фазовый шум, спектр доплеровского сигнала, коэффициент шума приемника

Для цитирования

Букрин И. В., Гусев А. В., Кудинов С. И., Иванов В. Э., Плохих О. В., Шабунин С. Н. Применение аэрометеорологического радиолокатора для определения профиля ветра в приземной атмосфере. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):32–48. DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.003.

Application of aerological radar to determine the wind profile in the lower troposphere

I. V. Bukrin, A. V. Gusev , S. I. Kudinov, V. E. Ivanov, O. V. Plokikh, S. N. Shabunin

Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

 a.v.gusev@urfu.ru

Abstract

Currently, radar and radionavigation systems for aerological sounding of the atmosphere with the help of aerological radiosondes launched into the atmosphere are widely used to provide operational weather and climate forecasts. Meteorological radar systems for various purposes have been developed to obtain operational data on the free atmosphere. The systems are operated, providing measurement of meteorological parameters by non-contact methods. One of the most important meteorological parameters is the vertical wind profile. Specialized radars have been created to determine the distribution of wind direction and speed by altitude. They allow measuring the dynamic parameters of the wind in real time. The article considers the possibility of creating a radar for the wind parameters measuring the lower troposphere based on the modernization of a serial domestic aerological radar. Technical characteristics of the radar such as the pulse transmitting power, the sensitivity of the receiver, the ability to control the antenna radiation pattern accurately by angular coordinates make it possible to provide fundamental wind measurement in the lower troposphere. The main issues of modernization are related to the need of implementation of the coherent operation mode into the radar receiver and transmitter and ensuring the coherent energy storage of the reflected signal during the interval of statistical stability of the atmosphere. The information about the wind at the measured altitude is estimated from the Doppler spectrum of the signal reflected from meteorological inhomogeneities. The ability to accurately point the antenna during the sounding session allows determination of the vertical wind profile in the altitude range, even in clear sky conditions.

Keywords

radar; atmospheric sounding; meteorological parameters of the atmosphere; wind profile; coherent accumulation; probing radio pulses; phase noise; Doppler signal spectrum, receiver noise coefficient

For citation

Bukrin I.V., Gusev A.V., Kudinov S.I., Ivanov V.E., Plokhikh O.V., Shabunin S. N. Application of aerological radar to determine the wind profile in the lower troposphere. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):32–48. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.003.

Введение

Оперативные и надежные данные о метеорологических параметрах атмосферы необходимы для нормального функционирования многих отраслей народного хозяйства. Одной из важнейших характеристик атмосферы является ветер, сложный по структуре, динамичный, изменяющий пространственные параметры в большом масштабе за короткий интервал времени. В настоящее время в радиолокационной метеорологии сформировалось направление, связанное с разработкой методов и средств дистанционного измерения вертикального профиля ветра в атмосфере путем определения доплеровского смещения частоты отраженного сигнала от метеорологических неоднородностей. Основным техническим средством этого направления являются специализированные радиолокаторы профиля ветра (РПВ), в зарубежной литературе называемые профайлерами [1–4]. Одним из главных преимуществ приборов для профилирования ветра перед другими системами измерения ветра является их способность осуществлять непрерывный мониторинг поля ветра в автоматизированном режиме. Кроме того, они также могут использоваться для обнаружения осадков, измерения основных параметров движений в вертикальном направлении, оценки интенсивности турбулентности и устойчивости атмосферы. РПВ также могут предоставлять подробную информацию о вертикальном профиле виртуальной температуры атмосферы за счет совместной работы с системами радиоакустического зондирования (РАСС) [5]. В СССР были созданы опытные образцы профайлеров, работающие в различных диапазонах частот [3]. В настоящее время в РФ разработан и находится в эксплуатации РПВ миллиметрового диапазона волн, а также имеется сеть доплеровских метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С, работающих в сантиметровом диапазоне длин волн [4; 6]. Однако в ясную погоду высота зондирования этих РЛС не превышает 2–3 км из-за того, что на малой длине волн отражения от турбулентных неоднородностей на больших высотах по уровню оказываются весьма незначительны. Поэтому для увеличения высоты зондирования, в соответствии с условием рассеяния Брегга [2], необходимо использовать более длинные волны. На аэрологической сети Росгидромета РФ и МО РФ для зондирования атмосферы с помощью радиозондов широко используются аэроло-

гические радиолокаторы, работающие в дециметровом диапазоне волн, которые при соответствующей модернизации принципиально могут быть использованы для определения параметров приземного ветра без запуска радиозондов. Насколько возможным будет использование диапазона частот 1680 ± 10 МГц для регистрации очень слабых отраженных сигналов зависит от электромагнитной обстановки в точке измерений, поскольку большое значение при проектировании ветровых профайлеров играет уровень помех в рабочем диапазоне частот. В статье обсуждается возможность создания модернизированной аэрологической РЛС, работающей в режиме РПВ.

Механизм формирования и оценка уровня отраженных сигналов от метеорологических неоднородностей

Динамические процессы, связанные с переносом водяного пара, пылевых облаков и осадков, формирования мощных теплообменных процессов в атмосфере имеют сложный турбулентный характер движений. Важнейшей технической проблемой для измерения профиля ветра в любых погодных условиях является необходимость обеспечения РЛС регистрации отраженных сигналов не только от крупных неоднородностей – осадков, облаков, аэрозолей, но и в ясную погоду от флуктуаций диэлектрической проницаемости атмосферы, связанных с турбулентными неоднородностями и несущими информацию об истинном ветре. Известно, что такого вида рассеяние наиболее интенсивно формируется на периодических неоднородностях, имеющих масштаб равный половине длины зондирующего излучения (рассеяние Брэгга). Физика формирования метеорологических неоднородностей такова, что их эффективный размер увеличивается с высотой исследуемого пространства. С увеличением высоты внутренний масштаб турбулентности, определяемый минимальными размерами турбулентных вихрей, увеличивается, поэтому, чем выше требуется высота зондирования, тем большую длину волны должен иметь зондирующий сигнал радиолокатора. В работе [7] приводятся рекомендуемые значения длин волн зондирующего сигнала, которые должны быть использованы для максимизации Брэгговского отражения на различных высотах, см. табл. 1.

Таблица 1. Рекомендуемые длины волн зондирования атмосферы в условиях отражений от ясного неба

Table 1. Recommended wavelengths for sensing the atmosphere under conditions of reflections from a clear sky

H , км	1	5	10	20	25	30
λ_{\min} , см	5	10	15	25	50	100

Рабочая длина волны, рассматриваемой аэрометеорологической РЛС, составляет $\lambda = 17,9$ см, следовательно, масштаб метеорологических неоднородностей должен составлять около 9 см. Необходимо отметить, что в мировой практике наибольшее применение получили профайлеры, работающие в диапазоне 900–1300 МГц [1]. Однако выделение такой же полосы частот в РФ не представляется возможным.

На рис. 1 приведена схема формирования отраженного сигнала от метеорологических неоднородностей. Приведены следующие параметры для описания характеристик отраженного сигнала: x, y, z – пространственные координаты; ε, β – угол места и азимут исследуемого объема пространства; R, H – наклонная дальность и высота отражающего объема; $\Delta R, d$ – длина и диаметр отражающего объема, соответственно. Пунктирными линиями показаны статистические центры метеорологических отражателей в направлении пеленга и диаметра исследуемого объема. Затемненная область рисунка показывает вертикальную плоскость визирования отражающего объема метеорологических неоднородностей.

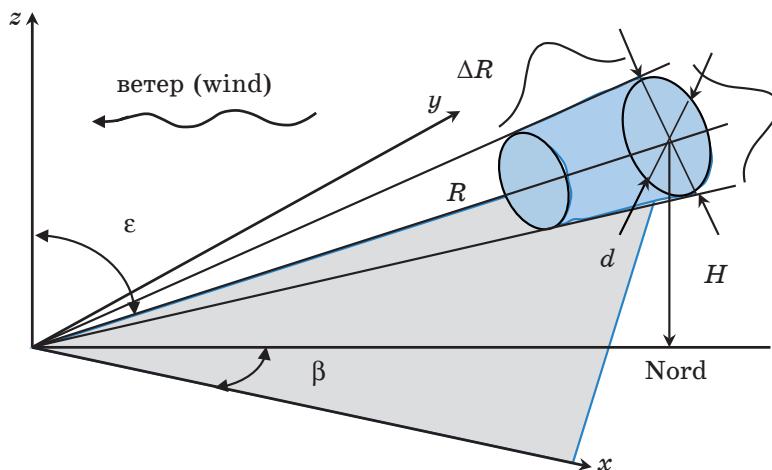


Рис. 1. Схема формирования отраженного сигнала от объема метеорологических неоднородностей

Fig. 1. Scheme of formation of the signal reflected from the volume of meteorological inhomogeneities

В классической радиолокации отражающие свойства одиночной цели оцениваются с помощью параметра σ – эффективной площади рассеяния (ЭПР), имеющей размерность м^2 . В радиолокационной метеорологии отраженный сигнал формируется от атмосферных неоднородностей, представляющих собой цели, распределенные в объеме зондирования V , [м^3], рис. 1 [2; 7]. Для

оценки отражающих свойств таких целей используют удельную радиолокационную отражаемость единицы объема – η :

$$\eta = \frac{\sigma}{V}. \quad (1)$$

Для оценки уровня отражений от метеорологических неоднородностей разной физической природы (дождь, снег, облака и т.д.) используется величина радиолокационной отражаемости Z , [мм⁶/м³]. С целью определения уровня минимальных отражений от ясного неба (ОЯН) вводится структурная характеристика флюктуаций коэффициента преломления воздуха C_n^2 , м^{-2/3}. Физически ОЯН определяются неоднородностями показателя преломления воздуха, связанными с турбулентностью атмосферы. Они могут быть оценены параметрами η и C_n^2 :

$$\eta_1 = 0,38C_n^2\lambda^{-1/3}, \text{ м}^{-1} \quad (2)$$

В зависимости от метеоусловий радиолокационная отражаемость, связанная с турбулентными неоднородностями, изменяется в значительных пределах от сильного уровня $C_n^2 = 10^{-14}$ до слабого $C_n^2 = 10^{-16}$, м^{-2/3}. Для проведения оценочных расчетов в работе [3] предложено эмпирическое соотношение, моделирующее величину C_n^2 как функцию от высоты исследуемого объема:

$$C_n^2 = 10^{-(15,5 + 0,2H)}. \quad (3)$$

Опыт эксплуатации профайлеров показывает, что при использовании частоты излучения в диапазоне 1680 ± 10 МГц в условиях слабой турбулентности $C_n^2 = 10^{-16}$, м^{-2/3} и практически достижимых технических параметрах РЛС максимальная высота зондирования может составить до 4–5 км. С увеличением интенсивности турбулентности до средних и высоких значений $C_n^2 = 10^{-14} - 10^{-15}$, м^{-2/3}, высота эффективного зондирования может повышаться до верхней границы тропосферы.

Особенности формирования и обработки отраженных сигналов

Основное уравнение, определяющее зависимость мощности принятого отраженного сигнала $P_{\text{опт}}(R)$ от основных технических параметров радиолокационной системы и свойств отражающего метеорологического объекта, имеет вид [7]:

$$P_{\text{опт}}(R) = GL_{\Sigma}P_3R^{-2}\eta \exp\left(-\int_0^R \alpha(R)dR\right), \quad (4)$$

где P_3 – мощность зондирующего сигнала; G – коэффициент усиления антенной системы; L_{Σ} – потери сигнала, связанные с распространением в СВЧ тракте РЛС; R – расстояние от РЛС

до рассеивающего объема; η – удельная радиолокационная отражаемость; $\alpha(R)$ – затухание сигнала в атмосфере.

Необходимо подчеркнуть, что показатель радиолокационной отражаемости η зависит от параметра C_n^2 (3) и степени заполнения рассеивающего объема метеорологическими отражателями, и при изменении их заполнения может существенно корректироваться.

Параметры горизонтального ветра определяются скоростью движения отражающего объема $V_r(x, y, H, t)$ и направлением $\beta_0(x, y, H, t)$ на высоте H . Величина доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала F_D , в направлении зондирования и длина волны зондирующего сигнала связана с параметрами отражающего объема воздушного потока на высоте H соотношением [7]:

$$F_D = \frac{2}{\lambda} \left\{ V_r(x, y, H, t) \cos[\beta_3 - \beta_0(x, y, H, t)] \cos \varepsilon_3 \pm V_b(x, y, H, t) \sin \varepsilon_3 \right\}, \quad (4)$$

где V_r – горизонтальная составляющая ветра; V_b – вертикальная составляющая скорости метеорологических отражателей; x, y – координаты рассеивающего объема на высоте H ; ε_3 – угол места; β_3 – направление зондирования по азимуту.

В объеме пространства, от которого получен отраженный сигнал, знак «+» в (4) соответствует нисходящему вертикальному потоку V_b , а знак «–» восходящему потоку V_b . Три неизвестные величины V_r , V_b , и α_3 на выбранной высоте могут быть определены минимум по трем измерениям при различных направлениях зондирования по азимуту.

Для определения параметров вертикального профиля ветра РЛС осуществляет зондирование атмосферы мощными когерентными радиоимпульсами. Метеорологическими отражателями, непосредственно связанными с движение воздушных масс – ветром, являются неоднородности диэлектрической проницаемости атмосфере. Период повторения радиоимпульсов РЛС – τ_n – определяет диапазон рабочих высот и диапазон измеряемых скоростей. Обычно он составляет десятки-сотни микросекунд. Принимаемый РЛС сигнал формируется от неоднородностей в отражающем объеме, эффективные размеры которого определяются длительностью радиоимпульсов (длиной отражающего объема – ΔR), шириной диаграммы направленности (диаметром отражающего объема – d) и значением исследуемого интервала высот H . Отраженный сигнал, порожденный одним коротким зондирующим радиоимпульсом, представляет собой статическую картину отражений от неподвижных неоднородностей в объеме. За один период повторения радиоимпульсов τ_n отражения от неоднородностей незначительно изменяют пространственное

хаотическое расположение. При облучении отражающего объема последовательностью радиоимпульсов РЛС может принимать и накапливать энергию отраженного сигнала в течение определенного времени, характеризующегося статистической устойчивостью параметров движения отражающих неоднородностей в атмосфере. Движения большого количества неоднородностей в отражающем объеме вызывает статистическое доплеровское смещение частоты отраженного сигнала относительно частоты зондирующего сигнала. В результате накопления энергии и обработки сигнала в течение интервала статистической устойчивости на выходе когерентной РЛС может быть построен спектр доплеровского сигнала в направлении линии зондирования. При этом с большой достоверностью распределение скоростей неоднородностей в исследуемом объеме подчиняется Гауссовскому закону. На рис. 2 показан спектр отраженного доплеровского сигнала скорости ветра в направлении зондирования.

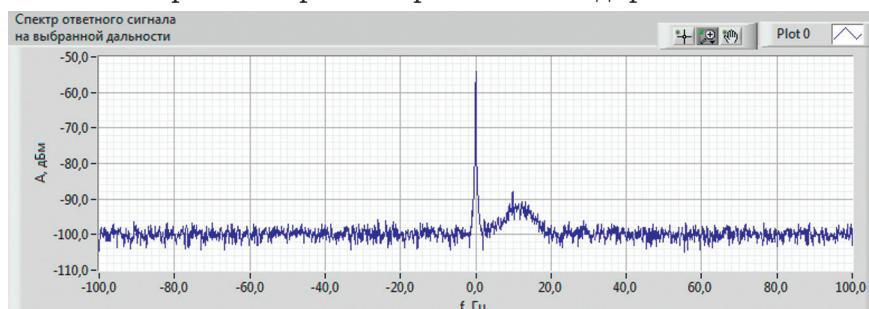


Рис. 2. Спектр доплеровского сигнала скорости ветра

Fig. 2. Spectrum of the Doppler wind speed signal

Сложный характер отраженного сигнала и низкое отношение сигнал/шум на входе приемного устройства РЛС (менее минус 20 дБ) вызывают необходимость использования априорной информации о спектральных и статистических характеристиках сигнала в процессе обработки информации.

Как отмечалось, динамические процессы в атмосфере имеют определенную инерционность – стационарность статистических параметров процессов. Учет этого фактора позволяет снизить погрешность оценивания параметров ветра за счет накопления статистической информации (энергии) в течение интервала стационарности и параметрической обработки спектральных и статистических характеристик сигнала.

Накопление энергии отраженного сигнала может осуществляться некогерентно и когерентно. Существует два способа осуществления некогерентного накопления – накопление огибающих детектированных сигналов и накопление спектров при-

нятых сигналов [2; 8]. Обеспечиваемый выигрыш в отношении сигнал/шум оценивается как \sqrt{N} раз при кратности накопления равной N . Эффект некогерентного накопления обеспечивается при условии, что среднеквадратическое отклонение скорости ветра $\delta(\sigma_v)$ от его среднего значения $V_{\text{ср}}$ за время накопления не превышает спектральную ширину рассеянного сигнала [3; 8]:

$$\delta(\sigma_v) \leq \sigma_v. \quad (5)$$

Спектральная ширина рассеянного сигнала существенно зависит от характеристик атмосферной турбулентности и возрастает с увеличением степени турбулентности атмосферы. Кратность некогерентного накопления зависит от суммарного времени накопления, а также от выполнимости условия (5).

Другим методом повышения отношения сигнал/шум является когерентное накопление. Эта операция представляет собой векторное суммирование реализаций рассеянного сигнала. При суммировании N реализаций (кратность когерентного накопления N) получаемый энергетический выигрыш может достигать N раз. Это справедливо для случаев, когда время накопления меньше интервала стационарности рассеянного сигнала. Интервал стационарности атмосферных процессов оценивается соотношением [2; 3]:

$$T_k = 0,2 \frac{\lambda}{\sigma_v}, \text{ с,} \quad (6)$$

где λ – длина волны РЛС, а σ_v^2 – дисперсия скоростей ветра в импульсном объеме, в приземном слое атмосферы имеющая порядок 1 м/с [1; 2].

При этом максимальная кратность когерентного накопления N_{max} зависит от максимальной высоты H_{max} и определяет диапазон однозначно определяемых скоростей [3]:

$$N_{\text{max}} = \frac{0,1 c \lambda}{H_{\text{max}} \sigma_v}. \quad (7)$$

В работе [7] для оценки оптимального времени накопления t_h вводится соотношение:

$$t_h = \frac{c n_p}{V_{\text{max}} f_0}, \quad (8)$$

где c – скорость света; n_p – количество отчетов в реализации принимаемого сигнала.

Накопление энергии отраженного сигнала от исследуемого отражающего объема в течение определенного времени позволяет с помощью цифровой обработки построить спектр и оценить среднюю скорость $V_{\text{ср}}$ движения метеорологических неод-

нородностей. На рис. 2 показан вид спектральной плотности отраженного радиолокационного сигнала от метеорологических неоднородностей атмосферы и местных предметов полученный на испытаниях макета РПВ. Положение максимума спектральной плотности доплеровского сигнала на некоторой высоте измерений характеризует среднее значения проекции скоростей рассеивателей $V_{\text{ср}}$ (м/с) в отражающем объеме в направлении зондирования. Огибающая спектра имеет в основном характер Гуссова распределения. Определение параметров распределения позволяет выполнить оценку скорости и рассеяния скорости в отражающем объеме.

Анализ формы спектра отраженного сигнала также позволяет оценить время когерентного накопления. Гауссовская форма спектра с выраженной модой и малой дисперсией свидетельствует о времени накопления меньшей или равной времени статистической стационарности атмосферы. Чрезмерное увеличение времени накопления приведет к уплощению вершины спектра и нарастанию ошибки оценки скорости ветра.

Методы оптимальной оценки параметров спектра рассмотрены в работах [5; 8].

Особенности методики определения направления ветра

Информация о ветре заключается в доплеровском сдвиге частоты отраженного сигнала, которая оценивается путем анализа параметров спектра этого сигнала. Флуктуации частоты доплеровского смещения и других параметров спектра (мощности, дисперсия скоростей ветра в исследуемом объеме) в значительной степени определяются весьма малым (порядка минус 20 дБ) отношением сигнал/шум на входе приемного устройства РЛС.

На рис. 3 приведена схема осуществления зондирования для определения направления ветра. Вертикальное зондирование позволяет определить скорость движения метеорологических отражателей в вертикальном направлении (дождь, град). Измерение горизонтальной составляющей движения неоднородностей в отражающем объеме может быть осуществлено путем отклонения диаграммы направленности (ДН) РЛС от вертикального положения (рис. 3). Для увеличения уровня доплеровского смещения (горизонтальной составляющей ветра) необходимо отклонять направление зондирования на возможно больший угол от вертикали. Однако уровень отраженного сигнала от слоистых неоднородностей при этом резко уменьшается. Поэтому по результатам эксплуатации РПВ в различных метеорологических условиях рекомендуется отклонять направление ДН РЛС от вертикали на оптимальные углы $\gamma = 15\text{--}20^\circ$.

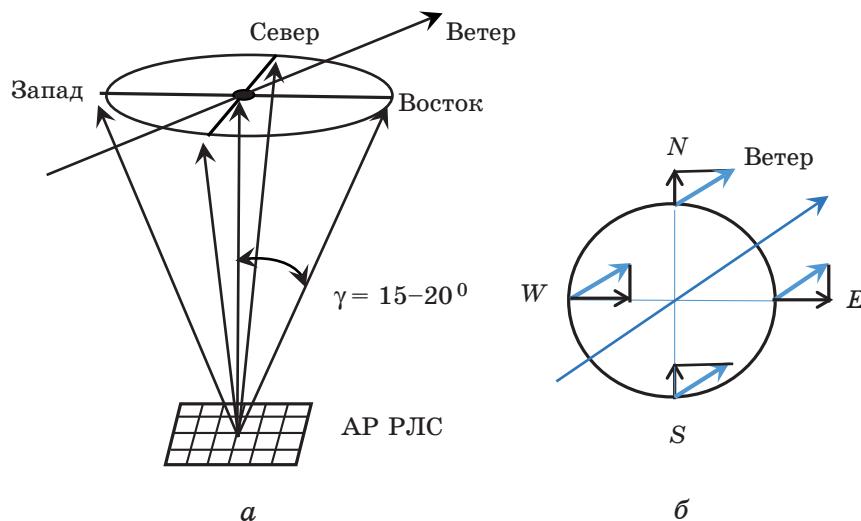


Рис. 3. Схема осуществления зондирования для определения направления ветра

Fig. 3. The scheme of sounding for determining the wind direction

Для определения направления и скорости ветра на высоте H измерения проводят, как правило, для четырех направлений в азимутальной плоскости ДН РЛС, как правило, ориентированных по сторонам Света, рис. 3а. На рис. 3б показаны измеряемые РПВ составляющие вектора ветра при произвольном направлении ветра. Практически для повышения точности измерения осуществляют в двух противоположных направлениях для каждого из четырех фиксированных направлений зондирования. Зондирование осуществляется также в вертикальном направлении. Это позволяет исключить составляющую вертикального движения неоднородностей за счет гравитационного падения из суммарного вектора ветра и снизить погрешность оценки горизонтального ветра. Оптимальный наклон диаграммы направленности РЛС относительно вертикали в пределах 15–20 градусов позволяет сохранить приемлемый уровень отраженного сигнала.

Накопление энергии на разных временных интервалах в пределах периода повторения радиоимпульсов $t_n = 50–75$ мкс, позволяет последовательно устанавливать требуемую высоту зондирования, осуществлять определение доплеровского спектра, построить вертикальный профиль скорости V_r (м/с) и направления ветра [9] в диапазоне исследуемых высот.

Для повышения точности измерения параметров ветра целесообразно после оценочного определения азимута направле-

ния ветра β развернуть ДН РЛС в данном направлении и повторить зондирование. Это принципиально позволит уменьшить погрешность измерения параметров ветра. Поэтому при разработке можно рекомендовать применение всенаправленной антенной системы в составе РПВ.

Особенности модернизации аэрологической РЛС

Для пояснения особенностей предлагаемой модернизации на рис. 4 приведена структурная схема РПВ разрабатываемая на основе аэрологической РЛС. Далее обсуждаются основные технические характеристики, предъявляемые к РПВ [9; 10].

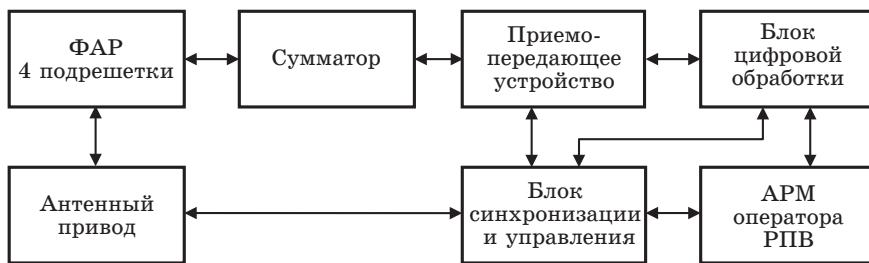


Рис. 4. Структурная схема РПВ, разрабатываемого на основе аэрологической РЛС

Fig. 4. Block diagram of the developed profiler on the basis of the aerological radar

Блок синхронизации и управления обеспечивает когерентный режим работы аналогового приемо-передающего устройства, временную синхронизацию блока когерентного накопления энергии отраженного сигнала и цифровой обработки информации, с помощью антенного привода осуществляет управление угловым положение диаграммы направленности (ДН) фазированной антенной решетки (ФАР) в автоматическом режиме или по командам оператора РПВ.

ФАР имеет эффективную площадь апертуры $S = 2,5 \text{ м}^2$ и состоит из 4 подрешеток (рис. 5). Сумматор/делитель в режиме профайлера обеспечивает синфазное излучение и прием сигнала.

Ширина ДН ФАР по уровню 3 дБ составляет $\Delta\varphi = 6,0$ градусов, коэффициент усиления антенны равен 28 дБ (рис. 6).

На рис. 7 приведена ДН ФАР радиолокатора в плоскостях E (розовый) и H (синий) при выключенном электронном сканировании. Электронное сканирование ДН для работы в режиме РПВ не используется. Уровень боковых лепестков ДН в горизонтальной плоскости определяет параметры защищенности от сторонних излучений и отражения от местных отражателей.

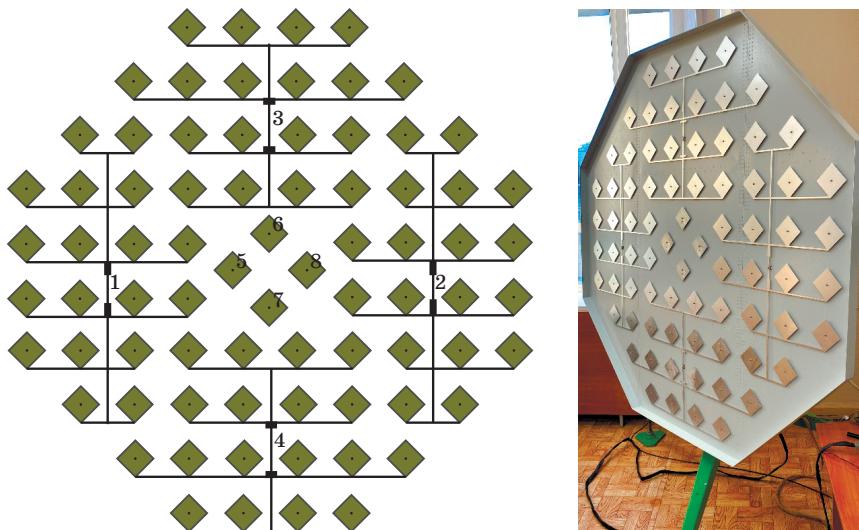


Рис. 5. Фазированная антенная решетка РПВ

Fig. 5. Radar antenna array

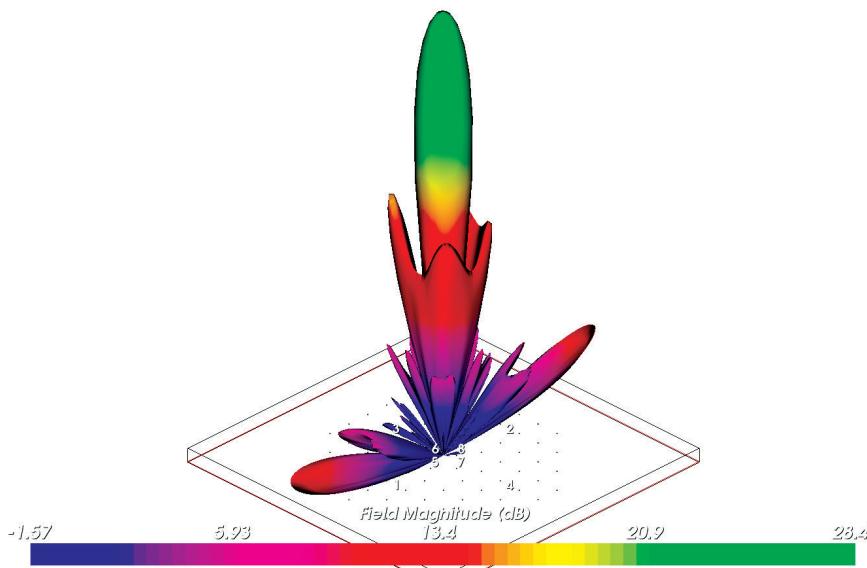


Рис. 6. 3D-диаграмма направленности ФАР РПВ

Fig. 6. 3D-radiation pattern of the radar antenna array

Антенный привод обеспечивает наведение ДН ФАР по углу места ε в пределах 0–180 градусов, по азимуту β в пределах 0 ± 360 градусов с точностью не хуже 0,16 градуса. Блок управления приводом обеспечивает любое направление ДН ФАР, необходимое для оптимального определения параметров ветра.

Диапазон рабочих частот когерентного приемо-передающего устройства составляет 1670–1690 МГц. Период следования зондирующих импульсов в режиме РПВ планируется установить в диапазоне $T_c = 50$ –75 мкс. Это обеспечивает максимальную дальность измерений до 7,0–11 км.

При длительности радиоимпульсов $t_c = 0,5$ –1,0 мкс разрешение параметров ветра по высоте составляет 75–150 м. Импульсная мощность излучения передатчика составляет около 700–800 Вт, средняя мощность излучения составляет 7–15 Вт. Особые требования предъявляются к когерентности излучающих импульсов передающего устройства РЛС, минимизации фазовых шумов зондирующих радиоимпульсов и синхронизации с системой цифровой обработки информации.

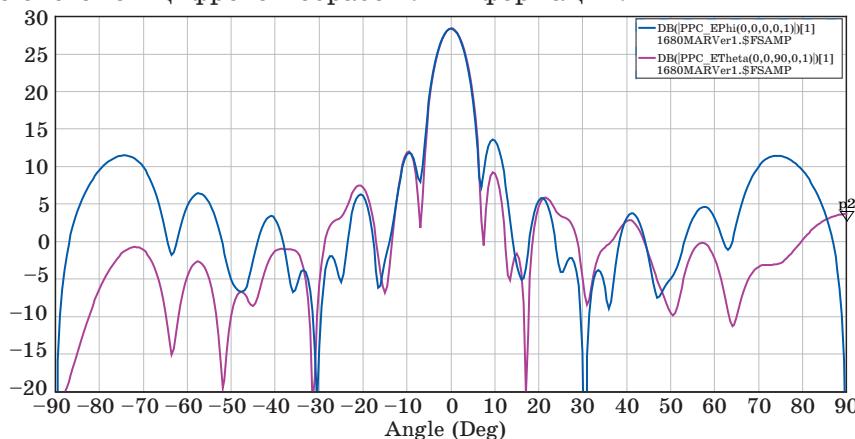


Рис. 7. Диаграмма направленности ФАР РПВ
Fig. 7. Radiation pattern of the radar antenna array

Чувствительность аналоговой части приемного устройства при полосе пропускания усилителя промежуточной частоты (УПЧ) 1,0–4,0 МГц составляет минус 132–136 дБ/Вт. Модернизация РЛС связана с необходимостью повышения реальной чувствительности в режиме РПВ до уровня минус 180–190 дБ/Вт за счет когерентного накопления энергии отраженного сигнала и цифровой фильтрации доплеровской частоты в блоке цифровой обработки информации, построенного на основе цифрового приемника.

Заключение

Проведенные оценки показывают, что технические характеристики когерентной аэрологической РЛС после соответствующей модернизации системы цифровой обработки информации могут отвечать требованиям необходимым для осуществления измерений параметров ветра в условиях ОЯН в диапазоне высот 300–4000 м.

Следует также отметить, что базовый режим работы аэрологической РЛС также может быть существенно усовершенствован за счет цифровой обработки принимаемого сигнала радиозонда. Это будет способствовать повышению качества и надежности работы системы аэрологического радиозондирования атмосферы Ростгидромета.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по проекту 0836-2020-0020

Acknowledgments

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project No. 0836-2020-0020

Список литературы

1. Dibbern J., Engelbart D. A. M., Goersdorf U. et al. *Operational aspects of wind profiler radars. Instruments and observing methods*. World meteorological organization, report. No. 79. WMO/TD No. 1196. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2003. Available at: <https://pdfslide.net/documents/operational-aspects-of-wind-profiler-radars.html>
2. Doviak R. J., Zrnic D. S., Sirmans D. S. Doppler weather radar. *Proceedings of the IEEE*. 1979;67(11):1522–1553. DOI: 10.1109/PROC.1979.11511.
3. Кащеев Б. Л., Прошкин Е. Г., Лагутин М. Ф. (ред.) *Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли*. Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ; 2002. 426 с.
4. Ефремов В. С., Вовшин Б. М., Вылегжанин И. С. Лаврукевич В. В., Седлецкий Р. М. Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона со сжатием импульсов. *Журнал радиоэлектроники*. 2009;(10):321–325.
5. Литвин-Попович А. И., Щекин С. Р. Использование априорной информации при обработке сигналов в метеорологических РЛС. *Технологический аудит и резервы производства*. 2013;3(1):24–28.
6. Стерлядкин В. В., Кононов М. А. Расчет потенциала и оценка возможностей ветровой метеорологической РЛС мм диапазона длин волн. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2010;(158):52–59.
7. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф., Щукин Г. Г. Информационные возможности ветровых профайлеров при зондировании атмосферы. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2011;(18):70–89.
8. Литвин-Попович А. И., Олейников В. Н. Повышение эффективности цифровой обработки сигналов РЛС вертикального зондирования атмосферы. *Прикладная радиоэлектроника*. 2008;7(4):400–403. Режим доступа: https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/5967/1/Prikladnaja_radioelektronika-2008-4-68-71.pdf
9. Иванов В. Э., Фридзон М. Б., Ессяк С. П. *Радиозондирование атмосферы: технические и метрологические аспекты разработки и при-*

менения радиозондовых измерительных средств. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ; 2004. 606 с.

10. Иванов В. Э. Многорежимный аэрологический комплекс. Патент RU № 2710965. Опубликовано 2020.01.14.

References

1. Dibbern J., Engelbart D. A. M., Goersdorf U. et al. *Operational aspects of wind profiler radars. Instruments and observing methods*. World meteorological organization, report. No. 79. WMO/TD No. 1196. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2003. Available at: <https://pdfslide.net/documents/operational-aspects-of-wind-profiler-radars.html>
2. Doviak R. J., Zrnic D. S., Sirmans D. S. Doppler weather radar. *Proceedings of the IEEE*. 1979;67(11):1522–1553. DOI: 10.1109/PROC.1979.11511.
3. Kashcheev B. L., Proshkin E. G., Lagutin M. F. (ed.) *Remote methods and means of studying processes in the Earth's atmosphere*. Kharkov: Kharkiv National University of Radio Electronics; Biznes Inform; 2002. 426 p. (In Russ.)
4. Efremov V. S., Vovshin B. M., Vylegzhannin I. S. Lavrukevich V. V., Sedletsky R. M. Polarizing Doppler meteorological radar of the C-band with pulse compression. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2009;(10):321–325. (In Russ.)
5. Lytvyn-Popovych A. I., Shchekin S. R. Apriori information usage in meteo radar signal processing. *Technology Audit and Production Reserves*. (In Russ.) DOI: 10.15587/2312-8372.2013.14895.
6. Sterlyadkin V. V., Kononov M. A. Calculation of potential and estimation of possibilities of a wind millimeter-wave meteorological radar. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA = Civil Aviation High Technologies*. 2010;(158):52–59. (In Russ.)
7. Gorelik A. G., Kolomiets S. F., Shchukin G. G. Information capabilities of wind profilers in atmospheric sounding. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. 2011;(18):70–89. (In Russ.)
8. Litvin-Popovich A. I., Oleinikov V. N. Improving the efficiency of digital signal processing of a radar for vertical atmospheric sounding. *Prikladnaia elektronika = Applied Radio Electronics*. 2008;7(4):400–403. (In Russ.) Available at: https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/5967/1/Prikladnaja_radioelektronika-2008-4-68-71.pdf
9. Ivanov V. E., Fridzon M. B., Essyak S. P. *Radio sounding of the atmosphere: technical and metrological aspects of the development and application of radiosonde measuring instruments*. Ekaterinburg: Ural State Technical University; 2004. 606 p. (In Russ.)
10. Ivanov V. E. *Multi-mode aerological complex*. RU patent No. 2710965. Published on 2020.01.14. (In Russ.)

Информация об авторах

Букрин Илья Владимирович, аспирант, инженер Института радиоэлектроники и телекоммуникаций – РТФ Уральского федерального университета. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: i.v.bukrin@urfu.ru

Гусев Андрей Викторович, старший преподаватель Института радиоэлектроники и телекоммуникаций – РТФ Уральского федерального университета. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: a.v.gusev@urfu.ru

Кудинов Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент Института радиоэлектроники и телекоммуникаций – РТФ Уральского федерального университета. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: s.kudinov@urfu.ru

Иванов Вячеслав Элизбарович, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Уральского федерального университета. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: v.e.ivanov@yandex.ru

Плохих Олег Васильевич, старший преподаватель Института радиоэлектроники и телекоммуникаций – РТФ Уральского федерального университета. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: o.v.plokhikh@urfu.ru

Шабунин Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Уральского федерального университета. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: s.n.shabunin@urfu.ru

Information about the authors

Ilya V. Bukrin, Post-graduate student, Engineer, Institute of Radio Electronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University. 620002, Ekaterinburg, Mira str., 32; e-mail: i.v.bukrin@urfu.ru

Andrey V. Gusev, Senior Lecturer, Institute of Radio Electronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University. 620002, Ekaterinburg, Mira str., 32; e-mail: a.v.gusev@urfu.ru

Sergey I. Kudinov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Radioelectronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University. 620002, Ekaterinburg, Mira str., 32; e-mail: s.kudinov@urfu.ru

Vyacheslav E. Ivanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Radioelectronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University. 620002, Ekaterinburg, Mira str., 32; e-mail: v.e.ivanov@yandex.ru

Oleg V. Plokhikh, Senior Lecturer, Institute of Radio Electronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University. 620002, Ekaterinburg, Mira str., 32; e-mail: o.v.plokhikh@urfu.ru

Sergey N. Shabunin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radio Electronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University. 620002, Ekaterinburg, Mira Str., 32; e-mail: s.n.shabunin@urfu.ru

Поступила / Received: 20.03.2021

Принята в печать / Accepted: 31.03.2021

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2021.5.1.004

УДК 621.396

Исследование характеристик сложных дифракционных структур на основе комбинированного подхода

И. Я. Львович¹, Я. Е. Львович², А. П. Преображенский¹,
Ю. П. Преображенский¹, О. Н. Чопоров²✉

¹ Воронежский институт высоких технологий,
Россия, 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 73А

² Воронежский государственный технический университет,
Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

✉ choporov_oleg@mail.ru

Аннотация

В работе проводится исследование электродинамических структур, в состав которых входят металлические и диэлектрические элементы. Расчет простых элементов осуществляется при помощи метода интегральных уравнений. Проводится их решение на базе метода коллокаций и определяются рассеянные электромагнитные поля. Для того чтобы сложные электродинамические структуры обладали требуемыми рассеивающими характеристиками, проводится выбор дифракционных элементов в рамках многоальтернативного оптимизационного подхода. Приведен пример исследуемой электродинамической структуры. Продемонстрировано определение ее характеристик.

Ключевые слова

электромагнитная дифракция, электродинамика структура, методы оптимизации

Для цитирования

Львович И. Я., Львович Я. Е., Преображенский А. П., Преображенский Ю. П., Чопоров О. Н. Исследование характеристик сложных дифракционных структур на основе комбинированного подхода. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):49–62. DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.004.

Investigation of the characteristics of complex diffractive structures based on a combined approach

I.Ya. Lvovich¹, Ya.E. Lvovich², A.P. Preobrazhenskiy¹,
Yu.P. Preobrazhenskiy¹, O.N. Choporov²✉

¹ Voronezh Institute of High Technologies, 73-A Lenina Str., Voronezh,
394043, Russia

² Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh,
394006, Russia

✉ choporov_oleg@mail.ru

Abstract

The paper is devoted to the study of electrodynamic structures, which include metal and dielectric elements. Simple elements are calculated using the method of integral equations. Their solution is determined by the collocation method and scattered electromagnetic fields. The finite-difference method is required for calculating the equation. For required scattering characteristics of complex electrodynamic structures the choice of diffraction elements is carried out within the framework of a multi-alternative optimization approach. The individual electrodynamic components are considered first. Then, on their basis, several promising variants of more complex subsystems are formed. It is necessary to apply training information on every stage of modeling. The example of the investigated electrodynamic structure is given. The definition of its characteristics is demonstrated.

Keywords

electromagnetic diffraction, electrodynamics, optimization methods

For citation

Lvovich I. Ya., Lvovich Ya. E., Preobrazhenskiy A. P., Preobrazhenskiy Yu. P., Choporov O. N. Investigation of the characteristics of complex diffractive structures based on a combined approach. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):49–62. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.004.

Введение

В настоящее время активным образом развиваются системы связи в различных диапазонах. Для того чтобы обеспечить требуемые характеристики сложных электродинамических устройств, необходимо использовать соответствующие модели и алгоритмы. Они ориентированы на применение самой современной компьютерной техники. Уже в течение нескольких десятилетий при создании систем связи используют САПР [1]. Но они в общем случае требуют очень больших вычислительных затрат. Это определяет необходимость создания таких алгоритмов и подхо-

дов, которые за приемлемое с точки зрения практики время позволили бы разрабатывать компоненты систем связи.

Цель данной работы состоит в разработке комплексного подхода, на основе которого можно создавать электродинамические структуры, состоящие из металлических и диэлектрических компонентов с заданными требованиями на уровень рассеянных полей [2; 3].

Модель расчета электродинамической компоненты

При расчете рассеянных полей от комбинированной электродинамической структуры, содержащей металлические и диэлектрические компоненты, мы использовали интегральное уравнение:

$$\vec{n} \times \vec{E} = -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \vec{n} \times \times \int_S (-\omega^2 \cdot \mu \cdot \vec{J} \cdot G + Z \cdot \vec{n} \times \vec{J} \times \overrightarrow{\text{grad}}'(G) - \frac{i}{\omega\epsilon} \text{Div}(\vec{J}) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}'(G)) ds'. \quad (1)$$

В этом уравнении использовано несколько обозначений. Например, \vec{n} – показывает, как направлена внешняя нормаль к компоненте. Электрическая напряженность обозначается как \vec{E} . Электромагнитная волна характеризуется частотой ω . Металлоизолитическая компонента характеризуется ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость. Для области интегрирования поверхностная плотность тока – \vec{J} . Обозначение трехмерной функции Грина – G . Когда интегрируем по определенному контуру, то для него будет импеданс Z . При интегрировании по поверхности обозначаем ее S .

Решение интегрального уравнения проводится на базе численного метода [4]. Получается система алгебраических уравнений с матрицей размером $N \times N$. При этом N – число точек на поверхности анализируемой электродинамической компоненты.

Также в ходе решения уравнения требуется использование конечно-разностного метода. При расчетах $\text{Div}(\vec{J})$, чтобы упростить расчеты, будем рассматривать индекс, который является двойным: $j \rightarrow (m, p)$. После преобразований дивергенция \vec{J} записывается как

$$\text{Div}(\vec{J}_{m,p}) = \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} \approx \frac{J_{x_{m+1,p}} - J_{x_{m-1,p}}}{2 \cdot \Delta x} + \frac{J_{y_{m,p+1}} - J_{y_{m,p-1}}}{2 \cdot \Delta y} + \frac{J_{z_{m,p+1}} - J_{z_{m,p-1}}}{2 \cdot \Delta z}. \quad (2)$$

При этом по разным координатам будут соответствующие интервалы дискретизации – $\Delta x, \Delta y, \Delta z$.

В методе коллокаций компоненты функции Грина:

$$G_{ij} = \frac{\exp(-ik_\ell r_{ij})}{r_{ij}}. \quad (3)$$

Если поверхность компоненты металлическая, то $k_\ell = 2\pi/\lambda$.
Если поверхность компоненты диэлектрическая, то $k_\ell = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$.

После преобразований градиент функции Грина записывается для каждой из составляющих:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial x'_{ij}} &= -(x_i - x_j) \frac{1 + ik_\ell r_{ij}}{r_{ij}^3} \exp(-ik_\ell r_{ij}); \\ \frac{\partial G}{\partial y'_{ij}} &= -(y_i - y_j) \frac{1 + ik_\ell r_{ij}}{r_{ij}^3} \exp(-ik_\ell r_{ij}); \\ \frac{\partial G}{\partial z'_{ij}} &= -(z_i - z_j) \frac{1 + ik_\ell r_{ij}}{r_{ij}^3} \exp(-ik_\ell r_{ij}). \end{aligned} \quad (4)$$

Индекс i соответствует точке наблюдения. Индексом j соответствует точке интегрирования. Индексы изменяются так: $i, j = 1 \dots N$.

Когда формируется модель, тогда мы в уравнении используем разложение токов при помощи кусочно-постоянных функций. От интегрального уравнения мы приходим к системе уравнений:

$$\begin{bmatrix} U_{xx} & U_{xy} & U_{xz} \\ U_{yx} & U_{yy} & U_{yz} \\ U_{zx} & U_{zy} & U_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rx \\ Ry \\ Rz \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Поверхность анализируемой дифракционной структуры характеризуется нормалью

$$\vec{n} = \vec{x}_0 \cdot \vec{nx} + \vec{y}_0 \cdot \vec{ny} + \vec{z}_0 \cdot \vec{nz}. \quad (6)$$

Для правой части системы уравнений записываем:

$$R = \begin{bmatrix} Rx \\ Ry \\ Rz \end{bmatrix};$$

$$Rx_i = ny_i Ez_i - nz_i Ey_i; \quad (7)$$

$$Ry_i = -(nx_i Ez_i - nz_i Ex_i);$$

$$Rz_i = nx_i Ey_i - ny_i Ex_i.$$

Для расчета элементов матрицы мы запишем:

$$\begin{aligned}
 Uxx_{ij} &= Umx_{ij} + Udx_{ij}; \quad Uxy_{ij} = Umxy_{ij} + Udy_{ij}; \quad Uxz_{ij} = Umxz_{ij} + Udxz_{ij}; \\
 Uyx_{ij} &= Umyx_{ij} + Udyx_{ij}; \quad Uyy_{ij} = Umyy_{ij} + Udyy_{ij}; \quad Uyz_{ij} = Umyz_{ij} + Udyz_{ij}; \quad (8) \\
 Uzx_{ij} &= Umzx_{ij} + Udzx_{ij}; \quad Uzy_{ij} = Umzy_{ij} + Udz_{ij}; \quad Uzz_{ij} = Umzz_{ij} + Udz_{ij}.
 \end{aligned}$$

Обозначение m относится к контуру, который проходит по металлу, обозначение d относится к контуру, который проходит по диэлектрику.

Когда осуществляется интегрирование, тогда те токи, которые связаны с индексами i и j , необходимо соотнести с индексами (m, p) .

Для элементов матрицы, которые соответствуют металлической поверхности:

$$\begin{aligned}
 Umx_{ij} &= -Z \cdot \frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(ny_i \left(ny_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} - nz_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) + nz_i \left(ny_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} - ny_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{i}{\omega\epsilon Z} \cdot nz_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \Delta x} \right) ds; \\
 Umxy_{ij} &= -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(-nz_i i \omega^2 \mu G_{ij} + Z \left(ny_i \left(ny_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} - nz_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + nz_i \left(ny_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} - ny_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) \right) + \frac{i}{\omega\epsilon} \cdot nz_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \Delta y} \right) ds; \\
 Umxz_{ij} &= -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(-ny_i i \omega^2 \mu G_{ij} + Z ny_i n x_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) ds; \\
 Umyx_{ij} &= -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(nz_i i \omega^2 \mu G_{ij} + Z \left(n x_i \left(ny_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} - nz_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + nz_i \left(-nz_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} - ny_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} \right) \right) - \frac{i}{\omega\epsilon} \cdot nz_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \Delta x} \right) ds; \\
 Umyy_{ij} &= -Z \frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(-n x_i n y_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} + n z_i n x_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} - \frac{i}{\omega\epsilon Z} \cdot nz_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \Delta y} \right) ds; \\
 Umyz_{ij} &= -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(-n x_i i \omega^2 \mu G_{ij} + Z \left(n x_i n x_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} + n z_i n x_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} \right) \right) ds; \\
 Umzx_{ij} &= -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(-ny_i i \omega^2 \mu G_{ij} + Z \left(-n x_i \left(ny_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} - ny_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + ny_i \left(-nz_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} - ny_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} \right) \right) \right) ds;
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$Umzy_{ij} = -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(nx_i i\omega^2 \mu G_{ij} + Z \left(-nx_i \left(-nz_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} - nx_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + ny_i nx_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} \right) \right) ds; \\ Umzz_{ij} = -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S Z ny_i nx_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} ds.$$

Для диэлектрических объектов элементы матриц рассчитываются аналогичным образом. Волновое число k_ℓ будет зависеть от того, какая поверхность анализируется.

Для расчета рассеянного поля мы используем выражение

$$E^S(\vec{r}) = \frac{i\omega\mu \exp(-ikr)}{r} \int_S ((\vec{r} \cdot \vec{J}) \vec{r} - \vec{J} - \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \cdot Z \cdot \vec{n} \times \vec{J} \times \vec{r}) \exp(ikr') dS'. \quad (10)$$

где \vec{r} -вектор, который характеризуется единичной длиной и направлен от точки интегрирования к точке, в которой наблюдаем; $\vec{r}' = x_0 \cdot \vec{x}' + y_0 \cdot \vec{y}' + z_0 \cdot \vec{z}'$ – радиус-вектор, который относится к точке интегрирования.

Для того чтобы рассчитать характеристики дифракционной структуры, необходимо опираться на такой алгоритм:

1. Задаем координаты дифракционного элемента.
2. Записываем интегральное уравнение, которое дискретизуется с учетом этих координат.
3. Решаем систему уравнений, определяем токи.
4. Рассчитываем рассеянное поле.

Модель выбора дифракционных элементов, основанная на многоальтернативной оптимизации

Проектирование электродинамических устройств в современных условиях носит комплексный характер. Оно использует типовые решения как в области программного, так и технического обеспечения. Могут применяться различные подходы, которые продемонстрировали эффективные характеристики для других систем, которые работают по похожим принципам [5]. Тогда типовые решения могут переноситься. Не всегда можно обеспечить соответствующие высокие уровни эффективности. Анализ показывает, почему это может быть. Причины могут быть, например, такие:

- 1) не всегда рассматриваются все варианты в возможном множестве решений;
- 2) может происходить преобразование отдельных подсистем и алгоритмов. Но не во всех случаях они могут быть полноценным способом интегрированы в общие системы. В целом систем-

мы будут функционировать неопределенным образом. Частичное преобразование подсистем и алгоритмов связано с тем, какие экономические возможности;

3) усложнение разрабатываемых подсистем ведет к необходимости повышения квалификации тех, кто с ними будет работать. А такой процесс обучения пользователей и проектировщиков не всегда реализуется.

То есть существуют проблемы в преобразованиях подсистем и алгоритмов. В большой мере они могут быть решены на основе многоальтернативной оптимизации. Какие результаты могут быть получены на основе указанного подхода? С одной стороны, существуют ограниченные ресурсы, связанные с размерами анализируемых электродинамических компонентов, значениями рассеянных электромагнитных полей. С другой – существуют ресурсы, которые распределены во времени. При решении обозначенных задач можно применять параллельные подходы и опираться на сравнительные оценки по альтернативным проектам преобразований. Существует процесс активного преобразования. Базируется он на том, что вначале рассматриваются отдельные электродинамические компоненты. Затем на их основе происходит формирование нескольких перспективных вариантов более сложных подсистем [6]. На каждом из этапов моделирования необходимо применять обучающую информацию.

Пусть у нас есть совокупность электродинамических компонентов. Нам необходимо решить задачу активного преобразования. Для этого требуется обосновать математические приемы суперпозиции общей электродинамической системы. Совокупность электродинамических компонентов представим какnumерованные множества.

Множества проводящих электродинамических компонентов:

$$\delta_{rj} = (\overline{1, R_j; v_j}), \quad j = \overline{1, J}, \quad (11)$$

здесь v_j – рассматривается в виде нумерации множества $\overline{1, R_j}$. Множества электродинамических компонентов, которые поглощают электромагнитные излучения:

$$\delta_{vt} = (\overline{1, V_t; v_e}), \quad t = \overline{1, T}, \quad (12)$$

здесь v_t – рассматривается в виде нумерации множества $\overline{1, V_t}$.

Отношения между указанными множествами электродинамических компонентов могут быть обозначены при помощи множества S . Исходим из того, что множества R и V не будут являться пустыми:

$$\delta_s = (S, v_s), \quad \delta_s = \delta_R x \delta_v. \quad (13)$$

В указанном выражении мы рассматриваем v_s как нумерацию множества S , $\delta_R = \times \{\delta_{rj} : j = 1, J\}$, $\delta_v = \times \{\delta_{vt} : t = 1, T\}$. Если рассматривать множество S_l , то оно будет составляться как список элементов большой электродинамической системы $W_g = (g = 1, G)$, $\delta_w = (W_1, W_G; v_g)$.

Если рассматривать отдельные электродинамические подсистемы, тогда v_g будет рассматриваться в виде нумерации множества S_l . В режиме активных преобразований происходит формирование общей электродинамической структуры. Тогда должны быть обозначены переходы к связям компонентов в множестве δ_s к компонентам в множестве δ_w . В итоге будет получаться семейство морфизмов из δ_s в δ_w – $Mor(\delta_s, \delta_w)$.

Происходят процедуры оптимального синтеза. Они обуславливают создание преобразований $Mor(\delta_s, \delta_w)$. При этом есть определенный порядок (нумерации) v^* . После этого обеспечиваются самое лучшее выполнение заданных требований $F_i (i = 1, I)$ относительно компонентов в электродинамической системе. Пусть любые из нумераций множеств $Mor(\delta_s, \delta_w)$ будут рассматриваться как v . Тогда оптимальный выбор будет связан с проведением преобразования $v = v^*h$. В ходе анализа h рассматривается как общерекурсивная функция. При реализации алгоритма будет проводиться переход от v к основной вычислимой нумерации.

Видно, как решать обобщенную задачу оптимального синтеза. Основные ее шаги связаны с тем, что необходимо решать проблему определения основной вычислимой нумерации по множествам $Mor(\delta_s, \delta_w)$. Исследователями отмечается проблема P для пары (δ_s, δ_w) .

Пусть $\delta_w(W_1, W_G; v_g^*)$ рассматривается в виде конечного нумерованного множества. Считаем, что в нем v_g^* будет основной нумерацией. Она может быть по определенному частичному порядку относительно списка S_l . Осуществляемые процедуры будут справедливыми [7] в рамках любого из нумерованных множеств δ_s . При этом будут выполняться требования по конечности множества $Mor(\delta_s, \delta_w)$. Тогда можно будет сделать вывод о том, что проблема P при анализе пары (δ_s, δ_w) будет разрешимой. Если проблема P для (δ_s, δ_w) рассматривается в виде разрешимой, тогда для нумерованного множества $Mor(\delta_s, \delta_w), v^*$ рассматривается обозначение $Mor(\delta_s, \delta_w)$.

Осуществим процедуру преобразования $Mor(\delta_s, \delta_w)$, основываясь на том, что выполняется принцип эквивалентности:

$$Mor(\delta_s, \delta_w) \sim Mor(\delta_R, \delta_v, \delta_w) \sim Mor(\delta_R, Mor(\delta_v, \delta_w)). \quad (14)$$

Проведем переобозначение множеств, следующим образом

$$Mor(\delta_v, \delta_w) = \delta_{vw},$$

$L_{j-1} = \times \{\delta_{rj} : j = \overline{1, J-1}\}$ исходим из того, что $\delta_R = \delta_{j-1} x \delta_{rj}$. (15)

После этого (14) будет записано так

$$\begin{aligned} Mor(\delta_R, Mor(\delta_v, \delta_w)) &\sim Mor(\delta_R, \delta_{vw}) \sim \\ &\sim Mor(\delta_{j-1} \times \delta_{rj}, \delta_{vw}) \sim Mor(\delta_{j-1}, \delta_{vw}). \end{aligned} \quad (16)$$

Если ввести еще одно обозначение

$$\begin{aligned} Mor(\delta_{rj}, \delta_{vw}) &= \delta_{rj, vw}, \\ \delta_{j-2} &= \times \{\delta_{rj} : j = \overline{1, J-2}\}. \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда, как и в (16) мы запишем

$$Mor(\delta_{j-1}, Mor(\delta_{rJ}, \delta_{vw})) \sim Mor(\delta_{j-2}, Mor(\delta_{r(J-2)}, \delta_{rJ, vw})). \quad (18)$$

Если осуществить итеративную процедуру (2) до $j = I$, тогда мы получим результат

$$Mor(\delta_2, Mor(\delta_{r3}, \delta_{rJ, \dots, r3, vw})) \sim Mor(\delta_{r1}, Mor(\delta_{r2}, \delta_{rJ, \dots, r2, vw})). \quad (19)$$

Если анализировать j -й этап, тогда для преобразования (10) мы запишем

$$Mor(\delta_j, Mor(\delta_{r(j+1)}, \delta_{rJ, \dots, r(j+1, vw)})) \sim Mor(\delta_{j-1}, Mor(\delta_{rj}, \delta_{rJ, \dots, rj, vw})). \quad (20)$$

Преобразование вида (4) можно провести для множества $Mor(\delta_v, \delta_w)$. Причем на t -м этапе отношение эквивалентности запишется следующим образом

$$Mor(\delta_t, Mor(\delta_{v(t+1)}, \delta_{vt, \dots, v(t+1), w})) \sim Mor(\delta_{vt}, Mor(\delta_{vt}, \delta_{vT, \dots, vt, w})). \quad (21)$$

В указанном выражении $\delta_t = \times \{\delta_\tau : \tau = \overline{1, t}\}$. Получение множеств $\delta_{vT, \dots, v(t+1)}$, $\delta_{vT, \dots, vt, w}$ происходит также, как и для выражения (19).

Построение алгоритма для того, чтобы разрешать проблему P по паре (δ_s, δ_w) состоит из таких шагов:

1) основные нумерации v_j^* в морфизмах $Mor(\delta_{rj}, \delta_{rJ, \dots, rj, vw})$, ($j = \overline{1, J}$) будут определены. Это важно, чтобы соблюдать требования (20) и работу с v_t^* морфизмами на базе (21);

2) осуществление расчетов по $Mor(\delta_s, \delta_w)$;

3) определение основной нумерации v_g^* по множествам $\delta_w = (W_1, W_G; v_g)$. Тогда в итоге будут осуществлены расчеты по (20), (21) с учетом $v_j = v_j^*$, $v_t = v_t^*$ и $v_g = v_g^*$.

Многоальтернативная оптимизация [8; 9] в рамках активных преобразований будет проводится с учетом того, что в ней будут применяться альтернативные переменные:

$$x_m = \begin{cases} 1, & \text{если на определенном временном периоде} \\ & \text{осуществляется преобразование } m\text{-й подсистемы;} \\ 0, & \text{в противном случае, } m = \overline{1, M}; \end{cases} \quad (22)$$

$$x_{nm} = \begin{cases} 1, & \text{если в качестве аналога } m\text{-й подсистемы} \\ & \text{используется } n_m\text{-е типовое решение;} \\ 0, & \text{в противном случае, } n_m = \overline{1, N_m}, \end{cases} \quad (23)$$

В последнем выражении N_m показывает число типовых решений. Они соответствуют определенной m -й подсистеме, когда осуществляется процесс преобразований.

За счет анализа (22), (23) есть возможности, основываясь на соответствующих требованиях, проводить процедуры комбинаторного выбора.

В ходе моделирования есть ограничения по времени. Но задача состоит в том, чтобы к преобразованиям привлекались больше электродинамических подсистем. Это демонстрирует такое выражение

$$\sum_{m=1}^M a_m x_m \rightarrow \max. \quad (24)$$

В указанном выражении a_m является коэффициентом. Он показывает, какая из m -х электродинамических подсистем будет применяться в первую очередь.

Еще одним практически важным требованием является ограничение по размерам. Они соответствуют параметру C :

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n_m=1}^{N_m} C_{nm} X_m X_{nm} \leq C. \quad (25)$$

Здесь C_{nm} – соответствует размеру n_m -й электродинамической подсистеме при взаимодействии с m -й подсистемой.

После учета всех шагов в целом электродинамическая система с точки зрения выбора ее отдельных элементов, строится на базе многоальтернативного оптимизационного подхода [10]:

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M a_m x_m \rightarrow \max; \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{n_m=1}^{N_m} C_{nm} X_m X_{mn} \leq C; \\ & X_m = \begin{cases} 1, & m = \overline{1, M}; \\ 0, & \end{cases} \\ & X_{nm} = \begin{cases} 1, & n_m = \overline{1, N_m}, \quad \sum_{n_m=1}^{N_m} Z_{mn} = 1. \\ 0, & \end{cases} \end{aligned} \quad (26)$$

Результаты

На рис. 1 приведен пример исследуемой электродинамической структуры.

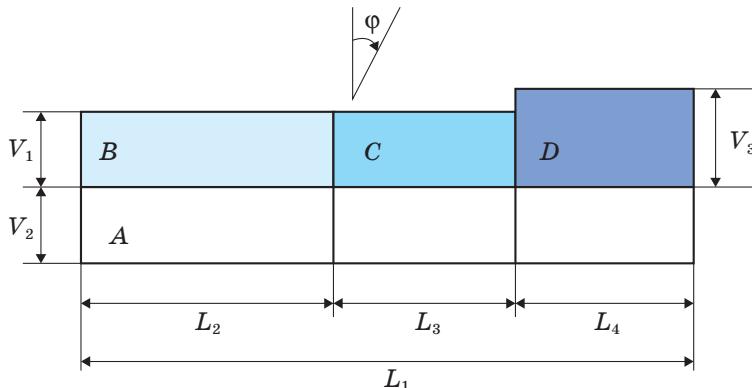


Рис. 1. Пример оптимизированной электродинамической структуры

Fig. 1. Example of the optimized electrodynamic structure

Компонента A является металлической. Компоненты B , C , D являются диэлектрическими. Размеры структуры были следующими: $L_1 = 11,9\lambda$, $L_2 = 5,9\lambda$, $L_3 = 2\lambda$, $L_4 = 6\lambda$, $V_1 = 3,1\lambda$, $V_2 = 2,5\lambda$. Для структур B и характеристики были следующими: $\epsilon_B = 1,2 - j \cdot 3$, $\mu_B = 1,3 - j \cdot 4$, $\epsilon_C = 2,3 - j \cdot 4$, $\mu_C = 1,4 - j \cdot 5$. Необходимо было определить значения других параметров при требованиях значений рассеянного электромагнитного поля менее 10 дБ в секторе углов $0^\circ \leq \varphi \leq 15^\circ$. Дополнительным условием было ограничение $V_3 < 3\lambda$.

В результате использования предлагаемого подхода были определены параметры структуры D : $\epsilon_D = 2,2 - j \cdot 4,5$, $\mu_D = 2,3 - j \cdot 2,7$, а также размер $V_3 = 2,5\lambda$.

Заключение

В работе предложен комплексный подход, базирующийся на комбинации метода интегральных уравнений и методов многоальтернативной оптимизации. На его основе продемонстрированы возможности для проектирования и создания сложных электродинамических структур с заданными требованиями на характеристики рассеяния. Приведен пример использования предлагаемого подхода.

Список литературы

1. Преображенский А.П. *Моделирование и алгоритмизация анализа дифракционных структур в САПР радиолокационных антенн*. Воронеж; 2007. 248 с.

2. Преображенский А.П., Чопоров О.Н. Принятие решения о форме дифракционных структур в задаче рассеяния радиоволн. *International Journal of Advanced Studies*. 2016;6(2):79–87. DOI: 10.12731/2227-930X-2016-2-79-87.
3. Преображенский А.П., Чопоров О.Н. Оптимизация конфигурации электродинамического объекта с требуемыми характеристиками рассеяния. *International Journal of Advanced Studies*. 2016;6(2):97–107. DOI: 10.12731/2227-930X-2016-2-97-107.
4. Щербатых С.С. Метод интегральных уравнений как основной способ анализа в САПР антенн. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016;(1):10. Режим доступа: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=264>
5. Львович Я.Е., Львович И.Я., Преображенский А.П. Решение задач оценки характеристик рассеяния электромагнитных волн на дифракционных структурах при их проектировании. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2010;(6):255–256.
6. Сорокин С.О. Оптимизационное моделирование функционирования системы однородных объектов в многоспектральной цифровой среде. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2018;6(3):153–164. Режим доступа: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=503>
7. Орлова Д.Е. Устойчивость решений при обеспечении функционирования организационно-технических систем. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2018;6(1):325–336. Режим доступа: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=451>
8. Neittaanmaki P., Repin S., Tuovinen T. (eds). *Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures; Series: Computational Methods in Applied Sciences*. Springer International Publishing AG, Switzerland; 2016. Available at: <https://www.springer.com/gp/book/9783319235639>
9. Ерасов С.В. Оптимизационные процессы в электродинамических задачах. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2013;(10):20–26.
10. Львович Я.Е., Питолин А.В., Сорокин С.О. Оптимизация проектирования многоспектральной цифровой среды системы однородных объектов на основе процедур декомпозиции и агрегации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019;7(2):186–195. DOI: 10.26102/2310-6018/2019.25.2.024.

References

1. Preobrazhensky A.P. *Modeling and algorithmic analysis of diffraction structures in CAD of radar antennas*. Voronezh; 2007. 248 p. (In Russ.)
2. Preobrazhenskiy A.P., Choporov O.N. The decision of form for diffractive structures in the problem of scattering of radio waves. *International Journal of Advanced Studies*. 2016;6(2):79–87. (In Russ.) DOI: 10.12731/2227-930X-2016-2-79-87.
3. Preobrazhensky A.P., Choporov O.N. The optimization of electrodynamic configuration object with the desired characteristics of

scattering. *International Journal of Advanced Studies*. 2016;6(2):97–107. (In Russ.) DOI: 10.12731/2227-930X-2016-2-97-107.

4. Scherbatyh S.S. The possibility of using the method of integral equations as the basic approach in cad systems antennas. *Scientific Journal Modeling, Optimization and Information Technology*. 2016;(1):10. (In Russ.) Available at: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=264>

5. Lvovich Ya.E., Lvovich I.Ya., Preobrazhensky A.P. Solving the problems of evaluating the characteristics of scattering of electromagnetic waves on diffractive structures during their design. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii*. 2010;(6):255–256. (In Russ.)

6. Sorokin S.O. Optimization modeling of the functioning of the system of homogeneous objects in a multidimensional digital environment. *Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2018;6(3):153–164. (In Russ.) Available at: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=503>

7. Orlova D.E. Stability of solutions in ensuring the functioning of organizational and technical systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2018;6(1):325–336. (In Russ.) Available at: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=451>

8. Neittaanmäki P., Repin S., Tuovinen T. (eds). *Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures; Series: Computational Methods in Applied Sciences*. Springer International Publishing AG, Switzerland; 2016. Available at: <https://www.springer.com/gp/book/9783319235639>

9. Erasov S.V. The optimization processes of the electrodynamic problems. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii*. 2013;(10):20–26. (In Russ.)

10. Lvovich Ya.E., Pitolin A.V., Sorokin S.O. Multi-aspect digital environment design optimization of homogeneous objects system based on the procedures of decomposition and aggregation. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2019;7(2):186–195. (In Russ.) DOI: 10.26102/2310-6018/2019.25.2.024.

Информация об авторах

Львович Игорь Яковлевич, доктор технических наук, ректор Воронежского института высоких технологий, Россия, 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 73А; e-mail: office@vivt.ru

Львович Яков Евсеевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования и информационных систем Воронежского государственного технического университета, Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Преображенский Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем и технологий Воронежского института высоких технологий, Россия, 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 73А; e-mail: Komkovvivt@yandex.ru

Преображенский Юрий Петрович, канд. техн. наук, профессор кафедры информационных систем и технологий Воронежского института высоких технологий, Россия, 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 73А; e-mail: petrovich@vivt.ru

Чопоров Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры систем информационной безопасности Воронежского государственного технического университета, Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84; e-mail: choporov_oleg@mail.ru

Information about the authors

Igor Ya. Lvovich, Doctor of Technical Sciences, Rector of the Voronezh Institute of High Technologies, 73-A Lenina Str., Voronezh, 394043, Russia; e-mail: office@vivt.ru

Yakov E. Lvovich, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Computer Aided Design and Information Systems, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, 394006, Russia

Andrey P. Preobrazhensky, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Voronezh Institute of High Technologies, 73-A Lenina Str., Voronezh, 394043, Russia; e-mail: Komkovvivt@yandex.ru

Yuri P. Preobrazhensky, PhD., Professor, Department of Information Systems and Technologies, Voronezh Institute of High Technologies, 73-A Lenina Str., Voronezh, 394043, Russia; e-mail: petrovich@vivt.ru

Oleg N. Choporov, Doctor of Technical Sciences, Department of Information Security Systems, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, 394006, Russia; e-mail: choporov_oleg@mail.ru

Поступила / Received: 10.03.2021

Принята в печать / Accepted: 25.03.2021

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, представляющей 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

2021, Vol. 5, No. 1

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>

Price is free

УРАЛЬСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2021, Т. 5, № 1

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

Включен в Объединенный каталог «Пресса России».
Индекс 33049

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 20.04.2021. 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>

Цена свободная



URAL JOURNAL
RADIO ENGINEERING