

На правах рукописи



Герасимов Игорь Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОЛОСКОВЫХ И ПЛАНАРНЫХ
АНТЕНН АБОНЕНТСКИХ СТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ БАЗОВЫХ
ИЗЛУЧАЮЩИХ СТРУКТУР С УЧЁТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ
РАЗМЕЩЕНИЯ**

Специальность:

05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ФГБОУ ВО ПГУТИ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Минкин Марк Абрамович**

Официальные оппоненты:

Пиганов Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет), г. Самара. Профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств.

Томашевич Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», г. Санкт-Петербург. Заведующий кафедрой радиосистем и обработки сигналов.

Ведущая организация:

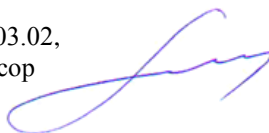
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится 13.12.2019 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 219.003.02 при ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» по адресу: 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО ПГУТИ и на сайте www.psuti.ru.

Автореферат разослан " __ " _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 219.003.02,
доктор технических наук, профессор



А.И. Тяжев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Развитие средств подвижной радиосвязи в последние годы связано с постоянно меняющимися тенденциями и установкой новых приоритетов и направлений в этой области. Это отражается на требованиях к надёжности устройств, безопасности их использования для человека и окружающей среды, к сохранению стабильности заложенных параметров при различных условиях эксплуатации и внешних воздействиях, к прочности конструкции. Также немаловажен внешний вид изделия, который должен отвечать современным эстетическим веяниям. Причём все эти факторы необходимо учитывать на фоне непрекращающейся модернизации существующих устройств (изделий) в плане улучшения их характеристик и расширения функциональных возможностей, что ещё больше усложняет задачи проектирования. Обозначенные тенденции заставляют искать новые актуальные конструктивно-технические решения, которые будут удовлетворять этим требованиям.

Антенна, размещаемая на подвижном объекте, является одним из ключевых устройств системы, обеспечивающим эффективную передачу и приём сигналов. Её характеристики обуславливают стабильность сеансов связи и поддерживают должный уровень сигнала при перемещении объекта в зоне действия абонентской станции.

Анализируя совокупность всех обозначенных факторов и требований, можно сделать выводы об острой необходимости создания более совершенных подходов и методик по проектированию как самих радиосистем, так и их составных частей.

Таким образом, в настоящее время существует **актуальная научно-техническая проблема** создания нового поколения антенн абонентских станций подвижной радиосвязи, адаптированных к особенностям их размещения.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время существует огромное количество работ, посвященных полосковым и планарным антеннам, как в России, так и за рубежом. Среди авторов, занимающихся данной тематикой, можно отметить Дешамса Г.А. (Deschams G.A.), Джеймса Дж. Р. (James J.R.), Нефёдова Е.И., Панченко Б.А., Позара Д.М. (Pozar D.M.), Холла П.С. (Hall P.S.) и других ученых. В работах рассмотрены различные конструктивно-технические решения антенн полоскового и планарного типов, содержатся результаты анализа их исследований, а также задачи проектирования излучающих структур с требуемыми электрическими и конструктивными параметрами.

В целом, проведенный анализ степени разработанности темы исследования показал, что вопросы разработки антенн полоскового и планарного типов для абонентских станций систем подвижной радиосвязи, а также вопросы разработки новых методик их проектирования с учётом обозначен-

ных тенденций являются актуальными и требующими дальнейших исследований.

Цель работы – исследование и разработка антенн на основе полосковых и планарных излучающих структур с учетом особенностей их размещения на подвижных объектах и в абонентских устройствах.

Задачи исследований:

- анализ основных конструктивных особенностей полосковых и планарных антенн;
- анализ методов расчёта характеристик излучающих структур;
- разработка расширенной классификации полосковых и планарных антенн;
- исследование основных характеристик базовых излучающих структур на основе строгих электродинамических методов;
- разработка методики проектирования полосковых и планарных антенн;
- разработка и исследование одно- и многодиапазонных полосковых и планарных антенн для размещения в абонентских устройствах;
- разработка и исследование полосковых антенн для размещения на поверхностях подвижных объектов;
- исследование уровней поля полосковой антенны при установке на крыше автомобиля в целях обеспечения электромагнитной безопасности;
- исследование влияния климатических и механических факторов на параметры антенн;
- экспериментальные исследования полосковой антенны, размещенной на подвижном объекте;
- экспериментальные исследования полосковой антенны, размещенной в абонентском устройстве;
- практическая реализация результатов диссертационной работы при создании антенн полоскового типа.

Объект исследований – полосковые и планарные антенны.

Предмет исследований – базовые решения и методики проектирования полосковых и планарных антенн.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны научно-технические основы создания полосковых и планарных антенн абонентских станций подвижной радиосвязи с учётом особенностей их размещения: разработана расширенная классификация полосковых и планарных антенн по конструкционным и электрическим параметрам, обоснована номенклатура базовых излучающих структур, определены возможные пути построения базовых излучающих структур для различных условий размещения, проведены их исследование и систематизация как основа проектирования антенн абонентских станций подвижной радиосвязи, установлены взаимосвязи их конструктивных параметров, условий эксплуатации и реализуемых электрических характеристик.

2. Разработана методика проектирования полосковых и планарных антенн абонентских станций подвижной радиосвязи на основе базовых излучающих структур, обеспечивающая комплексный учет требований назначения, условий размещения, климатических и механических воздействий, требований электромагнитной безопасности.

3. Получены новые результаты расчетных и экспериментальных исследований полосковых и планарных антенн с учетом особенностей их размещения на подвижных объектах с металлическими и диэлектрическими кузовами, внешних воздействий и требований электромагнитной безопасности, а также одно- и многодиапазонных планарных антенн для размещения в абонентских устройствах.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанные в диссертации научно-технические основы создания полосковых и планарных антенн абонентских станций подвижной радиосвязи с учётом особенностей их размещения, включая расширенную классификацию полосковых и планарных антенн, обоснованную номенклатуру базовых излучающих структур, установленные взаимосвязи их конструктивных параметров, условий эксплуатации и реализуемых электрических характеристик, расширяют знания в области теории и техники антенн и создают достаточно универсальную базу для проектирования полосковых и планарных антенн различного назначения для различных условий размещения и эксплуатации.

Разработанная методика проектирования полосковых и планарных антенн на основе базовых излучающих структур обеспечивает возможность проектирования антенн для размещения на объектах с различными электрофизическими характеристиками и комплексный учет требований назначения, стойкости к внешним воздействиям и электромагнитной безопасности.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы, при активном непосредственном участии автора, успешно внедрены на предприятиях России. Реализация результатов работы и достигнутый эффект подтверждены соответствующими актами.

Соответствие рассматриваемой специальности

Диссертационная работа **соответствует** п. 1, 2 паспорта специальности 05.12.07.

Методы исследований

При выполнении диссертационной работы использовались методы математического моделирования, вычислительной электродинамики, физического эксперимента, теории антенн, численные методы.

Обоснованность и достоверность результатов

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечиваются адекватностью использованных методов и построенных на их основе рас-

четных моделей. Достоверность результатов работы подтверждается результатами сопоставления расчетных и экспериментальных данных, а также результатами внедрения разработанной методики.

Личный вклад автора

Основные результаты диссертационной работы, обладающие научной новизной и выносимые на защиту, получены автором **лично**. В научных трудах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат разработка расширенной классификации, математических моделей и методик, а также результаты исследования характеристик базовых излучающих структур и антенн на их основе.

Положения, выносимые на защиту:

1) Разработанная в диссертации расширенная классификация полосковых и планарных антенн абонентских станций подвижной радиосвязи и объектов их установки по конструкционным и электрическим параметрам, обоснованная номенклатура и результаты исследования базовых полосковых и планарных излучающих структур образуют основу проектирования антенн абонентских станций подвижной радиосвязи.

2) Разработанная методика проектирования полосковых и планарных антенн абонентских станций подвижной радиосвязи на основе базовых излучающих структур обеспечивает комплексный учет требований назначения, условий размещения, климатических и механических воздействий, требований электромагнитной безопасности.

3) Полученные новые результаты теоретических и экспериментальных исследований полосковых и планарных антенн с учетом особенностей их размещения расширяют знания о характеристиках антенн при их установке на подвижных объектах и в абонентских устройствах с учетом характеристик объектов, внешних воздействий и требований электромагнитной безопасности.

Апробация результатов работы и публикации

Основные результаты по теме диссертационного исследования докладывались на XXII – XXVI Российских научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ (Самара, 2015 – 2019), XV, XVII, XVIII Международных научно-технических конференциях «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (Казань, 2014; Самара, 2016; Казань, 2017), IX, X Всероссийских межведомственных научных конференциях «Актуальные направления развития систем охраны, специальной связи и информации для нужд государственного управления» (Орёл, 2015, 2017), III Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации» (Красноярск, 2016), XIX внеочередной международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-18» (Уральск, 2018), XIII, XVI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Казань, 2015; Миасс,

2018).

По тематике диссертационных исследований автором (лично и в соавторстве) опубликовано 22 печатных труда. Основные научные и прикладные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 научных статьях в журналах, входящих в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук», в двух подразделах научной монографии, в 16 публикациях в форме тезисов докладов.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем работы составляет 189 страниц, включая 186 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 145 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, указана степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследований, указаны предмет и объект исследований, показаны научная новизна и теоретическая и практическая значимость работы, описана реализация результатов работы, указано соответствие рассматриваемой специальности, указаны используемые методы исследований, показаны обоснованность и достоверность результатов, приведены положения, выносимые на защиту, даны сведения об апробации результатов работы и о публикациях.

Раздел 1 посвящен анализу принципов реализации и основных характеристик полосковых и планарных антенн с учетом особенностей размещения.

Выполнен анализ основных конструктивных особенностей полосковых и планарных антенн и способы их построения. Рассмотрены основные элементы антенной структуры и определено влияние каждого из них на достижение конечных электрических и геометрических параметров антенны.

Проведён анализ актуальных конструктивно-технических решений с точки зрения тематики исследований данной работы и эффективности использования в современных устройствах.

Рассмотрен вопрос обеспечения электромагнитной безопасности на основе анализа действующей нормативной базы и определены основные требования, предъявляемые к абонентским станциям систем радиосвязи.

Проведён анализ методов расчёта антенн, как наиболее эффективных с точки зрения целей исследования, а именно: метод конечных разностей во временной области (Finite Difference Time Domain, FDTD), метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM), метод моментов (Method of Moments, MoM). Определены их основные достоинства и недостатки и вопросы применимости к решению конкретных электродинамических задач.

Уравнения, описывающие поле в идеальном проводнике, имеют вид:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E}^i(x) = -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \mathbf{n} \times \int_S (-\omega^2 \mu \epsilon \mathbf{J}_s \phi + \text{Div}(\mathbf{J}_s) \mathbf{grad}'(\phi)) ds', \quad x \in S \quad (1)$$

$$\mathbf{J}_s = 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}^i(x) + \frac{1}{2\pi} \mathbf{n} \times \int_S (\mathbf{J}_s \times \mathbf{grad}'(\phi)) ds', \quad x \in S$$

где $\mathbf{E}^i(x)$ и $\mathbf{H}^i(x)$ – комплексные вектора, описывающие поле, падающее на проводник, \mathbf{J}_s – плотность поверхностного тока, \mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали к поверхности, ω – круговая частота поля, ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, Div – операция дивергенции, действующей на координаты источника, ϕ – скалярный электрический потенциал.

Поверхностные интегральные уравнения, описывающие поле в диэлектрическом теле имеют следующий вид:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E}^i(x) = \frac{1}{4\pi} \mathbf{n} \times \int_S \left(i\omega\mu(\mathbf{n}' \times \mathbf{H})(\phi_1 + \phi_2) - (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \times \mathbf{grad}'(\phi_1 + \phi_2) - \right. \\ \left. - (\mathbf{n}' \cdot \mathbf{E}) \left(\phi_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \phi_2 \right) \right) ds', \quad (2)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H}^i(x) = -\frac{1}{4\pi} \mathbf{n} \times \int_S \left(i\omega\epsilon_1(\mathbf{n}' \times \mathbf{E}) \left(\phi_1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \phi_2 \right) + (\mathbf{n}' \times \mathbf{H}) \times \mathbf{grad}'(\phi_1 + \phi_2) + \right. \\ \left. + (\mathbf{n}' \cdot \mathbf{H}) \mathbf{grad}'(\phi_1 + \phi_2) \right) ds',$$

$x \in S$

где ϕ_1 и ϕ_2 – скалярный электрический потенциал соответственно воздушной и диэлектрической сред, ϵ_1 и ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость воздушной и диэлектрической сред, \mathbf{n}' – единичный вектор внешней нормали в источнике.

В методе объёмного интегрального уравнения в диэлектрическом теле на основе распределения связанных источников по всему объёму поле описывается следующим уравнением:

$$\mathbf{E}(x) = \mathbf{E}^i(x) + \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_1} \omega^2 \mu \epsilon_1 \mathbf{E} \phi dV + \frac{1}{4\pi} \int_S \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_1} (\mathbf{n}' \cdot \mathbf{E}) \mathbf{grad}'(\phi) \right) ds', \quad (3)$$

$x \in V$

Использование уравнения (3) позволяет учитывать неоднородность диэлектрика без усложнения объёмного интеграла, что освобождает от необходимости пересчёта постоянных распространения в теле.

Таким образом, для задач исследования в данной работе метод моментов является наиболее подходящим, поскольку позволяет с высокой точностью описывать объекты с математической точки зрения и получать результаты расчётов максимально приближённые к реальным.

Рассмотрен метод расчёта приближенных моделей излучающих полосковых структур в виде цепей с распределенными и сосредоточенными параметрами.

Рассмотрены программные комплексы для электродинамического рас-

чёта FEKO, CST Microwave Studio, HFSS, основными достоинствами которых являются возможность выбора заложенных методов, как по отдельности, так и совместно, высокая точность вычислений, хорошая визуализация при построении объектов и выводе результатов.

Для расчёта базовых излучающих структур и антенн в представленной работе выбор был остановлен на программе FEKO, позволяющей получить высокую точность расчётов благодаря использованию метода моментов, а также за счёт относительной простоты моделирования полосковых и планарных структур и объектов установки с возможностью включения элементов из диэлектрических материалов с заданными свойствами.

Раздел 2 посвящен разработке расширенной классификации полосковых и планарных антенн, номенклатуре базовых излучающих структур и их исследованию.

На основе существующей классификации антенн полоскового типа разработана расширенная классификация полосковых и планарных антенн по конструкционным и электрическим параметрам. В основу данной классификации положены следующие дополнительные классификационные признаки: по наличию пассивных элементов, по наличию радиопрозрачного укрытия, по размещению излучателя и экрана друг относительно друга и определено их влияние на достижение конечных параметров излучающей структуры.

На основе анализа известных работ, а также существующих конструктивно-технических решений и в соответствии с расширенной классификацией была разработана номенклатура базовых излучающих структур. Она представляет собой набор из 11 систематизированных конструктивных решений, варьирование геометрии которых позволяет достигать требуемых параметров при минимальном числе циклов параметрической оптимизации. Базовые структуры №1 – 7 полоскового типа, а №8 – 11 – планарного.

В качестве примера, на рис. 1 представлена многорядная многоуровневая полосковая базовая структура №4, которая состоит из полосков, расположенных в разных горизонтальных плоскостях и соединённых с основанием короткозамыкающей пластиной.

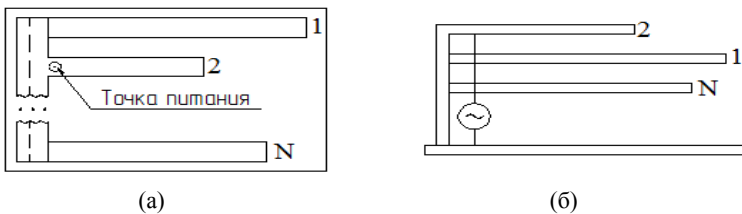


Рис. 1

Конструктивное исполнение может быть как в виде многослойной печатной платы, так и с воздушным заполнением.

На рис. 2 представлена планарная базовая структура №10 на основе

электромагнитной связи с одним пассивным полоском.

Расчёт характеристик базовых излучающих структур осуществлялся посредством электродинамического расчёта в среде программного комплекса FEKO. По полученным результатам был построен ряд зависимостей, позволяющих систематизировать базовые излучающие структуры исходя из особенностей размещения.

На рис. 3 представлены результаты расчёта планарной базовой структуры №10. Варьируемым параметром, в данном случае, является расстояние между активным и пассивным полосками.

Аналогичным образом проводился расчёт всех базовых излучающих структур, по результатам которого была установлена взаимосвязь конструктивных параметров, условий эксплуатации и реализуемых электрических характеристик.

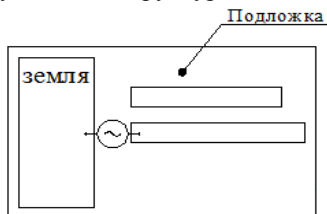


Рис. 2

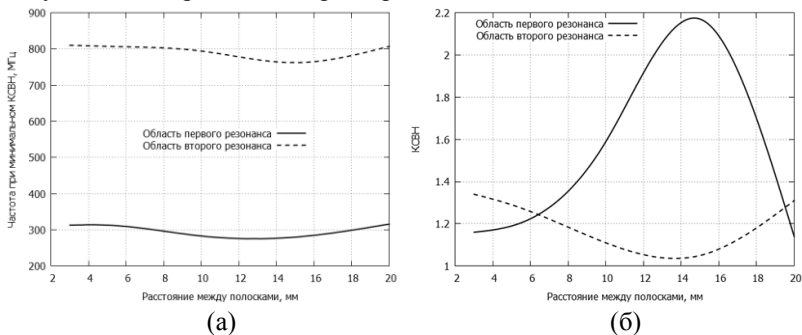


Рис. 3

В разделе 3 представлены результаты разработки и исследования полосковых и планарных антенн абонентских станций и методики их проектирования.

Разработана методика проектирования полосковых и планарных антенн абонентских станций подвижной радиосвязи на основе базовых излучающих структур, обеспечивающая комплексный учет требований назначения, условий размещения, климатических и механических воздействий, требований электромагнитной безопасности.

Первоочередным критерием выбора является определение области применения. Под этим понимается анализ объекта установки, его геометрические параметры и конструктивные особенности. Здесь разделение идёт на подвижные объекты (автомобили, поезда, вертолёты, катера и т.д.) и абонентские устройства (средства мобильной связи, планшеты и т.д.)

Затем осуществляется анализ предъявляемых требований и определяется их возможное отклонение при заданных условиях эксплуатации. При установке на подвижных объектах следует учитывать материал подстилаю-

щей поверхности. Это может быть металл, диэлектрик, либо композит. По результатам данного этапа из номенклатуры выбирается базовая излучающих структур, наиболее подходящая для реализации параметров назначения и в соответствии с рабочими частотами определяются её предварительные геометрические параметры.

Стоит отметить, что полосковые базовые структуры №1-7 могут использоваться как при установке на подвижных объектах, так и в абонентских устройствах. Однако, антенны для абонентских устройств, реализованные на полосковых базовых структурах, ввиду их конструктивных особенностей, связанных с наличием определённой высоты, обязательно должны проходить предварительную оценку на предмет их размещения в пространстве, ограниченном внутренней областью объекта. К планарным базовым структурам №8-11, используемым только в абонентских устройствах, таких требований не предъявляется.

Следующим этапом является расчёт характеристик при заданных условиях эксплуатации, которые включают в себя максимальную и минимально допустимую температуру окружающей среды, влажность, осадки в виде дождя и снега, вибрации, аэродинамические нагрузки. Если рассматриваемая излучающая структура не обеспечивает должную работоспособность при требуемых условиях, то в конструкцию включается радиопрозрачное укрытие и расчёт проводится заново. Если данное решение не обеспечило нужный результат, то весь процесс возвращается к стадии анализа предъявляемых требований, после которого выбирается другая базовая излучающая структура и весь цикл повторяется заново.

При наличии требований к обеспечению электромагнитной безопасности проводится анализ электромагнитного поля, создаваемого излучающей структурой. Регулировать данное воздействие на человека можно путём изменения положения на объекте установки, при условии, что это допускается. Если электромагнитный фактор минимизировать не удаётся, то необходимо опять вернуться к этапу анализа предъявляемых требований, выбрать другую базовую излучающую структуру с последующим повторением всех этапов.

На завершающей стадии осуществляется окончательный расчёт характеристик полученной антенны, реализованной на базе выбранной излучающей структуры. При удовлетворении предъявляемым требованиям процесс проектирования считается завершённым. В противном случае проводится многопараметрическая оптимизация. При получении неудовлетворительных результатов процесс разработки начинается со стадии анализа требований по назначению и весь цикл проектирования повторяется снова для другой базовой излучающей структурой.

Процесс разработки антенн для абонентских устройств при использовании данной методики аналогичен процессу проектирования антенн для подвижных объектов за исключением отсутствия этапов обеспечения стой-

кости к внешним воздействиям, выбора радиопрозрачного укрытия и электромагнитной безопасности, что обусловлено спецификой их применения.

На основе проведенного анализа уровней поля низкопрофильной антенны в нижнем полупространстве рассмотрены вопросы обеспечения электромагнитной безопасности, в том числе при установке антенны на диэлектрической крыше автомобиля.

Результаты анализа фактора электромагнитной безопасности приведены в таблице 1.

Таблица 1

Размеры основания, мм x мм	Плотность потока энергии при мощности передатчика 15 Вт, мкВт/см ²	Допустимое время воздействия в течение суток, ч
340 x 170	752	0,3
1000 x 500	320	0,625
2310 x 1610	220	0,9

На основе разработанной методики проектирования полосковых и планарных антенн абонентских станций подвижной радиосвязи разработаны полосковые (рис. 4а) и планарные (рис.4б) антенны на основе базовых излучающих структур, в том числе на базе их комбинаций. Полученные результаты подтверждают состоятельность разработанной методики.

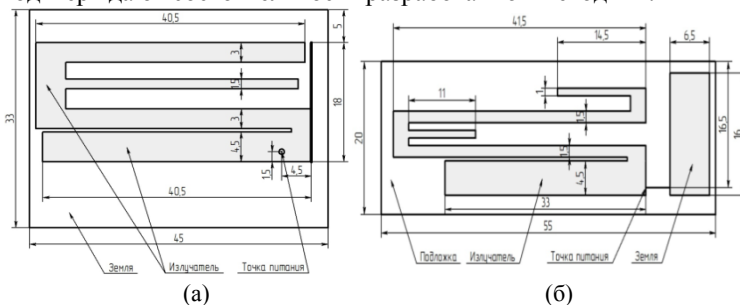


Рис. 4

Антенна на основе планарной базовой структуры является несколько более широкополосной (рис. 5б) по сравнению с полосковой (рис.5а).

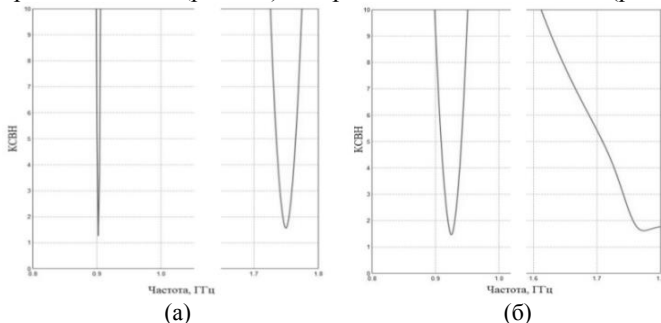


Рис. 5

Направления главного излучения в вертикальной плоскости (рис.6а) не ориентированы горизонтально, однако уровни излучения в горизонтальном направлении имеют приемлемые значения. Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости (рис.6б) в достаточной степени близки к круговым: неравномерность не превышает $\pm 2,5$ дБ.

Таким образом, разработанная методика позволяет проектировать антенны не только на основе базовых излучающих структур, но и создавать более сложные решения на основе их комбинаций.

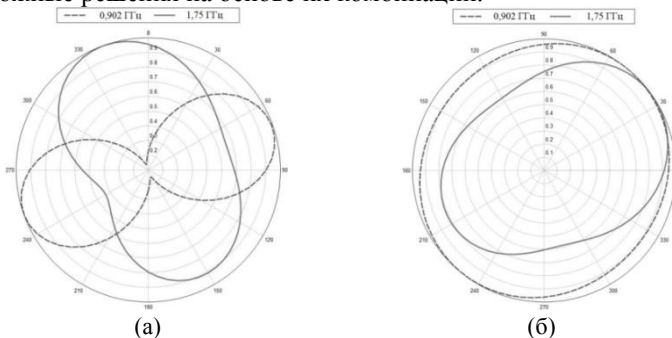


Рис. 6

Проведены исследования характеристик разработанных низкопрофильных антенн на основе полосковых структур, устанавливаемых на подвижных объектах, в частности, автомобилях, в том числе при наличии радиопрозрачного укрытия. Так на рис. 7 представлены результаты расчёта КСВН в рабочем диапазоне. Как видно из рисунка при установке на диэлектрической крыше штыревая антенна демонстрирует полное рассогласование, в то время как низкопрофильная антенна сохраняет работоспособность.

Было проведено исследование характера распределения поля и его интенсивности в объеме, ограниченном салоном автомобиля. Оценка интенсивности излучения проводится по значению плотности потока энергии при установке исследуемых антенн на диэлектрической крыше автомобиля. Результаты расчётов представлены на рис. 8.

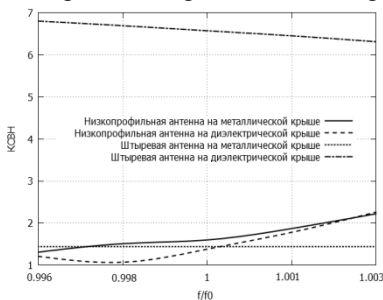


Рис. 7

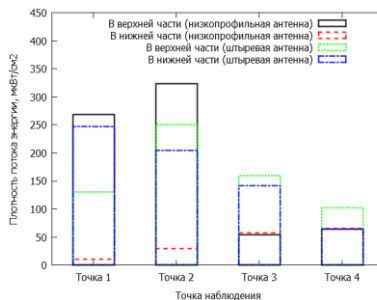


Рис. 8

Несмотря на обеспечение штыревыми антеннами предъявляемых требований, очевидна перспектива их замены на низкопрофильные, поскольку низкопрофильная антенна имеет сопоставимые и даже несколько лучшие характеристики, а также обладает конструктивными преимуществами и возможностью реализации, к примеру, таких свойств как многодиапазонность.

Немаловажен вопрос, влияния на характеристики места размещения непосредственно на самом подвижном объекте. Для определения этой зависимости были проведены исследования при различных вариантах установки антенны на автомобиле. Было рассмотрено (рис.9) 5 вариантов: 1) на крышке капота; 2) на крыше около лобового стекла; 3) на крыше посередине; 4) на крыше около заднего стекла; 5) на крышке багажника.

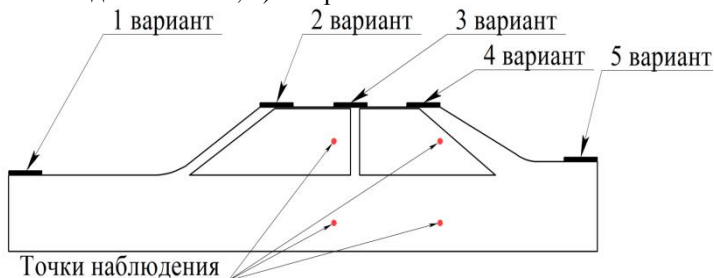


Рис.9

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что наиболее приемлемым является 3 вариант. С точки зрения диаграммы направленности и степени согласованности в этом случае демонстрируются оптимальное сочетание данных параметров по сравнению с остальными вариантами.

Было проведено исследование влияние внешних факторов на характеристики антенны. На рис. 10 представлена модель исследуемой антенны дециметрового диапазона с радиопрозрачным укрытием. В качестве материала укрытия использовался стеклотекстолит, металлические части выполнены из алюминия.

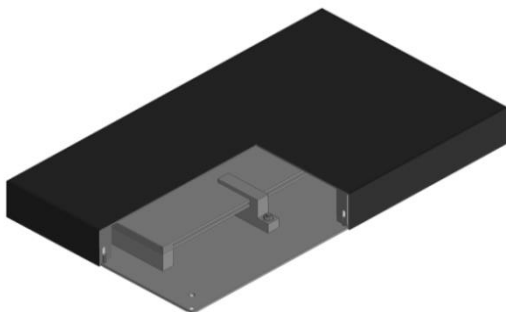


Рис.10

На рис. 11 - 13 представлены результаты расчёта характеристик при воздействиях вибрации, температуры, снега и льда. Проведенные исследования влияния климатических и механических факторов на электрические параметры

антенн подтвердили необходимость их учета на стадии проектирования.

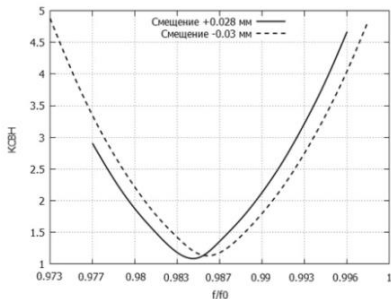


Рис.11

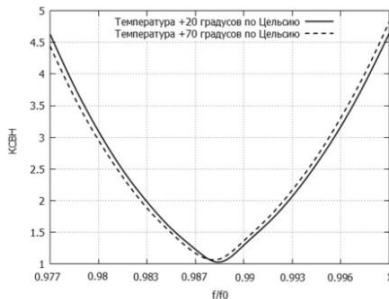


Рис.12

В разделе 4 представлены результаты практической реализации и экспериментального исследования полосковых антенн, размещаемых на поверхностях подвижных объектов и в абонентских устройствах.

На основании уже имеющихся разработок и результатов проведённых исследований, была спроектирована низкопрофильная антенна дециметрового диапазона, обеспечивающая связь абонента, находящегося в автомобиле, с базовой станцией. Для подтверждения адекватности разработанной методики были проведены натурные испытания на предмет соответствия заложенным требованиям. Внешний вид антенны, размещённой на машине, представлен на рис. 14а. Результаты расчета KСВН (рис.14б) подтвердили правильность технических решений, заложенных в изделии. Соответствие предъявляемым требованиям позволяет говорить об адекватности результатов проведённых исследований, используемых при проектировании.

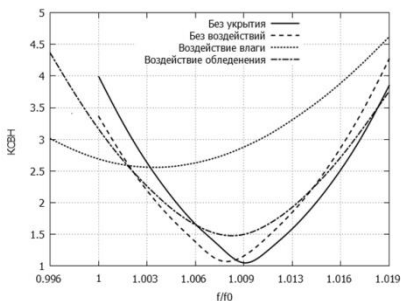
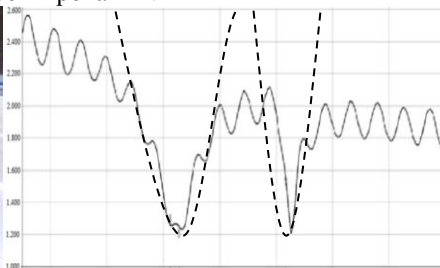


Рис.13



(а)



(б)

Рис. 14

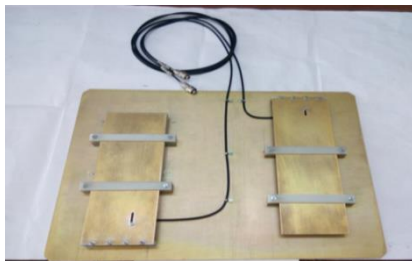
Испытания проводилось на открытой местности, что позволило макси-

мально устранить возможные причины погрешности измерений в виде близко расположенных зданий и отражающих объектов.

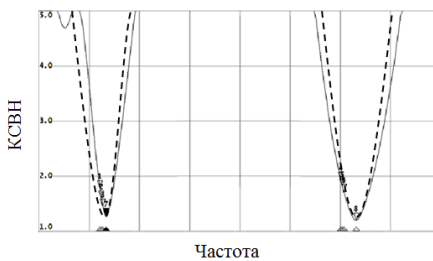
Было также проведено экспериментальное исследование полосковой антенны, устанавливаемой в абонентском устройстве (рис.15а).

На рис.15б сплошной кривой представлена характеристика после окончательной настройки при оптимальном положении точки питания. Характеристики получены с помощью измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения «Обзор-304/1». На оси абсцисс (частота) ширина шага составляет 5 МГц.

Полоса частот приёма (на графике справа) достаточно широкая, благодаря чему обеспечивается удовлетворительное согласование во всём диапазоне даже с учётом допустимого смещения частоты при размещении в абонентском устройстве. Полоса частот передачи несколько уже, однако, также удовлетворяет предъявляемым требованиям.



(а)



(б)

Рис. 15

Пунктирной кривой показаны расчётные характеристики, полученные в ходе проведения электродинамических расчётов в среде программного комплекса FEKO. Их соответствие с полученными в ходе эксперимента подтвердило правильность выбранного конструктивно-технического решения.

На основании анализа результатов проведённых испытаний можно утверждать, что методика, использованная для разработки антенны, размещаемой в абонентском устройстве, подтвердила свою эффективность. Соответствие конечных параметров антенны требуемым говорит о правильности выбора нужного варианта конструкции из номенклатуры базовых излучающих структур.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

В приложении А приведены графики зависимости характеристик плосковых базовых излучающих структур от варьирования различных геометрических параметров.

В приложении Б приведены графики зависимости характеристик планарных базовых излучающих структур от варьирования различных геометрических параметров.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проанализированы основные конструктивные особенности полосковых и планарных антенн и способы их построения. Рассмотрены актуальные конструктивно-технические решения (IFA, PIFA и PCB антенны).

2. Проведён анализ методов, используемых для расчёта характеристик излучающих структур и программных средств для электродинамического моделирования. Выбор был остановлен на программе FEKO, позволяющей получить точные результаты благодаря использованию метода моментов, а также из-за достаточной простоты моделирования полосковых (планарных) антенн и объектов установки с возможностью включения элементов из диэлектрических материалов с заданными свойствами. Рассмотрен метод расчёта приближенных моделей излучающих полосковых структур в виде цепей с распределенными и сосредоточенными параметрами.

3. Разработана расширенная классификация полосковых и планарных антенн по конструкционным и электрическим параметрам. Конструктивное разделение проведено по форме излучателя, по типу подложки, по наличию пассивных элементов, по характеру возбуждения, по наличию РПУ, по расположению излучателя относительно земли.

4. Разработаны, исследованы и систематизированы базовые полосковые и планарные излучающие структуры как основа проектирования антенн абонентских станций подвижной радиосвязи, установлена взаимосвязь их конструктивных параметров, условий эксплуатации и реализуемых электрических характеристик. Проведено обоснование номенклатуры базовых излучающих структур.

5. Разработана методика проектирования полосковых и планарных антенн абонентских станций подвижной радиосвязи на основе базовых излучающих структур, обеспечивающая комплексный учет требований назначения, условий размещения, климатических и механических воздействий, требований электромагнитной безопасности.

6. С использованием разработанной методики проектирования полосковых и планарных антенн абонентских станций подвижной радиосвязи разработаны полосковые и планарные антенны на основе базовых излучающих структур и их комбинаций. Полученные результаты подтверждают состоятельность разработанной методики.

7. Проведены исследования характеристик разработанных полосковых антенн, устанавливаемых на подвижных объектах, в частности, автомобилях, в том числе при наличии радиопрозрачного укрытия. Обоснована перспективность использования антенн данного типа по сравнению с штыревыми.

8. Проведён анализ уровней поля полосковой антенны в нижнем полупространстве, рассмотрены вопросы обеспечения электромагнитной безопасности при установке антенны на металлической и диэлектрической

крышах автомобиля в соответствии с актуальной нормативной базой.

9. Проведенные исследования влияния климатических и механических факторов на электрические параметры антенн подтвердили необходимость их учета на стадии проектирования.

10. Проведены экспериментальные исследования разработанной плосковой антенны дециметрового диапазона при ее установке на автомобиле. Установлено хорошее соответствие экспериментальных характеристик расчетным, что подтверждает достоверность результатов исследований и состоятельность разработанной методики проектирования.

11. Проведены экспериментальные исследования разработанной плосковой антенны, установленной в корпусе носимого абонентского устройства. Полученное соответствие экспериментальных данных расчетным, в том числе – в части влияния корпуса и других условий размещения на характеристики антенны, подтверждает достоверность результатов исследований и состоятельность разработанной методики проектирования.

12. Результаты диссертационной работы, при активном непосредственном участии автора, успешно внедрены на предприятиях России. Реализация результатов работы и достигнутый эффект подтверждены соответствующими актами.

Перспективное направление дальнейших исследований по тематике диссертационной работы связано с расширением номенклатуры базовых излучающих структур, развитием методов разработки антенн с более сложными конструктивно-техническими решениями, в том числе со структурами, адаптируемыми к условиям размещения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Аронов, С.Ю. Исследование влияния климатических и механических факторов на характеристики полосковых антенн, размещаемых в диэлектрических укрытиях [Текст] / С.Ю. Аронов, И.А. Герасимов, М.А. Минкин // Радиотехника. – 2015. – №4. – С. 6-11.

2. Герасимов, И.А. Исследование ближнего поля, создаваемого низкопрофильной антенной, установленной на диэлектрической крыше автомобиля [Текст] / И.А. Герасимов, М.А. Минкин // Радиотехника. – 2016. – №4. – С.100-104.

3. Герасимов, И.А. Сравнительный анализ характеристик низкопрофильной и штыревой антенн автомобильных абонентских радиостанций [Текст] / И.А. Герасимов, М.А. Минкин // Антенны. – 2017. – №4. – с. 48-54.

4. Герасимов, И.А. Методика проектирования полосковых антенн абонентских станций систем подвижной радиосвязи с учётом особенностей размещения [Текст] / И.А. Герасимов // Радиотехника. – 2019. – №6. – С.30-34.

Коллективная монография:

5. Аронов, С.Ю. Низкопрофильные, полосковые и компланарные антенны абонентских станций: Подраздел монографии [Текст] / С.Ю. Аронов, Р.Н. Асадуллин, А.Л. Бузов, И.А. Герасимов // Специальная радиосвязь. Развитие и модернизация оборудования и объектов. Монография. / Под ред. А.Л. Бузова, С.А. Букашкина. – М.: Радиотехника, 2017. – 448 с. – С. 84-99.

6. Аронов, С.Ю. Совершенствование технологий проектирования и создания оборудования и объектов специальной радиосвязи: Подраздел монографии [Текст] / С.Ю. Аронов, А.Л. Бузов, И.А. Герасимов, М.А. Минкин // Специальная радиосвязь. Развитие и модернизация оборудования и объектов. Монография. / Под ред. А.Л. Бузова, С.А. Букашкина. – М.: Радиотехника, 2017. – 448 с. – С. 224-239.

Тезисы и доклады на конференциях:

7. Аронов, С.Ю. Вопросы совершенствования малогабаритных низкопрофильных антенн подвижной радиосвязи [Текст] / С.Ю. Аронов, А.Л. Бузов, И.А. Герасимов // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТИТТ-14: материалы XV Международной научно-технической конференции – Т. 2. – Казань: Изд. КГТУ, 2014. – С. 11-13.

8. Аронов, С.Ю. Экспериментальные исследования низкопрофильных антенн дециметрового диапазона [Электронный ресурс] / С.Ю. Аронов, Р.Н. Асадуллин, И.А. Герасимов // XXII Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ФГБОУ ВПО ПГУТИ (ПГУТИ, 2.02.15 – 6.02.15): материалы конференции. – Самара, 2015. – С. 142. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

9. Аронов, С.Ю. Современные материалы, применяемые при изготовлении радиопрозрачных укрытий антенн и критерии их выбора [Электронный ресурс] / С.Ю. Аронов, И.А. Герасимов // XXII Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ФГБОУ ВПО ПГУТИ (ПГУТИ, 2.02.15 – 6.02.15): материалы конференции. – Самара, 2015. – С. 143. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

10. Герасимов, И.А. Перспективы создания малогабаритных многодиапазонных антенн подвижных объектов на основе низкопрофильных излучателей [Текст] / И.А. Герасимов, М.А. Минкин // Актуальные направления развития систем охраны, специальной связи и информации для нужд государственного управления: Материалы IX Всероссийской межведомственной научной конференции (Орел, 11-12 февраля 2015 г.). – Орел: Академия ФСО России, 2015. – С. 127 – 128.

11. Герасимов, И.А. Характеристики низкопрофильных антенн подвижной радиосвязи / И.А. Герасимов [Текст] // XIII международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов»: материалы конференции (Казань, 21-25 сентября 2015 г.). – Казань: Из-во Урал. ун-та, 2015. – С. 82 – 84.

12. Герасимов, И.А. Исследование поля низкопрофильной антенны, установленной на диэлектрической крыше автомобиля [Электронный ресурс] / И.А. Герасимов, М.А. Минкин // XXIII Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ФГБОУ ВО ПГУТИ (ПГУТИ, 1.02.16 – 5.02.16): материалы конференции. – Самара, 2016. – С. 174.

13. Герасимов, И.А. Полосковые и компланарные антенны для портативных абонентских устройств [Текст] / И.А. Герасимов // Тезисы докладов III Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации» (22 – 23 сентября 2016 г.). – Красноярск, 2016. – с. 303-306.

14. Герасимов, И.А. Математическое моделирование штыревой и низкопрофильной антенн при их размещении на крыше автомобиля [Электронный ресурс] / И.А. Герасимов // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: материалы XVII Международной научно-технической конференции (Самара, 22 – 24 ноября 2016 г.). – Самара: ПГУТИ, 2016. – С. 213-214. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

15. Бондарь, И.В. Применение актуальных средств в разработке конструкции интегрированного комплекса носимой аппаратуры усиления и передачи сигнала в сетях связи [Электронный ресурс] / И.В. Бондарь, В.А. Бражников, И.А. Герасимов, Л.Б. Косолапов // Материалы XXIV Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава,

научных сотрудников и аспирантов ФГБОУ ВО ПГУТИ (ПГУТИ, 30.01.17 – 3.02.17): материалы конференции. – Самара, 2017. – С. 190.

16. Герасимов, И.А. Классификация конструктивных и технологических решений плосковых антенн [Электронный ресурс] / И.А. Герасимов, М.А. Минкин // Материалы XXIV Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ФГБОУ ВО ПГУТИ (ПГУТИ, 30.01.17 – 3.02.17): материалы конференции. – Самара, 2017. – С. 201. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

17. Герасимов, И. А. Приближенные модели в проектировании антенн на основе полосковых структур [Текст] / И. А. Герасимов, М. А. Минкин // Сборник трудов X Всероссийской межведомственной научной конференции «Актуальные направления развития систем охраны, специальной связи и информации для нужд государственного управления» (Орел, Академия ФСО, 7 – 8 февраля 2017 г.) в 11 частях. – Орел: Академия ФСО России, 2017. – Ч. 8. – С.180-183.

18. Герасимов, И.А. Сравнительная оценка вариантов размещения низкопрофильной антенны на автомобиле [Электронный ресурс] / И.А. Герасимов // II научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии». XVIII Международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. – Т. 2. – с. 174-175. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

19. Герасимов, И.А. Исследование влияния кузова автомобиля на характеристики низкопрофильных антенн [Электронный ресурс] / И.А. Герасимов // XXV Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ФГБОУ ВО ПГУТИ: материалы конференции. – Самара, 2018. – С. 160. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

20. Аронов, С.Ю. Комплексное моделирование антенных систем подвижной радиосвязи на основе интеграции программных средств электродинамических и механических расчетов [Текст] / С.Ю. Аронов, А.Л. Бузов, И.А. Герасимов // Материалы XIX внеочередной международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-18». – Уральск, Республика Казахстан, 2018. – С. 204-205.

21. Герасимов, И.А. Формирование характеристик планарной антенны посредством оптимизации параметров пассивного элемента [Текст] / И.А. Герасимов, М.А. Минкин // Материалы XVI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». – Миасс, 2018. – с. 79 – 80.

22. Герасимов, И.А. Анализ зависимости характеристик планарных антенн от их геометрических параметров [Электронный ресурс] / И.А. Герасимов, М.А. Минкин // Материалы XXVI Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ФГБОУ ВО ПГУТИ (ПГУТИ, 4.02.19 – 7.02.19): материалы конференции. – Самара, 2019. – С. 168. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Подписано в печать 30.09.2019 г.

Формат 60 x 84/16. Бумага ксероксная. Печать оперативная.

Объем – 1 усл. п. л. Тираж 100 экз. Заказ № 2015.

Отпечатано в типографии ООО «Новая страница».

443022, г. Самара, пр. Кирова, 26, оф. 9; тел.: 229-23-17.