

На правах рукописи

Рубис Александр Анатольевич



**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНЫХ РЕШЕНИЙ
ПО РАЗВИТИЮ И МОДЕРНИЗАЦИИ АНТЕННЫХ СИСТЕМ
ПРИЕМНЫХ И ПЕРЕДАЮЩИХ КВ РАДИОЦЕНТРОВ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СУЩЕСТВЕННОЕ СОКРАЩЕНИЕ
ПЛОЩАДЕЙ АНТЕННЫХ ПОЛЕЙ**

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 на кафедре «Технологии исследований и инноваций специальной связи» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ФГБОУ ВО ПГУТИ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Бузов Александр Львович**

Официальные оппоненты:

Радионов Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород. Заведующий кафедрой «Общая и ядерная физика».

Седелников Юрий Евгеньевич, доктор технических наук, профессор. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань. Профессор кафедры радиотоники и микроволновых технологий.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича**», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 21.06.2019 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 <https://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

В настоящее время в России наблюдается качественный скачок в развитии радиосвязи КВ диапазона. Особенно актуальной КВ радиосвязь становится в случае чрезвычайных ситуаций вследствие возможного ограничения функционирования гражданских сетей.

Типовая система построения КВ связи уже не вполне удовлетворяет современным условиям и новым требованиям, предъявляемым к этой связи. Сложившаяся разветвленная структура передающих и приемных радиостанций, включающих масштабные и дорогостоящие антенные поля, ионосферно-волновые службы и каналообразующие средства, весьма громоздка и достаточно зависима от воздействия природных, техногенных и иных деструктивных факторов. Владение огромными земельными участками (или их аренда), поддержание работоспособности (боеготовности) объектов, их обслуживание, охрана, периодические технологические вырубки растительности на огромных антенных полях, постоянные ремонтные и аварийно-восстановительные работы, связанные, в том числе, с актами вандализма, и т.п. – все это весьма дорого и трудоемко.

Практика показала, что проблемы радиостанций КВ радиосвязи невозможно кардинально решить «паллиативными» техническими или организационными методами. В данном случае требуется комплексный подход, включающий в себя применение перспективных технологий связи (автоматизированная адаптация, помехоустойчивое кодирование, ММО и т.п.), снижение эксплуатационных издержек (уменьшение площадей антенных полей, повышение КПД передатчиков и т.п.), а также организационные вопросы, связанные с повышением оперативности предоставляемых услуг связи. Одной из ключевых проблем совершенствования сетей и объектов КВ радиосвязи является проблема комплексной модернизации антенно-фидерного оборудования.

Таким образом, в настоящее время существует **актуальная научно-техническая проблема** комплексной разработки теоретических вопросов и технических решений в целях создания перспективных антенных систем КВ радиосвязи с качественно улучшенными тактико-техническими характеристиками, обеспечивающих реализацию передовых телекоммуникационных технологий и экономию площадей земельных участков.

Степень разработанности темы исследования

КВ радиосвязь хорошо известна и широко используется на практике уже не один десяток лет. Вполне очевидно, что с этим связано и большое количество публикаций по данной тематике. Причем существующие работы посвящены самым разнообразным аспектам КВ радиосвязи, включая рассмотрение различных вариантов антенн, различных вариантов согласующих и фазированных устройств, вопросов распространения радиоволн, методов анализа и проектирования и т.п. В рамках данной работы наибольший инте-

рес представляли публикации, посвященные разработке различных приемных и передающих антенно-фидерных устройств (АФУ), в том числе, кольцевых антенных решеток (КАР), методам их анализа и синтеза, а также вопросам влияния подстилающей поверхности на характеристики антенн. Рассматриваемым вопросам посвящены работы Г.З. Айзенберга, С.П. Белоусова, А.Л. Бузова, Л.С. Казанского, Р. Кинга, А.Д. Красильникова, Г.А. Лаврова, М.А. Леонтовича, Е.Л. Фейнберга и многих других ученых.

Хорошо известны и изучены классические КВ антенны: вибраторные, ромбические, БС и другие. В настоящее время разработаны и продолжают разрабатываться различные новые типы КВ антенн: малогабаритные активные вибраторы, малогабаритные би- и триортогональные вибраторы, малогабаритные рамки, а также антенные решетки из этих элементов, как «нормального», так и «уменьшенного» радиуса.

Активно развиваются в настоящее время и фазированные антенные решетки в данном диапазоне. В работах рассматривается построение фазированных антенных решеток на базе КАР, включая исследования их характеристик и конфигураций антенных элементов. Также рассматриваются вопросы практического использования фазированных антенных решеток, в том числе, и в системах радиолокации.

К настоящему времени создано большое количество программных средств электродинамического анализа антенных систем, как коммерческих, так и свободно распространяемых. Среди таких программных средств можно отметить FEKO, SuperNEC, EMC Studio, EDEM, MMANA, Samant, Scater и др. Проанализировав достоинства и недостатки различных программных средств, а также их доступность для автора, в качестве основного средства электродинамического анализа антенн КВ диапазона был выбран программный комплекс (ПК) Scater.

В целом, проведенный анализ степени разработанности темы исследования показал, что, вопросы разработки перспективных антенных систем КВ диапазона с улучшенными характеристиками являются актуальными и требующими дальнейших исследований.

Цель работы – исследование и разработка научно-технических основ создания нового поколения антенных систем КВ радиочастот, обеспечивающих существенное сокращение площадей антенных полей.

Задачи исследований:

- анализ состояния, тенденций и основных проблем в области антенных систем КВ радиочастот, обоснование путей комплексного решения проблем, выбор методов исследований;
- исследование и совершенствование устройств одновременной работы передатчиков на общую антенну;
- разработка и исследование квазистационарной модели для анализа импедансных характеристик компактной малоэлементной передающей кольцевой антенной решетки;

- исследование компактных передающих кольцевых антенных решеток КВ диапазона;
- разработка и реализация методики проектирования компактных малоэлементных кольцевых антенных решеток;
- исследование и разработка способов и устройств формирования видов поляризации для триортогональных антенных элементов и систем;
- исследование характеристик малогабаритных активных триортогональных антенн с оперативным управлением видом поляризации и приемных кольцевых антенных решеток на их основе;
- экспериментальные исследования и практическая реализация антенных систем и их составных частей.

Объект исследований – антенные системы КВ радиоцентров.

Предмет исследований – комплексные решения по развитию и модернизации антенных систем, обеспечивающие существенное сокращение площадей антенных полей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Обоснованы пути комплексного решения основных проблем в области развития и модернизации антенных систем передающих и приемных КВ радиоцентров на основе современных достижений и разработок в области теории и техники антенн, обеспечивающие существенное сокращение площадей антенных полей, улучшение отдельных тактико-технических характеристик антенных систем, их оперативную гибкость и новые возможности по реализации перспективных технологий радиосвязи.

2. На основе разработанной квазистационарной модели для анализа импедансных характеристик компактных малоэлементных передающих кольцевых фазированных антенных решеток, с последующим подтверждением строгим электродинамическим моделированием, обнаружен и исследован эффект возникновения аномальных резонансных явлений в таких решетках.

3. Разработана методика проектирования компактных малоэлементных передающих кольцевых фазированных антенных решеток, включающая синтез «компромиссных» фазовых распределений, позволяющих сгладить аномальные резонансы.

4. Разработаны подходы, требования и средства, обеспечивающие оперативное управление поляризационной характеристикой приемного триортогонального антенного элемента и построение на этой основе активных приемных кольцевых фазированных антенных решеток с поляризационной адаптацией.

5. Получены новые результаты исследований передающих и приемных кольцевых фазированных антенных решеток КВ диапазона, подтверждающие качественное улучшение некоторых тактико-технических характеристик и экономию площадей земельных участков по сравнению с традиционными решениями антенных систем КВ радиоцентров.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Обоснованные автором пути комплексного решения основных проблем в области развития и модернизации антенных систем передающих и приемных КВ радиостанций вносят вклад в область теории и техники антенн и обладают практической значимостью как научно обоснованные рекомендации по созданию нового поколения антенных систем.

2. Обнаруженный и исследованный эффект возникновения аномальных резонансных явлений в передающих кольцевых фазированных антенных решетках расширяет знания о свойствах фазированных антенных решеток.

3. Обоснованный автором подход к расчету импедансных характеристик компактной малоэлементной антенной решетки на основе квазистационарной модели развивает методологические основы анализа антенных решеток и может найти применение при предварительной приближенной оценке характеристик достаточно широкого класса ансамблей близкорасположенных когерентных излучателей.

4. Разработанная автором методика проектирования передающих компактных малоэлементных кольцевых фазированных антенных решеток, включающая синтез «компромиссных» фазовых распределений, вносит вклад в развитие технологий проектирования антенных систем.

5. Полученные автором новые результаты исследований и практической реализации передающих и приемных кольцевых антенных решеток КВ диапазона и их составных частей расширяют знания о решениях и достижимых характеристиках в области антенных решеток, а кроме того могут непосредственно использоваться при разработке и модернизации антенных систем.

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 рассматриваемым специальностям

Диссертационная работа **соответствует** п.п. 1 и 3 паспорта специальности 05.12.07.

Методы исследований

При выполнении диссертационной работы использовались методы математического моделирования, вычислительной электродинамики, теории антенн. Для проведения расчетов использовался прошедший государственную регистрацию отечественный программный комплекс.

Обоснованность и достоверность результатов работы

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечиваются адекватностью использованных методов и построенных на их основе расчетных моделей. Достоверность результатов работы подтверждается хорошим согласованием результатов расчетов на основе квазистационарной и

строгой электродинамической моделей, а также результатами экспериментальных исследований и практической реализации антенных устройств.

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 моделей и методик, а также результаты исследования характеристик устройств.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснованные пути комплексного решения основных проблем в области развития и модернизации антенных систем передающих и приемных КВ радиоцентров на основе современных достижений и разработок в области теории и техники антенн обеспечат существенное сокращение площадей антенных полей, улучшение некоторых тактико-технических характеристик антенных систем, их оперативную гибкость и новые возможности по реализации перспективных технологий радиосвязи.

2. Обнаружен и исследован на основе квазистационарной и строгой электродинамической моделей эффект возникновения аномальных резонансных явлений в малоэлементных передающих кольцевых фазированных антенных решетках при определенных фазовых распределениях.

3. Разработанная методика проектирования компактных малоэлементных передающих кольцевых фазированных антенных решеток, включающая синтез «компромиссных» фазовых распределений, позволяет сгладить аномальные резонансы.

4. Разработанные подходы, требования и средства управления поляризацией обеспечивают оперативное управление поляризационной характеристикой приемного триортогонального антенного элемента и построение на этой основе активных приемных кольцевых фазированных антенных решеток с поляризационной адаптацией.

5. Полученные результаты исследований и практической реализации передающих и приемных кольцевых фазированных антенных решеток КВ диапазона подтверждают экономию площадей земельных участков по сравнению с традиционными решениями антенных систем КВ радиоцентров.

Апробация результатов работы и публикации

Основные результаты по теме диссертационного исследования **докладывались** на XXIV, XXV и XXVI Российских научно-технических конференциях ПГУТИ (Самара, 2017, 2018, 2019), IV Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации» (Красноярск, 2017), IV Международной научно-технической конференции «Радиотехника, электроника и связь» (Омск, 2017), XIX Внеочередной Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (Уральск, 2018), XVI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов»

(Миасс, 2018), XX Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (Уфа, 2018), XI Всероссийской межведомственной научной конференции «Актуальные направления развития систем охраны, специальной связи и информации для нужд государственного управления» (Орел, 2019).

По тематике диссертационных исследований автором (лично и в соавторстве) **опубликовано** 15 печатных трудов. Основные научные и прикладные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК, и в 11 публикациях в форме текстов и тезисов докладов на международных и российских конференциях.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 185 страниц, включая 109 рисунков и 15 таблиц. Список литературы содержит 188 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, указан личный вклад автора, приведены положения, выносимые на защиту, даны сведения об апробации результатов работы и о публикациях.

Раздел 1 посвящен исследованию и разработке путей комплексного решения основных проблем в области развития и модернизации антенных систем КВ радиоцентров.

Выполненный анализ состояния, тенденций и основных проблем в области антенных систем КВ радиоцентров позволил обосновать пути комплексного решения проблем. Показано, что применение системного подхода, а также современных достижений и технологий в области теории и техники антенн при проектировании и модернизации КВ радиоцентров позволит строить универсальные антенные комплексы, обладающие лучшими характеристиками по сравнению с традиционными, занимающие меньшие площади и ориентированные на использование актуальных технологий в сетях и системах КВ радиосвязи.

Обоснованы пути комплексного решения основных проблем в области развития и модернизации антенных систем передающих и приемных КВ радиоцентров на основе современных достижений и разработок в области теории и техники антенн, обеспечивающие существенное сокращение площадей антенных полей, улучшение отдельных тактико-технических харак-

теристик антенных систем, их оперативную гибкость и новые возможности по реализации перспективных технологий радиосвязи.

Выполнен выбор методов и программных средств электродинамического анализа антенн и антенных систем КВ диапазона. В качестве основного метода электродинамического анализа антенн было выбрано интегральное уравнение Поклингтона, а в качестве программного средства анализа – ПК Scater.

Проведены исследование и показаны возможности совершенствования устройств одновременной работы передатчиков на общую антенну. Основное внимание уделено частотно-разделительным устройствам (ЧРУ), построеным на основе фильтров.

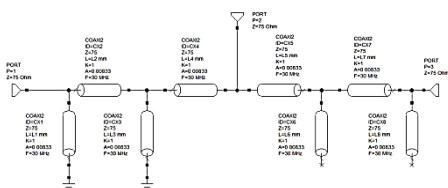


Рисунок 1 – ЧРУ на основе элементов с распределенными параметрами

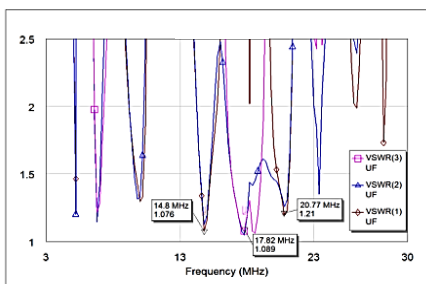


Рисунок 2 – КСВН антенны с ЧРУ

строеным на основе фильтров. Анализировались ЧРУ на основе перестраиваемых элементов с сосредоточенными и распределенными параметрами. Проанализировано ЧРУ на длинных шлейфах с чередующимися полосами пропускания и заграждения фильтров, схема которого показана на рисунке 1. Устройство предназначено для одновременной работы двух передатчиков, один из которых работает в диапазонах частот 14,7 – 14,9 МГц; 20,7 – 20,9 МГц, а второй – 17,7 – 17,9 МГц. Соответствующие КСВН антенны представлены на рисунке 2. Показано, что такое ЧРУ, при определенных условиях, обеспечивает приемлемые значения основных параметров без каких-либо пере-

строек.

В разделе 2 рассмотрены вопросы исследования и разработки антенных систем передающих КВ радиосредств.

Показано, что передающие КВ антенны должны обладать свойствами широкополосности. Вместе с тем, в силу тактико-технических и технико-экономических требований, предъявляемых к современным радиосредствам, антенны должны быть компактными.

Перспективным направлением реализации передающих КВ антенн являются кольцевые фазированные антенные решетки (КФАР). Данная топология решетки обеспечивает возможность формирования максимума диаграммы направленности (ДН) в любое азимутальное направление без усложнения диаграммообразующей системы за счет реализации свойств по-

воротной симметрии.

Широкополосность антенной системы (АС) накладывает ограничения сверху на ее геометрические размеры, поскольку при достаточно большом расстоянии между элементами не удастся сформировать приемлемую для работы ДН на верхних частотах диапазона. При этом на нижних частотах диапазона антенная решетка становится переуплотненной.

В рамках данной работы исследовались широкополосные передающие КФАР в диапазоне 6 – 25 МГц. В процессе исследований были проведены расчеты характеристик решеток при различных значениях числа элементов (излучателей) и различных типах излучателей. Были проведены расчеты для КФАР, состоящих из восьми, десяти, двенадцати, четырнадцати и шестнадцати излучателей, при варьировании типа излучателя, высоты излучателей (l , h), диаметра излучателя (d) и радиуса КФАР (R). Таким образом с использованием многомерной параметрической оптимизации выбирался оптимальный вариант конфигурации АС, обладающий приемлемыми электродинамическими характеристиками во всем диапазоне частот.

В качестве примера на рисунке 3 представлена модель КФАР, в которой 16 элементов расположены равномерно эквидистантно по окружности с радиусом $R = 14,5$ м. Амплитудно-фазовые распределения КФАР рассчитывались с использованием метода максимизации КНД. Ниже представлены некоторые результаты исследований. На рисунке 4 показаны ДН решетки на частоте 10 МГц в вертикальной и горизонтальной плоскостях. КНД при этом составил 14 дБ. На рисунке 5 показаны графики частотной зависимо-

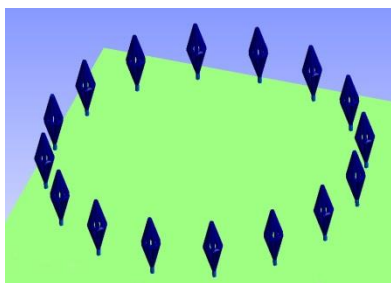


Рисунок 3 – Модель 16-элементной КФАР

сти КСВН вибраторов в составе КФАР при работе на фидер с сопротивлением 50 Ом. Из приведенных выше графиков следует, что данное антенное решение реализует хорошие характеристики направленности при приемлемом уровне естественного

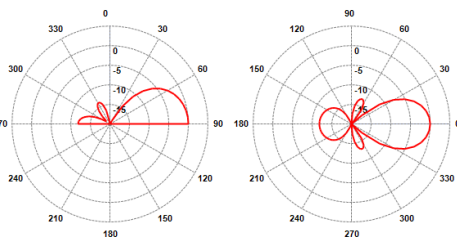


Рисунок 4 – ДН 16-элементной КФАР

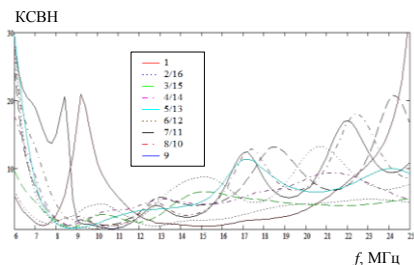


Рисунок 5 – Частотные зависимости КСВН

КСВН в трактах антенных элементов.

Как показали проведенные исследования, в компактных малоэлементных широкополосных КФАР возникают резонансные эффекты, связанные с видом формируемых фазовых распределений и пространственным расположением излучателей в АС, приводящие к возникновению высоких и аномальных (отрицательных) значений КСВН в трактах антенных элементов при формировании максимума излучения в заданное направление.

Как уже было отмечено выше, в рамках проведенных исследований все расчеты выполнялись с использованием ПК Scater. Для верификации полученных результатов дополнительно были проведены расчеты для модели 8-

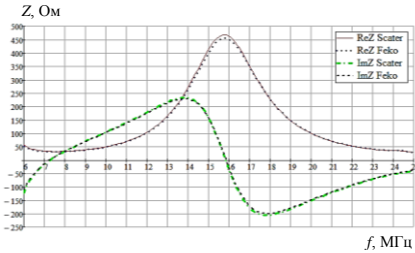


Рисунок 6 – Частотные зависимости входного импеданса

элементной КАР с применением ПК FEKO. В качестве примера на рисунке 6 приведены сравнительные результаты частотных зависимостей входного импеданса одиночного вибратора. Результаты сравнения полученных характеристик позволили сделать вывод о том, что в отсутствие резонансных явлений результаты моделирования находятся в хорошем количественном соответствии.

Для возможности приближенного анализа электродинамических характеристик малоэлементных компактных КФАР была построена квазистационарная модель решетки, позволяющая оценить импедансные характеристики входящих в состав антенной системы элементов.

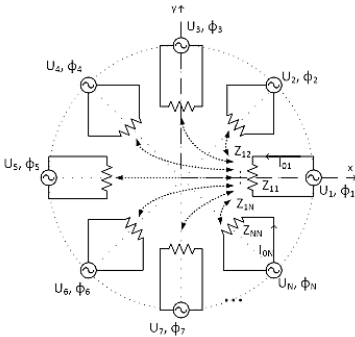


Рисунок 7 – Эквивалентная схема взаимодействующих вибраторов

Построение модели выполнено на основе анализа взаимной связи антенных элементов в составе КФАР с использованием метода наводимых ЭДС. Эквивалентная схема взаимодействующих вибраторов приведена на рисунке 7. При этом токи в точках питания вибраторов ($I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0N}$) связаны с напряжениями питающих генераторов соотношением:

Построение модели выполнено на основе анализа взаимной связи антенных элементов в составе КФАР с использованием метода наводимых ЭДС. Эквивалентная схема взаимодействующих вибраторов приведена на рисунке 7. При этом токи в точках питания вибраторов ($I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0N}$) связаны с напряжениями питающих генераторов соотношением:

$$\begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{01} \\ I_{02} \\ \dots \\ I_{0N} \end{pmatrix} = |U| \begin{pmatrix} e^{i\varphi_{U1}} \\ e^{i\varphi_{U2}} \\ \dots \\ e^{i\varphi_{UN}} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где Z_{ij} – собственные импедансы антенных элементов в случае $i = j$ и взаимные импедансы в случае $i \neq j$, $|U|$ – модуль напряжения генераторов, $\varphi_{U_1}, \varphi_{U_2}, \dots, \varphi_{U_N}$ – фазовое распределение на входах антенной решетки.

В результате решения СЛАУ находим полные сопротивления вибраторов КАР с учетом влияния всех остальных вибраторов:

$$Z_{0_j} = \frac{|U|}{|I_{0_j}|} e^{i(\varphi_{U_j} - \varphi_{I_j})}, j = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

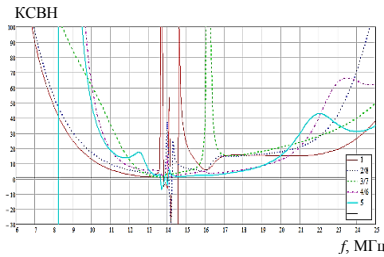


Рисунок 8 – Частотные зависимости КСВН

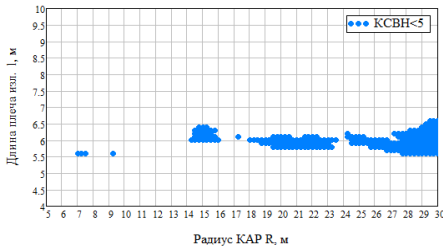


Рисунок 9 – Пример параметрической оптимизации параметров КФАР

вышение значения КСВН = 5. Результаты исследований подтвердили возникновение аномальных значений КСВН в трактах антенных элементов при определенных геометрических и электродинамических параметрах излучателей и решетки.

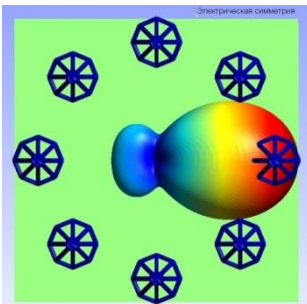


Рисунок 10 – Модель КФАР

Результаты исследований на основе разработанной квазистационарной модели находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными на основе использования строгих методов математического моделирования. В качестве примера на рисунке 8 представлены частотные зависимости КСВН для 8-элементной КФАР.

Исследованы возможности проведения оптимизации геометрических параметров приведенной малоэлементной КФАР для достижения заданных электродинамических характеристик АС. В качестве примера на рисунке 9 отображена область геометрических характеристик антенной решетки, при которых достигается не пре-

выполнены исследования компактных передающих КФАР КВ диапазона. В качестве примера на рисунке 10 показана электродинамическая модель с синтезированной ДН на частоте 10 МГц для 8-мизэлементной КФАР. На рисунке 11 представлены частотные зависимости действительных и мнимых значений импедансов антенных элементов

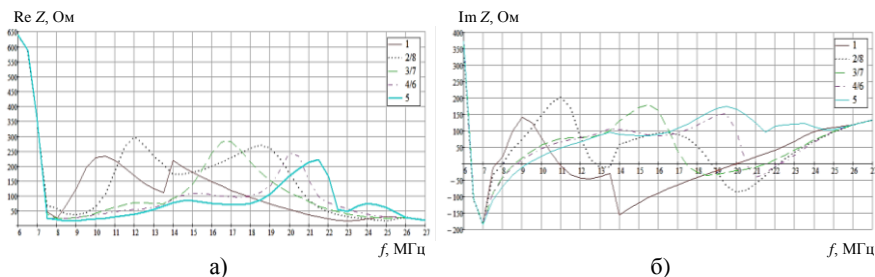


Рисунок 11 – Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей входного импеданса

при «центральной» формировании максимума излучения ($\varphi = 0^\circ$).

Проведенные исследования на основе электродинамического моделирования компактной КФАР позволили выявить основные пути решения описанной проблемы, включая:

- оптимизацию геометрических параметров антенной системы;
- «сокращение КФАР» путем подключения балластных нагрузок;
- синтез «компромиссного» амплитудно-фазового распределения,

обеспечивающего приемлемый уровень взаимного влияния элементов за счет некоторого уменьшения КНД антенной решетки.

При этом оптимизация геометрических параметров антенной системы включает в себя:

- выбор конструкции антенных элементов и их количества в составе антенной решетки;
- оптимизацию геометрических параметров антенного элемента (высота, ширина и пр.);
- оптимизацию радиуса антенной решетки.

На основе проведенных исследований разработана методика проектирования компактных малоэлементных КФАР, блок-схема которой показана на рисунке 12. В результате анализа тактико-технических (ТТТ), а также технико-экономических требований (ТЭТ) осуществляется определение ключевых параметров антенной решетки, таких как количество излучателей в составе КФАР, допустимый уровень КСВН в трактах антенных излучателей и прочее. При этом определение данных параметров может осуществляться с помощью квазистационарной модели анализа. Следующим этапом является подбор типа излучателя, который должен отвечать как требованиям к электродинамическим параметрам антенной системы (широкополосность), так и требованиям стойкости антенной системы к внешним воздействиям. В случае малоэлементной КФАР при возникновении в трактах антенных элементов на определенных частотах диапазона отрицательных значений КСВН необходимо решать проблему согласования излучателей на данных частотах либо выбором «компромиссного» фазового распределения, либо «сокращением» КФАР.

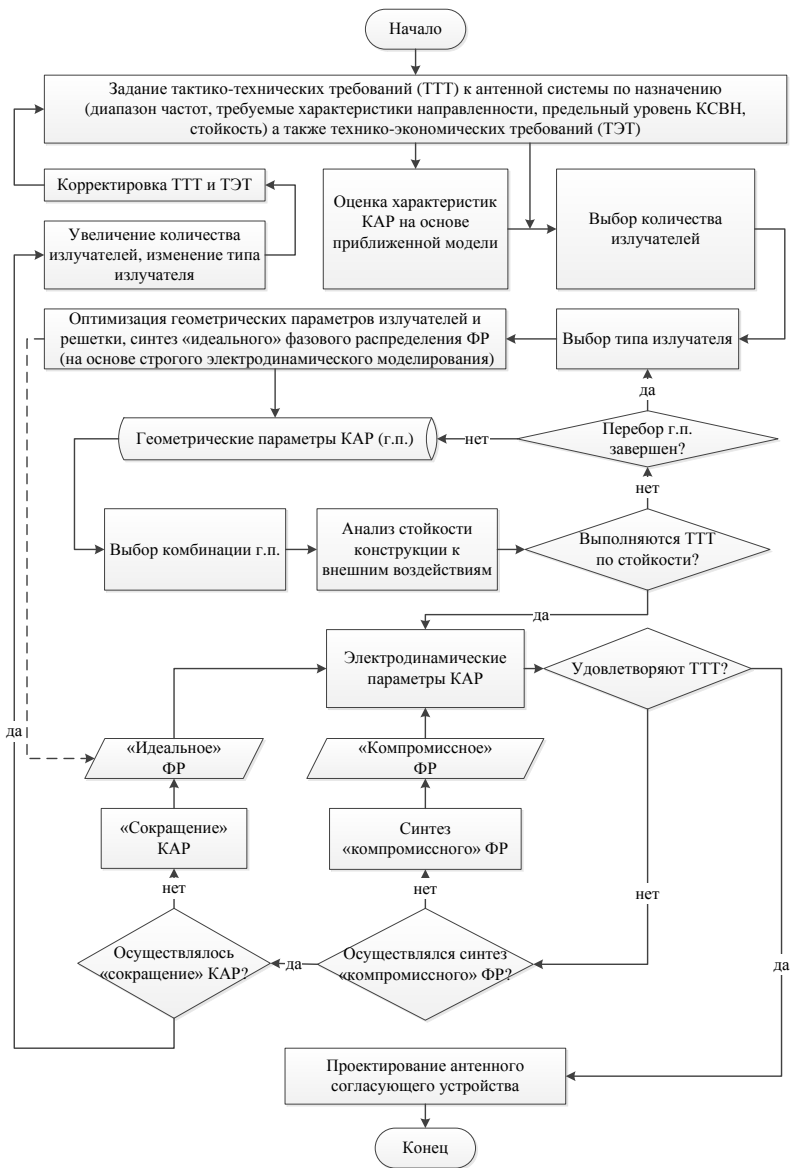


Рисунок 12 – Блок-схема методики проектирования КФАР

Раздел 3 посвящен исследованию и разработке антенных систем приемных КВ радиоцентров.

Выполнены исследование и разработка способов и устройств формирования видов поляризации для триортогональных антенных элементов (ТАЭ). Разработано устройство выбора вида поляризации волны – блок поляризационной обработки (БПО), позволяющее выделить оптимальную поляризацию радиосигнала в целях улучшения энергетических характеристик. Структурная схема устройства показана на рисунке 13.

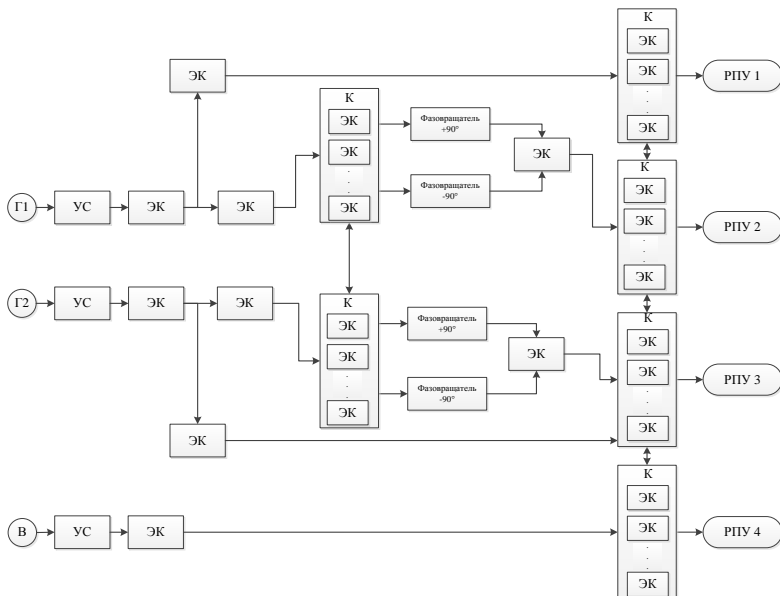


Рисунок 13 – Структурная схема БПО

Проведено исследование характеристик малогабаритных активных триортогональных антенн с оперативным управлением видом поляризации. В частности, проведен расчет ДН ТАЭ, работающего совместно с БПО. В качестве примера на рисунке 14 представлены ДН ТАЭ в вертикальной и горизонтальной плоскостях для линейной горизонтальной поляризации при параметрах подстилающей поверхности $\epsilon = 10, \sigma = 0,01 \text{ См/м}$.

Как показали проведенные исследования, одиночный ТАЭ способен работать как на средних и протяженных ионосферных трассах, так и на коротких трассах. Кроме того, для дополнительного контроля работоспособности ТАЭ были рассчитаны кроссполяризационные развязки между его элементами. Соответствующие графики показаны на рисунке 15. Как видно из представленных графиков, кроссполяризационная развязка между ортогональными излучателями является приемлемой и составляет не менее 20 дБ.

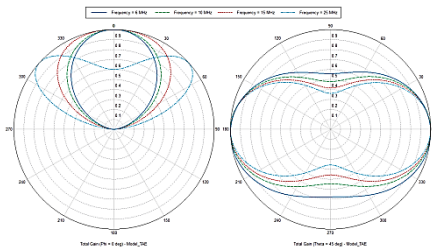


Рисунок 14 – ДН ТАЭ для линейной горизонтальной поляризации

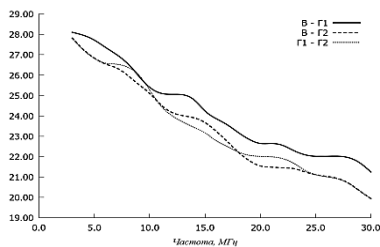


Рисунок 15 – Развязка между излучателями ТАЭ

Характеристики направленности ТАЭ для формируемых видов поляризации приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Диапазон частот, МГц		1,5...6	6...10	10...20	20...30
Вертикальная поляризация	Сектор углов места, град.	15...60	12...50	10...40	8...35
	Неравномерность ДН в азимутальной плоскости, дБ	± 0,5	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Горизонтальная поляризация	Сектор углов места, град.	40...90	45...90	45...90	50...90
	Неравномерность ДН в азимутальной плоскости, дБ	± 2	± 2	± 2	± 2
Эллиптическая горизонтальная поляризация	Сектор углов места, град.	40...90	35...90	30...90	20...90
	Неравномерность ДН в азимутальной плоскости, дБ	± 1	± 1	± 1	± 1
Эллиптическая вертикальная+горизонтальная поляризация	Сектор углов места, град.	10...70	10...75	25...90	10...90
	Неравномерность ДН в азимутальной плоскости, дБ	Секторная, шириной 190 град	Секторная, шириной 240 град	Секторная, шириной 270 град	± 3

По результатам проведенных исследований подтверждена перспективность применения ТАЭ с БПО в приемных КВ радицентрах в условиях достаточно существенных ограничений по площадям размещения антенн. В ряде случаев, например, при установке на небольших карнизах и крышах зданий, для обеспечения КВ радиосвязи на различные расстояния представляется возможным использование одиночных триортогональных элементов с возможностью выбора вида поляризации для обеспечения лучших энергетических характеристик.

Проведено исследование КФАР на основе ТАЭ, работающих совместно с блоком поляризационной обработки. Методом максимизации КНД были

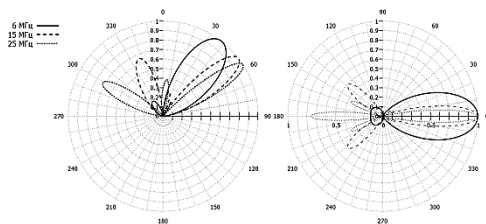


Рисунок 16 – ДН КФАР для линейной горизонтальной поляризации

рассчитаны ДН 8-элементной КФАР для каждого вида поляризации. В качестве примера на рисунке 16 показаны ДН КФАР в вертикальной и горизонтальной плоскостях для линейной горизонтальной поляризации.

В результате проведенных исследований установлено, что БПО оказывает достаточно несущественное влияние на пространственные характеристики, но при этом позволяет повысить энергетику сигнала за счет выбора оптимальной поляризации. Показано, что использование КФАР на основе ТАЭ позволяет значительно сократить земельную площадь под их размещение без ухудшения характеристик назначения по сравнению с полноразмерными антенными решениями.

Раздел 4 посвящен результатам практической реализации и экспериментальным исследованиям кольцевых антенных решеток и их составных частей.

Выполнены практическая реализация и экспериментальные исследования модернизированного ТАЭ. Предложена и реализована модернизация существующего ТАЭ путем введения в его состав БПО, внешний вид которого



Рисунок 17 – Внешний вид БПО

представлен на рисунке 17. Проведен ряд экспериментальных исследований модернизированного ТАЭ. Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили сделать вывод о корректно выполненной модернизации ТАЭ с включением в его состав БПО, который обеспечивает прием радиосигналов с любого азимута и практически с любой дальности.

Выполнена разработка рабочей конструкторской документации на передающую кольцевую антенную решетку. КФАР является стационарным устройством, предназначенным для работы в составе приемных и передающих систем радиоприемников, для обеспечения радиосвязи в диапазоне коротких волн. Общий вид КФАР приведен на рисунке 18.

В рамках данной работы было выполнено макетирование одного излучателя из состава КФАР, общий вид которого представлен на рисунке 19.

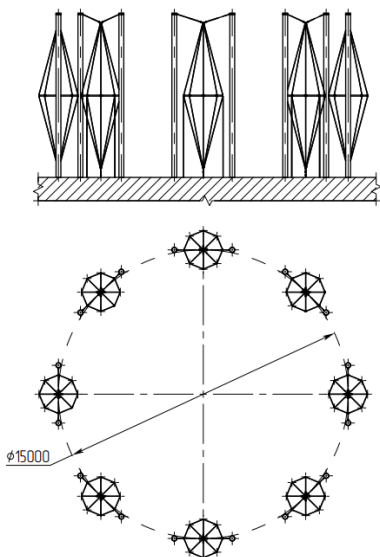


Рисунок 18 – Общий вид КФАР

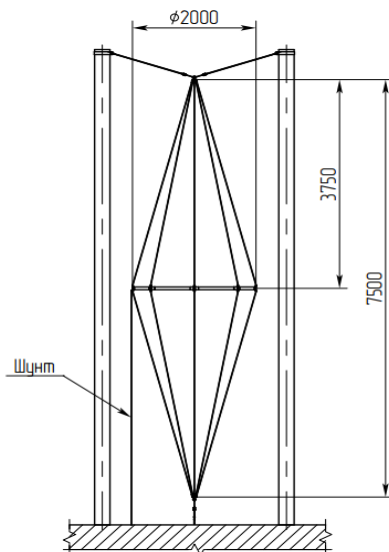


Рисунок 19 – Общий вид излучателя

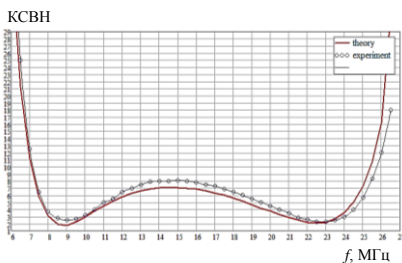


Рисунок 20 – Результаты измерения и расчета КСВН излучателя

Для проверки его работоспособности были выполнены измерения его КСВН в рабочем диапазоне частот (см. рисунок 20). Как показали проведенные экспериментальные исследования, реализованный макет излучателя обладает всеми необходимыми техническими характеристиками для практической реализации данной КФАР на его основе.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В **Приложении А** представлены результаты исследований триортогонального антенного элемента.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследованы и разработаны пути комплексного решения основных проблем в области развития и модернизации антенных систем КВ радиоцентров на основе современных достижений и разработок в области теории и техники антенн, обеспечивающие новые возможности по реализации перспективных технологий радиосвязи.

2. Проведены исследования и показаны возможности совершенствования устройств одновременной работы передатчиков на общую антенну.

3. Обоснована перспективность антенных систем в виде КФАР.

4. На основе предложенной приближенной квазистационарной модели КФАР обнаружен и подтвержден результатами строгих расчетов эффект возникновения аномальных значений КСВН при определенных параметрах решетки и режимах возбуждения. Разработаны пути решения указанной проблемы. На этой основе разработана методика проектирования компактных малоэлементных КФАР.

5. Выполнены исследование и разработка способов и устройств формирования видов поляризации для ТАЭ. Проведен расчет диаграмм направленности ТАЭ, работающего совместно с БПО. Подтверждена эффективность применения таких элементов и КФАР на их основе на приемных КВ радиостанциях и радиоцентрах.

6. Выполнены практическая реализация и экспериментальные исследования модернизированного ТАЭ и излучателя передающей КФАР, подтвердившие теоретические выводы.

Результаты диссертационной работы, при активном непосредственном участии автора, успешно внедрены на предприятиях России.

Перспективное направление дальнейших исследований по тематике диссертационной работы связано с разработкой научных основ, технических и технологических решений для создания гибких рядов унифицированных антенно-передающих и антенно-приемных комплектов КВ диапазона высокой заводской готовности.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Бузов, А.Л. Пути оптимизации антенных комплексов радиоцентров ДКМВ [Текст] / А.Л. Бузов, А.Д. Красильников, А.А. Рубис // Антенны. – 2017. – № 10. – С. 11 – 19.

2. Бузов, А.Л. Системный подход к проектированию и модернизации КВ радиоцентров на основе современных достижений и разработок в области теории и техники антенн [Текст] / А.Л. Бузов, С.А. Букашкин, В.П. Кубанов, М.А. Минкин, А.А. Рубис // Радиотехника. – 2018. – № 4. – С. 99 – 103.

3. Рубис, А.А. Проектирование компактных кольцевых антенных решеток КВ диапазона [Текст] / А.А. Рубис // Антенны. – 2018. – № 10. – С. 22 – 29.

4. Бузова, М.А. Приемная антенная система ВЧ диапазона с возможностями поляризационной адаптации [Текст] / М.А. Бузова, М.А. Минкин, А.А. Рубис // Антенны. – 2019. – № 1. – С. 44-51.

Тезисы и доклады на конференциях:

5. Бузов, А.Л. Вопросы оптимизации антенных полей КВ радиоцентров [Текст] / А.Л. Бузов, А.В. Оглоблин, А.А. Рубис // XXIV Российская научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ. Материалы конференции – Самара, 2017. – С. 195.

6. Бузов, А.Л. Пути построения компактных универсальных антенных комплексов для КВ-радиоцентров [Текст] / А.Л. Бузов, А.А. Рубис // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов докладов IV Всероссийской научно-технической конференции (г. Красноярск, 12-13 октября 2017 г.). – Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2017. – С. 291 – 294.
7. Банин, А.А. Частотно-разделительные устройства для одновременной работы передатчиков на общую антенну [Текст] / А.А. Банин, И.В. Дорошенко, А.А. Рубис // Радиотехника, электроника и связь: Сб. докладов IV Международной научно-технической конференции. – Омск, 2017. – С. 309 – 315.
8. Бузов, А.Л. Исследование возможностей оптимизации антенных систем КВ радиоцентров [Текст] / А.Л. Бузов, А.Д. Красильников, А.А. Рубис // XXV Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. – Самара, 2018. – С. 154.
9. Копылов, Д.А. Вопросы модернизации антенных систем мобильных и быстроразвертываемых радиостанций диапазона ДКМВ [Текст] / Д.А. Копылов, К.И. Пестовский, А.А. Рубис // XIX внеочередная международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-18». – Уральск, 2018. – С. 214 – 216.
10. Бузов, А.Л. Проектирование и модернизация антенных комплексов КВ радиоцентров на основе системного подхода [Текст] / А.Л. Бузов, М.А. Минкин, А.А. Рубис // XIX внеочередная международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-18». – Уральск, 2018. – С. 216 – 218.
11. Бузов, А.Л. Вопросы создания кольцевых активных фазированных антенных решеток диапазона ДКМВ [Текст] / А.Л. Бузов, Ал.В. Карлов, М.А. Минкин, А.А. Рубис // XVI Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». Материалы конференции. – Миасс, 2018. – С. 81 – 82.
12. Рубис, А.А. Оценка импедансных характеристик компактной передающей кольцевой антенной решетки на основе приближенной модели [Текст] / А.А. Рубис // XX международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-18». – Уфа, 2018. – С. 288 – 290.
13. Рубис, А.А. Методика проектирования компактных кольцевых антенных решеток с «компромиссными» фазовыми распределениями [Текст] / А.А. Рубис // XX международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-18». – Уфа, 2018. – С. 290 – 292.
14. Бузов, А.Л. Исследование импедансных характеристик компактной кольцевой антенной решетки на основе квазистационарной модели [Текст] / А.Л. Бузов, Ал.В. Карлов, А.А. Рубис // XI Всероссийская межведомственная научная конференция «Актуальные направления развития систем охраны, специальной связи и информации для нужд государственного управления». – Орел: Академия ФСО, 2019.
15. Рубис, А.А. Экспериментальные исследования активной антенны с адаптивной поляризацией [Текст] / А.А. Рубис // XXVI Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ. – Самара, 2019. – С.173-174.

Подписано в печать 09.04.2019 г.

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

Объем – 1 усл. п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 218

Отпечатано в типографии ООО «Новая страница».

443022, г. Самара, пр. Кирова, 26, оф. 9; тел.: 229-23-20.