

На правах рукописи



Джалилов Бахромжон Одилжонович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ
АНТЕННЫ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») на кафедре радиотехнической электроники.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Григорьев Андрей Дмитриевич**

Официальные оппоненты:

Парнес Михаил Давидович, доктор технических наук, главный конструктор ООО «Резонанс», г. Санкт-Петербург;

Воробьев Станислав Игоревич, кандидат технических наук, инженер ООО «АПСТЕК Лабс», г. Санкт-Петербург;

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «26» декабря 2017 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.08 в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru

Автореферат разослан «25» октября 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.238.08,
кандидат технических наук, доцент



Смирнов Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Мобильный телефон – относительно молодое изобретение. Для его создания потребовалось чуть более шестидесяти лет с момента изобретения радио, а сегодня он стал самым распространенным радиоустройством во всем мире. Теперь сложно найти человека, который бы не пользовался всеми преимуществами мобильной связи. С момента создания и по сегодняшний день мобильные телефоны все время модернизируются, расширяются их функциональные возможности. Важнейшую роль в большей части систем мобильной связи играет антенна, которая является одним из наиболее сложных объектов проектирования в современных мобильных устройствах связи. Поскольку параметры антенн зависят от частоты, они проектируются таким образом, чтобы работать в определенных диапазонах частот. Поэтому актуальным направлением является разработка широкополосных и многодиапазонных антенных систем. При этом важнейшими факторами остаются по-прежнему общетехнические и стоимостные характеристики.

К антеннам систем мобильной связи предъявляется целый ряд требований. Ранее они проектировались для работы в одном частотном диапазоне стандарта 2G систем мобильной связи. Позже появились и другие системы, такие как Цифровая сотовая система (DCS), Служба персональной связи (PCS), Глобальная система мобильной связи (GSM), Широкополосный множественный доступ с кодовым разделением (WCDMA) и Долговременное развитие (LTE). Стандарт, который в последнее время широко применяется в системах мобильной связи четвертого поколения это – LTE. Сети 4G на основе стандарта LTE работают в диапазоне частот от 700 МГц до 2,7 ГГц.

В настоящее время широкое применение получили системы сотовой связи нового поколения, отличающиеся широкополосной унифицированной системой радиодоступа, позволяющей передавать видео и мультимедийную информацию. С развитием систем сотовой связи возникла необходимость разработки новых типов антенн сотовых телефонов. Так как к этим устройствам предъявляются

жесткие требования по массе, габаритам и эффективности, антенны многообразных моделей телефонов, имеющих на рынке, имеют сходную конструкцию.

Актуальной задачей сегодняшнего дня является создание компактной антенны с широкой полосой пропускания и высоким коэффициентом полезного действия. К сожалению, малые по сравнению с длиной волны размеры мобильного телефона затрудняют разработку антенны, имеющей достаточно широкую рабочую полосу частот и высокий КПД, так как эти параметры взаимно исключают друг друга. Использование нескольких антенн, каждая из которых была бы настроена на свой диапазон, нецелесообразно ввиду недостатка свободного места в телефоне и возможного взаимного влияния антенн.

В связи с отмеченными трудностями появились работы, в которых предлагалось использовать одну антенну с электрической перестройкой по частоте. В качестве элемента перестройки предлагалось использовать варакторы, р-і-n-диоды и электромеханические переключатели (МЭМС). Однако до настоящего времени отсутствуют конструкции, обеспечивающие работу в стандарте LTE, включающем несколько низкочастотных диапазонов и высокочастотный диапазон.

Целью диссертационной работы является исследование способов электрической перестройки рабочей частоты малогабаритных антенн и разработка электрически перестраиваемой многодиапазонной антенны сотового телефона, имеющей высокий КПД, малые габариты и малое потребление энергии управляющей цепи. Антенна должна настраиваться на любой низкочастотный диапазон стандарта LTE, от 700 МГц до 890 МГц, при этом сохраняя настройку на высокочастотный диапазон В7 (2690 МГц).

Расчет электромагнитного поля, параметров и характеристик такой антенны требует решения сложной краевой электродинамической задачи. В связи с этим большое внимание в исследовании уделяется средствам математического моделирования, с помощью которых можно оптимизировать конструкцию антенны.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Разработать базовую конструкцию антенны и подобрать ее размеры методами математического моделирования;
2. Оптимизировать конструкцию антенны по КПД, используя теорию характеристических мод;
3. Выбрать способ электрической перестройки частоты, обеспечивающий перестройку антенны на заданные диапазоны при сохранении высокого КПД и требуемой ширины рабочей полосы частот.
4. Сконструировать и изготовить макет антенны с электрической перестройкой частоты и провести испытания макета.
5. На основании результатов испытаний сформулировать рекомендации по совершенствованию конструкции антенны.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые показана возможность электрической перестройки частоты малогабаритной антенны типа PIFA в нескольких низкочастотных диапазонах при сохранении настройки на один высокочастотный диапазон частот.
2. Впервые применена теория характеристических мод для оптимизации конфигурации электрически перестраиваемой антенны.
3. Впервые проведено сравнение эффективности использования различных типов управляющих элементов: цифровых конденсаторов, р-і-п диодов и варакторов. Показано, что наиболее эффективным элементом перестройки, потребляющим к тому же минимальную мощность управления, является варактор.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработаны конструкции перестраиваемых антенн сотовых телефонов.
2. Предложена и исследована антенна с различными элементами настройки.
3. Предложена и разработана малогабаритная компактная антенна для сотовых телефонов, имеющая требуемый КПД.

4. Создан экспериментальный макет и проведены измерения его параметров. Результаты измерений достаточно хорошо совпадают с данными, полученными путем моделирования.
5. Результаты работы могут быть использованы при разработке новых типов смартфонов поколения 4G и 5G, а также в учебном процессе.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Построение эквивалентной схемы антенны с сосредоточенными параметрами, значения которых определяются конфигурацией антенны, позволяет провести быстрый анализ и оптимизацию схемы с последующим определением основных размеров антенны.
2. Конструкция антенны в виде параллельного соединения двух взаимно перпендикулярных ветвей с разделительным конденсатором позволяет перестраивать резонансную частоту одной ветви, практически не меняя частоту другой.
3. Настройка собственной частоты основной характеристической моды на частоту, близкую к рабочей частоте низкочастотной ветви антенны позволяет повысить радиационный КПД антенны на этой частоте на 10...15 %.
4. Использование варакторных диодов для перестройки частоты позволяет получить, по сравнению с другими типами управляющих устройств, максимальный КПД антенны при минимальной мощности управления.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием общей теории антенн и численных электродинамических методов расчёта, специализированных компьютерных программ. Полученные результаты подтверждены вычислительными и натурными экспериментами.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. III-IV Научно-техническая конференция с международным участием «Наука настоящего и будущего», март 2015-2016г. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2. IV-V Всероссийская научно-техническая конференция "Электроника и микроэлектроника СВЧ", СПбГЭТУ "ЛЭТИ", июнь 2015-2016 г
3. Конференция молодых исследователей в области электротехники и электроники, февраль 2016-2017 г. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
4. 70-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1 – 11.02.2017.
5. 72-я Всероссийская научно-техническая конференция СПбНТОРЭС, посвященная Дню радио, 20-28 апреля 2017 г, Санкт-Петербург, «ЛЭТИ»
6. Международная научно-практическая конференция « Молодёжь в поисках дружбы» 28 апреля 2017 г, Республика Таджикистан, Институт энергетики Таджикистана.
7. III Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы СВЧ электроники им. В.А. Солнцева», ноябрь 2017, Москва.
8. RIEC Russia-Japan Joint International Microwave Workshop. October 2017, Sendai, Japan (Совместный русско-японский международный микроволновый симпозиум, Сендай, Япония, октябрь 2017).

Основное теоретическое и практическое содержание диссертационной работы опубликовано в 15 научных работах, в числе которых 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 2 статьи в изданиях, входящих в список Scopus, а также 11 в сборниках материалов всероссийских и международных конференций.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в формулировке целей и постановке задач исследований. Также автором проведены конкретные моделирование, расчёт и оптимизация характеристики перестраиваемой двухдиапазонной планарной инвертированной F-антенны (PIFA) для сотовой связи. На основе теоретических моделей автором разработан и смонтирован экспериментальный макет антенны, проведены измерения его параметров.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников. Ее объем 93 страницы, включая 69 рисунков, 15 таблиц, 51 наименований цитируемых источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрыта актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проводится обзор литературы по антеннам сотовых телефонов и формулируются требования к антеннам последнего поколения. Описаны типы используемых антенн мобильных телефонов и их характеристики, также работы по электрически перестраиваемым антеннам. В этой главе также сформулированы задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели. Основная задача данной работы – создание и исследование антенны, способной переключаться на 4 низкочастотных диапазона, сохраняя при этом настройку на высокочастотный диапазон стандарта последнего стандарта LTE (таблица 1).

Таблица 1

Диапазоны частот стандарта LTE

Название диапазона	Центральная частота, МГц	Диапазон частот, МГц
B17	725.0	704...746
B13	766.5	746...787
B20	826.5	791...862
B5–B8	892.0	824...960
B7	2595.0	2500...2690

Вторая глава посвящена проектированию прототипа электрически перестраиваемой антенны. На основании анализа, выполненного в первой главе, в качестве прототипа была выбрана планарная инвертированная F-антенна (PIFA), изображенная на рисунке 1. Предложена конфигурация двухдиапазонной PIFA с двумя взаимно перпендикулярными ветвями и составлена ее эквивалентная схема (рисунок 2), содержащая 2 контура, соответствующих ветвям антенны. Параметры контуров определяются

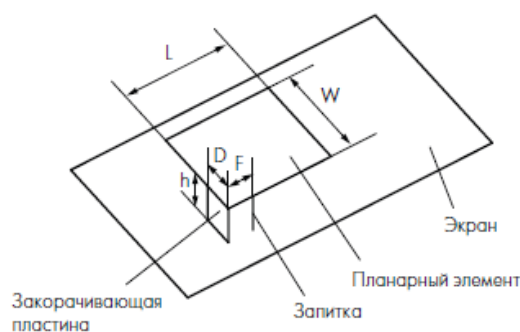


Рисунок 1 - Планарная повернутая F-антенна

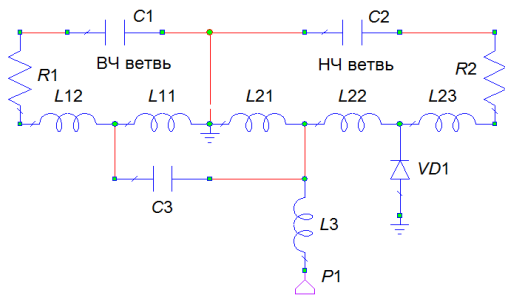


Рисунок 2 - Эквивалентная схема двухдиапазонной антенны

Высокочастотная ветвь возбуждается от этого же порта через разделительный конденсатор C3. Резонансная длина волны антенны определяется выражениями¹:

$$\frac{F}{W} \frac{1}{L+h} + \left(1 - \frac{F}{W}\right) \frac{1}{L+h+W-D} = \frac{4}{\lambda}, \text{ если } 0 < F/W < 1, W/L \leq 1; \quad (1)$$

$$\left(\frac{F}{W}\right)^{W/L} \frac{1}{L+h} + \left[1 - \left(\frac{F}{W}\right)^{W/L}\right] \frac{1}{L+h+W-D} = \frac{4}{\lambda}, \text{ если } 0 < F/W < 1, W/L > 1; \quad (2)$$

Предварительную конфигурацию антенны можно определить с помощью оптимизированных параметров и формул (1), (2). Полагая ширину проводника антенны $D = 2 \text{ мм}$ и считая $D \ll L, h \ll L, F/W \ll 1$, из (1) можно получить соотношение $L \approx 2\lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{re}}$, где ϵ_{re} – эффективная относительная диэлектрическая

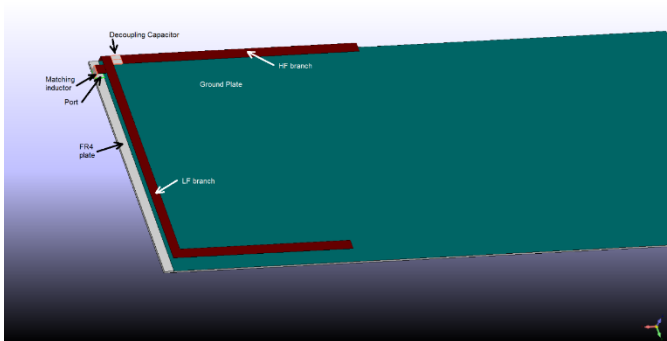


Рисунок 3 - Предварительная конфигурация антенны

их резонансными длинами волн, добротностями и сопротивлением излучения. Возбуждение низкочастотной ветви производится от генератора (порта), включенного по автотрансформаторной схеме через согласующую индуктивность L3. Высоко-

частотная ветвь возбуждается от этого же порта через разделительный конденсатор C3. Резонансная длина волны антенны определяется выражениями¹:
 проникаемостью крышки телефона. В результате получаем длину низкочастотной ветви $L_{LF} = 84 \text{ мм}$, высокочастотной ветви $L_{HF} = 44 \text{ мм}$. На рисунке 3 показана предварительная конфигурация антенны.

¹ Minh'Chau T. Huynh. A. Numerical and Experimental Investigation of Planar Inverted F-Antennas for Wireless Communication Applications. – In: Master Thesis of Science in Electrical Engineering. – Virginia Polytechnic Institute and State University. – Blacksburg, Virginia. – Oct. 19, 2000. – 123 p.

Зависимость модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ от частоты (АЧХ) для спроектированной антенны представлена на рисунке 4. Минимум коэффициента отражения наблюдается на требуемых частотах 729.3 МГц и 2591 МГц с достаточно низкими значениями КСВН, что соответствует стандарту LTE.

По оптимизированной эквивалентной схеме была определена окончательная конфигурация антенны, проведены ее расчет и оптимизация с помощью программы RFS, найдено оптимальное положение элемента перестройки частоты.

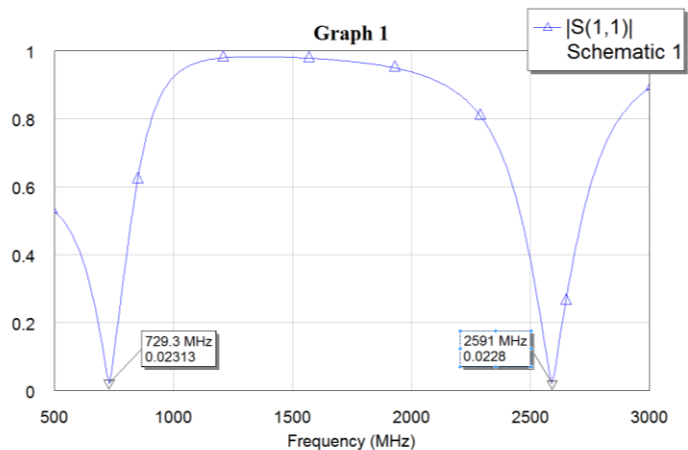


Рисунок 4 - Зависимость модуля коэффициента отражения от частоты для двухдиапазонной антенны

На рисунке 5 показан вид оптимизированной антенны, состоящей из низкочастотной и высокочастотной ветвей. Между ними включен развязывающий конденсатор. Антенна возбуждается от сосредоточенного порта с внутренним сопротивлением 50 Ом через согласующую LC цепь. Элемент перестройки частоты подключен к низкочастотной ветви. Расстояние от заземленного конца антенны до элемента перестройки оптимизировалось с помощью программы RFS.

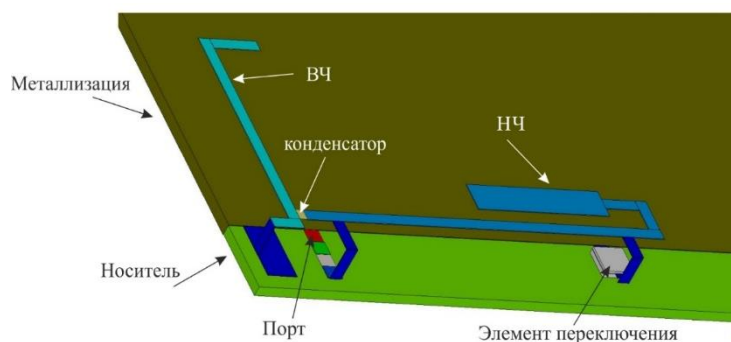


Рисунок 5 - Вид двухдиапазонной PIFA антенны в среде RFS

В третьей главе рассмотрено влияние поверхностного тока, протекающего по металлизации, на КПД и диаграмму направленности антенны. Для этого используется теория характеристических мод (ТХМ).

В главе изложены основы этой теории и приведены результаты расчета собствен-

ных волновых чисел этих мод. Показано, что при совпадении резонансной частоты основной характеристической моды с рабочей частотой антенны в НЧ диапазоне КПД антенны существенно увеличивается (в данном случае на 13%).

Четвертая глава содержит результаты моделирования перестраиваемой антенны в среде RFS с различными типами элементов перестройки, описание экспериментального макета антенны и результаты его измерений.

В качестве элементов перестройки использовались цифровые конденсаторы, схемы на двух р-і-п диодах с включенными последовательно конденсаторами и варакторы. Для каждого элемента выбирался его оптимальный тип из имеющихся на рынке. В программе RFS элемент моделировался его эквивалентной схемой в виде соединения сосредоточенных элементов прямоугольной формы.

Для каждого элемента перестройки путем моделирования определялись оптимальное место подключения к антенне и параметры согласующих цепей. В результате сравнительного анализа выяснилось, что наибольший КПД антенны при наименьшей мощности управления обеспечивает варакторный диод MA27V19 фирмы Skyworks. Зависимости КСВН и КПД антенны с этим диодом показаны на рисунке 6. При перестройке напряжение смещения на варакторе менялось в интервале $-4.5 \dots -1$ В, что соответствует изменению емкости от 0.9 до 2.4 пФ.

Перестройка в НЧ-диапазоне сопровождается незначительным смещением настройки в ВЧ-диапазоне. Полоса пропускания в НЧ-диапазонах достигает

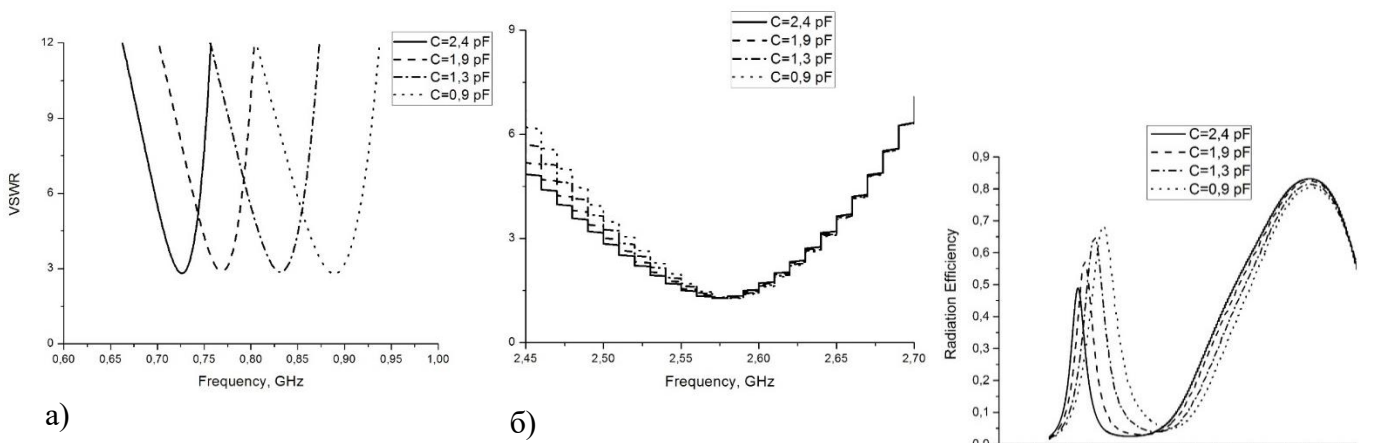


Рисунок 6 – Результаты моделирования а) КСВНЧ диапазона, б) КСВ ВЧ диапазона в) радиационный КПД антенны

11.6 %, в ВЧ-диапазоне – 8.9 %. КСВН в низкочастотных диапазонах и высокочастотном диапазоне не превосходит 3.

Значения радиационного КПД составляют в НЧ диапазоне 48...68 % и в ВЧ диапазоне 83% соответственно.

Для подтверждения результатов моделирования с помощью программы Sprint Layout был спроектирован экспериментальный макет антенны, который затем был изготовлен фирмой «Резонит». Фотография макета после монтажа навесных элементов, выполненного на кафедре РТЭ, показана на рисунке 7.

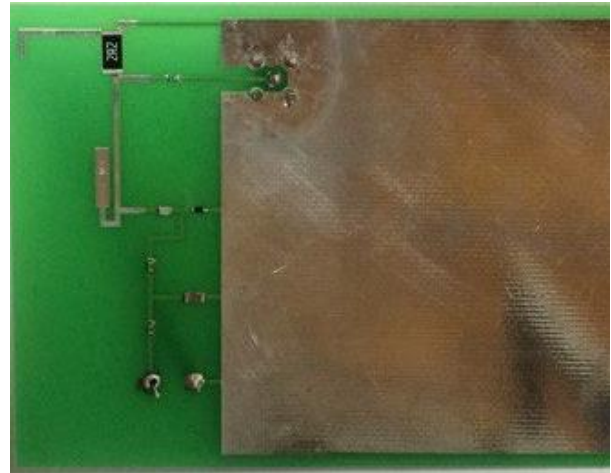


Рисунок 7 – Экспериментальный макет антенны с навесными элементами

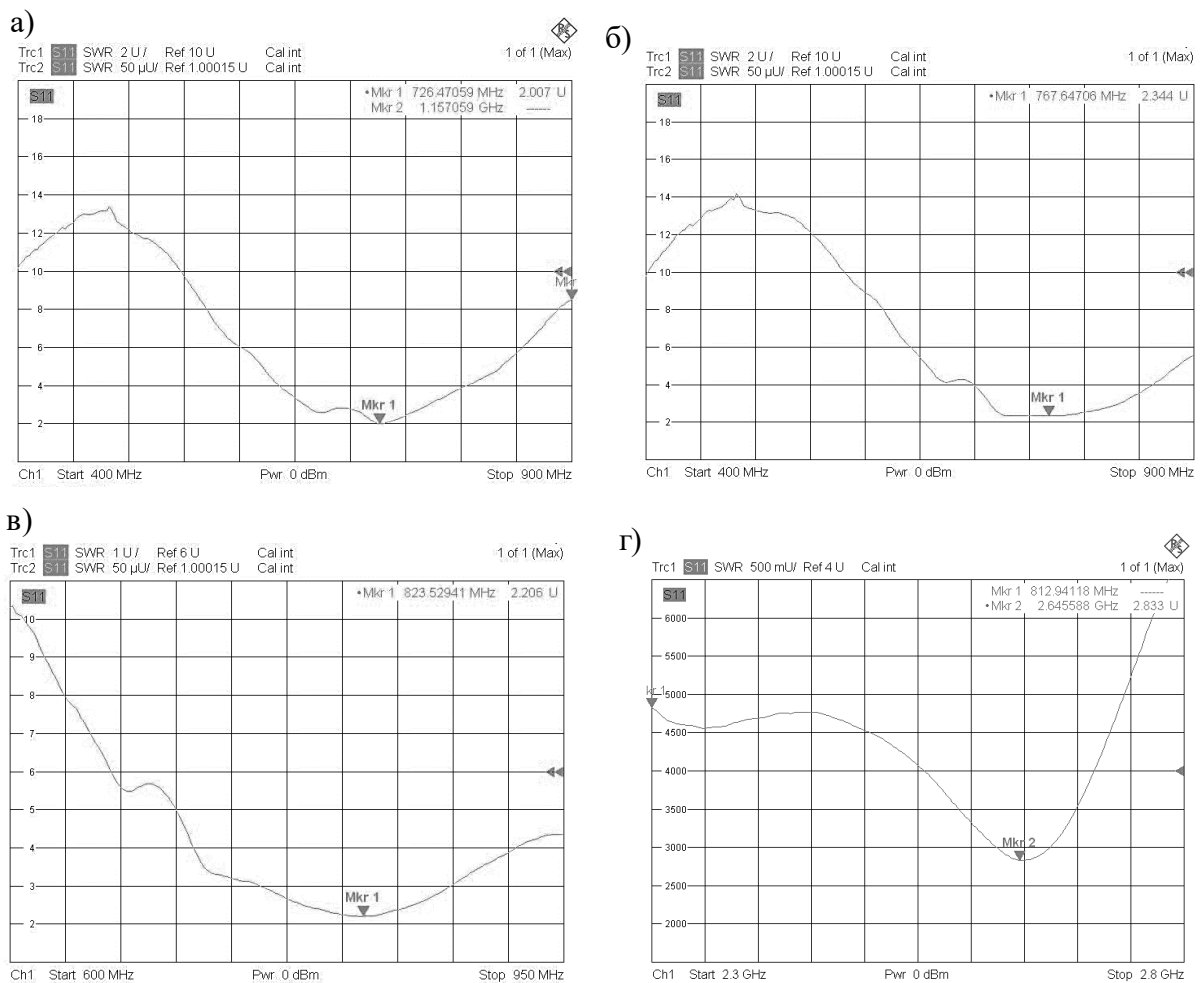


Рисунок 8 – Зависимость КСВ антенны от частоте в диапазоне а) В17 б) В13 в) В20 и г) В7

Измерения параметров макета проводились на измерительной схеме, состоящей из источника питания и векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVB-8.

Результаты измерений КСВН макета в различных частотных диапазонах показаны на рисунке 8. Следует отметить, что в макете использовался варактор типа SMV 1247 из-за трудностей с приобретением прибора типа MA27V19. Результаты моделирования и эксперимента приведены в таблице 2

Таблица 2

Сравнительная таблица результатов антенны по перестройке

Диапазон частот	Тип варактора							
	MA27V19				SMV1247			
	КСВ	Δf , МГц	C_s , пФ	U, В	КСВ	Δf , МГц	C_s , пФ	U, В
B17	2.29	66	2.4	-1	2	95	1.05	-2.8
B13	2.47	73	1.9	-1.5	2.344	107	0.82	-3.4
B20	2.52	82	1.3	-3	2.2	170	0.71	-4.8
B5-B8	2.28	94	0.9	-4.5	-	-	-	-
B7	1.3	248	0.9-2.4	-1-4.5	2.8	53	0.71-1.05	-2.4-4.8

По таблице можно сделать вывод о том, что оба варактора имеют свои достоинства и недостатки. Достоинствами варактора экспериментального макета антенны являются доступность на рынке, низкие значения КСВ и соответственно широкая полоса в НЧ диапазоне. Недостатками можно считать, что перестраиваемая антенна с помощью данного варактора не покрывает НЧ диапазон B5-B8. Ширина полосы в ВЧ диапазоне получилась недостаточно большой за счет высокого значения КСВ.

Варакторный диод, использованный в моделировании, демонстрировал лучшие результаты, покрывая все НЧ диапазоны, потребляя при этом ток не более 10 нА. Ширина полосы в ВЧ диапазоне намного шире требуемой. Ширина полосы в НЧ диапазоне тоже выше требуемой, хотя меньше по сравнению с результатом макета антенны. К сожалению, этот тип варактора недоступен на рынке, а ширина полосы частот в НЧ диапазоне B5-B8 оказалась ниже требуемой.

В заключении приводятся основные результаты, которые состоят в следующем:

1. По эквивалентной схеме с помощью программы AWR выполнен расчет и оптимизация. Была определена конфигурация предлагаемой антенны.
2. Была спроектирована двухдиапазонная перестраиваемая антенна и выполнен ее анализ в среде RFS. Разработанная конструкция антенны позволяла осуществлять перестройку частоты в низкочастотном диапазоне без изменения параметров антенны в высокочастотном диапазоне.
3. Была оптимизирована конструкция антенны по КПД, используя теорию характеристических мод. С помощью данной теории было достигнуто повышение радиационного КПД антенны на 13 % в НЧ диапазоне.
4. Были использованы способы электрической перестройки антенны по частоте с помощью элементов переключения, таких как цифровой конденсатор, р-і-п диоды, варакторный диод. Перестройка с использованием варакторного диода продемонстрировала лучшие результаты по КПД и по полосе пропускания.
5. На основе результатов моделирования изготовлен макет антенны, в которой перестройка по частоте осуществляется варакторным диодом. Результаты эксперимента хорошо совпадают с данными моделирования.
6. Диаграмма направленности антенны в НЧ диапазонах близка по форме к ДН электрического диполя, что удовлетворяет поставленным требованиям. В ВЧ диапазоне ДН менее равномерна, однако также удовлетворяет требованиям.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Григорьев А.Д., Джалилов Б.О. Электрически перестраиваемая антенна для сотовых телефонов // Изв. Вузов России. Радиоэлектроника. 2015. Вып 5. С. 39-41.

2. Григорьев А.Д., Джалилов Б.О. Сравнение методов электрической перестройки антенн для сотовых // Изв. Вузов России. Радиоэлектроника. 2017. Вып 1. С. 35-39.

Публикации в изданиях, включенных в базу данных Scopus:

1. Tunable Antenna for Mobile Applications / Andrey Grigoriev, Bahrom Djalilov // Proceedings of the 2016 ElConRus (DOI: 10.1109/ElConRusNW.2016.7448207)
2. Electrically Tuned Antenna for 4G Mobile Communication / Andrey Grigoriev, Bahrom Djalilov // Proceedings of the 2017 ElConRus (DOI: 10.1109/ElConRus.2017.7910516).

Публикации в сборниках материалов конференций:

1. А.Д. Григорьев, Б.О. Джалилов, Адаптивные антенны для сотовых телефонов // Сборник трудов Научно-технической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего», Санкт-Петербург, Россия. – 2015. - С. 145-147.
2. А.Д. Григорьев, Б.О. Джалилов, Электрически перестраиваемая антенна для сотовых телефонов // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, Россия. – 2015. – С. 149-152.
3. Grigoriev A.D, Djalilov B.O., Tunable antenna for mobile applications // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2016 ElConRusNW), Saint-Peterburg, Russia. – 2016. – p. 444-446.
4. А.Д. Григорьев, Б.О. Джалилов, Многодиапазонная антенна для сотовых телефонов // Сборник трудов Научно-технической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего», Санкт-Петербург, Россия. – 2016. - С. 145-147.
5. А.Д. Григорьев, Б.О. Джалилов, Сравнение методов электрической перестройки антенн для сотовых телефонов // Сборник трудов Всероссийской

- научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, Россия. – 2016. – С. 288-291.
6. Grigoriev A.D, Djalilov B.O., Electrically Tuned Antenna for 4G Mobile Communication // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2016 EIConRusNW), Saint-Peterburg, Russia. – 2017. – p. 151-154.
 7. А.Д. Григорьев, Б.О. Джалилов, Электрически перестраиваемая антенна для систем мобильной связи поколения 4G // Сборник докладов 70-ой Научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава университета, Санкт-Петербург, Россия. – 2017. – С. 51-54.
 8. А. А. Гавриш, Б. О. Джалилов, Исследование антенн сотовых телефонов с электрической перестройкой частоты // Сборник докладов 72-ой Всероссийская научно-техническая конференция СПбНТОРЭС, посвященной Дню радио, Санкт-Петербург, Россия. – 2017. – С. 55-56
 9. Джалилов Б.О., Гавриш А.А., Эффективный метод электрической перестройки антенн для сотовых телефонов четвертого поколения // Материалы международной научно-практической конференции «Молодёжь в поисках дружбы», Республика Таджикистан, Хатлонская область – 2017. – С. 267-270
 10. А.Д. Григорьев, Б.О. Джалилов, Адаптивная антенна для мобильной связи четвертого поколения // Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы СВЧ электроники им. В.А. Солнцева», Москва, Россия. – 2017.
 11. Grigoriev A.D, Djalilov B.O., A Tunable Antenna for Mobile Handsets // RIEC Russia-Japan Joint International Microwave Workshop. October 2017, Sendai, Japan.