

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Бобкова Николая Ивановича

на диссертацию Мигалина Михаила Михайловича

### «ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОСТРОЕНИЯ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

#### **Актуальность темы исследования**

Диссертация Мигалина М.М. посвящена особенностям построения антенных решеток диапазона миллиметровых длин волн (ММДВ). В связи с бурным развитием телекоммуникационных систем и освоением ими диапазона ММДВ, тема диссертационного исследования Мигалина М.М. является актуальной. Применение антенных решеток в системах связи позволяет динамически формировать диаграмму направленности (ДН), создавая нули в направлении помех, а максимумы – в направлении абонентских терминалов, что обеспечивает пространственное мультиплексирование в системах ММО.

Одной из серьезных проблем, стоящих перед разработчиками при создании телекоммуникационных антенных решеток, является взаимная связь между приемопередающими антеннами систем ММО, ухудшающая спектральную эффективность системы, что приводит к снижению скорости обмена данными. Решению указанной проблемы посвящено большое число научных публикаций, в частности, в 2023 году на тему снижения взаимной связи излучателей опубликовано 128 работ, что еще раз подтверждает актуальность решения проблемы.

Переход телекоммуникационных систем в диапазон ММДВ требует разработки новых подходов к измерению радиофизических параметров широко используемых фольгированных диэлектриков на частотах выше 30 ГГц. Кроме этого, при разработке и массовом производстве антенн особую роль играет автоматическое решение задач конструктивного синтеза. В этой связи исследования особенностей построения антенных решеток ММДВ, выполненные автором, а также разработанные им методики автоматического конструктивного синтеза печатных излучателей и практические методики

измерения характеристик диэлектриков в диапазоне ММДВ, являются несомненно актуальными.

Автором сформулирована **цель работы**, заключающаяся в разработке методик автоматического синтеза печатных излучателей и низкопрофильных развязывающих устройств диапазона ММДВ с расширенной полосой рабочих частот, и поставлены **задачи**, направленные на достижение цели.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений и результатов исследования**

Достоверность и обоснованность научных результатов, полученных в диссертации, подтверждены корректностью положений, результатами численного моделирования, а также положительными результатами проверки разработанных методик в ходе экспериментальных исследований характеристик многочисленных макетов печатных излучателей диапазона ММДВ. Результаты исследования также докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях по теории и технике антенн и получили одобрение специалистов.

### **Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:**

1. Решена задача автоматического конструктивного синтеза печатных излучателей в соответствии с требуемыми направленными и частотными свойствами излучателей.

2. В автоматическом режиме решена задача синтеза печатных развязывающих устройств, обеспечивающих требуемый уровень развязки в заданной полосе частот.

3. Получены численные и экспериментальные результаты исследования синтезированных структур.

4. Исследовано влияние производственных погрешностей на параметры печатных антенн и развязывающих устройств.

5. Отработана методика определения свойств фольгированных диэлектриков в диапазоне ММДВ с помощью одномодовых SIW-резонаторов и проведено численное и экспериментальное исследование их образцов.

### **Практическая значимость.**

Научные результаты, полученные в ходе исследования, имеют высокую практическую значимость, заключающуюся в следующем.

1. Создана методика и разработана программа, комбинирующая возможности численных методов оптимизации и электродинамического моделирования современных конструкций антенных систем.

2. По предложенной методике конструктивного синтеза в автоматическом режиме разработан ряд конструкций излучателей и развязывающих устройств диапазона ММДВ. Экспериментально показано расширение полосы согласования синтезированной микрополосковой антенны в 5,2 раза относительно базовой конструкции антенны, а также расширение полосы развязки печатных излучателей на 19% относительно базовой конструкции двухэлементной антенной решетки.

3. Разработана и экспериментально проверена методика измерения диэлектрической проницаемости материала подложки для устройств в диапазоне частот от 30 до 170 ГГц.

4. Выработаны рекомендации по применению генетического алгоритма при решении задач конструктивного синтеза антенн и развязывающих устройств.

Практическая значимость результатов исследования подтверждена актами о внедрении.

Автором сформулированы **положения, выносимые на защиту:**

1. Подход к автоматическому конструктивному синтезу широкополосных печатных антенн путем оптимального размещения квадратных проводников малого электрического размера на поверхности диэлектрической подложки, а также квадратных вырезов в проводящем экране, подтвержденный результатами расчетов и экспериментальными данными.

2. Методика увеличения развязки между печатными излучателями, эффективность которой подтверждена результатами моделирования и результатами проведенных экспериментальных исследований.

3. Методика учета влияния технологических погрешностей на результаты синтеза МПА на основе оптических измерений.

4. Модифицированная резонаторная методика определения свойств фольгированных диэлектриков в диапазоне ММДВ, эффективность которой подтверждена результатами моделирования и результатами проведенных экспериментальных исследований в полосе частот от 30 ГГц до 170 ГГц.

### **Оценка содержания диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Она содержит 149 страниц, 129 рисунков, 1 таблицу, список литературы из 110 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** соискателем обоснованы направления исследований. Приведен обзор литературы по вопросам построения антенных решеток и мобильных систем диапазона ММДВ. Описаны особенности построения современных антенных решеток, перечислены методы определения свойств применяемых СВЧ – диэлектриков. Обозначена проблема взаимной связи при создании печатных антенных решеток и пути её снижения. Проанализированы подходы к конструктивному синтезу антенных излучателей и антенных решеток.

**Во второй главе** рассмотрена методика решения задачи автоматического конструктивного синтеза микрополосковой антенны, сформулирована целевая функция и выполнен расчет базовой конструкции микрополосковой антенны.

Предложена методика решения задачи конструктивного синтеза микрополосковых антенн, для чего были объединены возможности САПР CST Studio Suite по электромагнитному моделированию и система математического программирования MATLAB для реализации генетического алгоритма. С помощью предложенной методики рассчитаны несколько вариантов микрополосковых антенн и приведены результаты измерения характеристик макетов, изготовленных в соответствии с расчетом, подтвердившие эффективность методики.

**В третьей главе** рассмотрена методика решения задачи автоматического конструктивного синтеза развязывающих устройств для двухэлементной антенной решетки микрополосковых излучателей, поставлена задача конструктивного синтеза развязывающего устройства и определена целевая функция. Рассмотрены результаты синтеза различных вариантов развязывающих устройств и приведены результаты измерения

характеристик макетов двухэлементных решеток с развязывающими устройствами, подтвердившие эффективность методики. Показано, что применение вложенных кольцевых резонаторов на верхнем слое диэлектрика, а также «дефектов» экрана в виде периодической структуры резонаторов, значительно повышает уровень развязки. Исследовано влияние производственных погрешностей на параметры печатных антенн и развязывающих устройств с применением методики, основанной на оптических измерениях.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному определению относительной диэлектрической проницаемости фольгированных диэлектриков, широко применяемых в СВЧ устройствах диапазона ММДВ. Приведены результаты определения ненагруженных резонансных частот 52 пар SIW-резонаторов, разработанных и изготовленных для отработки методики измерения относительной диэлектрической проницаемости в диапазоне 30–170 ГГц. Методом Монте-Карло проведена оценка влияния производственных допусков на вычисленное значение относительной диэлектрической проницаемости, представлены выводы и проведено обсуждение результатов моделирования и экспериментальных измерений, подтверждающих применимость предложенной методики определения радиофизических свойств фольгированных диэлектриков в диапазоне ММДВ.

**В заключении** сформулированы выводы о решении поставленных задач и достижении цели работы.

**В приложении** приведены акты внедрения результатов работы.

**Автореферат** достаточно полно отражает содержание и основные положения диссертационной работы.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 14 работ, выполненных в соавторстве, в том числе 7 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК и 7 докладов, опубликованных в сборниках научных трудов российских и международных научных конференций. Автором приведена оценка личного вклада в совместных работах.

**Замечания по содержанию диссертации.**

1. Во введении к диссертации не раскрыты предусматриваемые ГОСТ Р 7.0.11 методология и методы исследований, а также не определены обычно

приводимые авторами объект и предмет исследования.

2. Обширный обзор источников, приведенный в первой главе диссертации, практически полностью основан на публикациях зарубежных авторов, в то время как известно, что в нашей стране также ведутся исследования антенн диапазона ММДВ и имеются соответствующие публикации, в том числе авторов из ЮФУ.

3. На некоторых рисунках, например, на рисунке 2.6 на стр. 33-34 не расшифрованы обозначения кривых, а на рисунке 2.12 приведены диаграммы направленности антенны по КНД, в то время как в тексте говорится о зависимости коэффициента усиления.

4. В тексте диссертации на странице 37 и в подписи к рисунку 3.14 упоминается координата  $\varphi=0^\circ$ , однако ранее при описании базовой микрополосковой антенны сферическая система координат, связанная с антенной введена не была.

5 На странице 42 и на странице 61 приведено предложение «Промежуточная частота ВАЦ – 1 КГц, шаг сетки частот – 100 МГц». Столь низкая промежуточная частота в измерительной технике не применяется. Скорее всего речь идет о ширине полосы пропускания 1 КГц на промежуточной частоте.

6. На странице 78 неудачно введено обозначение  $S$  для размера пикселя, поскольку сочетанием  $S_{mn}$  в технике СВЧ обычно обозначают коэффициенты передачи ( $S$ -параметры), например  $S_{12}$  или  $S_{21}$ , которые в этом смысле встречаются в тексте диссертации повсеместно.

#### **Оценка диссертации в целом.**

В целом, несмотря на указанные замечания, относящиеся в основном к оформлению текста, диссертационная работа Мигалина Михаила Михайловича является завершенным исследованием, содержащим новые научные результаты, имеющие практическую значимость.

#### **Заключение.**

Считаю, что Мигалиным Михаилом Михайловичем достигнута цель диссертационного исследования. Результаты работы отражают научную новизну и практическую значимость проведенного исследования. Диссертация «Исследование особенностей построения антенных решеток миллиметрового диапазона длин волн» является завершенным научным

исследованием и удовлетворяет требованиям, установленным Положением «О присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Соискатель Мигалин Михаил Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.2.14 -Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, технические науки.

Официальный оппонент

Кандидат технических наук, главный научный сотрудник научно-технического сектора разработки и испытаний антенных устройств АО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент» (г. Ростов-на-Дону)

Бобков Николай Иванович

Подпись официального оппонента кандидата технических наук, главного научного сотрудника научно-технического сектора разработки и испытаний антенных устройств АО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент» (г. Ростов-на-Дону) Бобкова Николая Ивановича ЗАВЕРЯЮ:

Руководитель аппарата генерального директора АО «ВНИИ «Градиент»

«29» «08» 2025 года



А.Н. Рахимова

Адрес: 344000, г. Ростов-на-Дону, пр. Соколова, 96

Телефон: (863) 204-20-31

E-mail: rostov@gradient-rnd.ru