

На правах рукописи



Мигалин Михаил Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОСТРОЕНИЯ АНТЕННЫХ
РЕШЕТОК МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Специальность: 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» на кафедре антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления.

Научный руководитель:

Обуховец Виктор Александрович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Габриэльян Дмитрий Давидович
доктор технических наук, профессор,
ФГУП «Ростовский-на-Дону» научно-исследовательский институт радиосвязи» (г. Ростов-на-Дону), заместитель начальника научно-технического комплекса по науке

Бобков Николай Иванович
кандидат технических наук, АО «ВНИИ «Градиент» (г. Ростов-на-Дону), главный научный сотрудник научно-технического сектора разработки и испытаний антенно-фидерных устройств

Защита состоится «18» сентября 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.07 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» по адресу: Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Г», ауд. Г-117.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю. А. Жданова Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1338747/>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Отзыв на автореферат (с указанием ФИО (полностью), ученой степени со специальностью, ученого звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail, даты) с заверенной подписью рецензента и печатью учреждения просим направлять в 2 экз. ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.02.07 по адресу: 347922, Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Д», а также в формате pdf – на e-mail: ampilipenko@sfedu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета ЮФУ801.02.07,
кандидат технических наук, доцент



А. М. Пилипенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования и степень ее разработанности. В современных телекоммуникационных системах повышение скорости обмена данными достигается за счет применения широкополосных антенных систем, а также с помощью пространственного мультиплексирования Multiple Input, Multiple Output (MIMO), использующего антенные решетки. Массовое применение систем связи, работающих в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн, привело к освоению мм-диапазона¹. Согласно данным наукометрической базы SCOPUS, ежегодное число публикаций по запросу «wideband AND antenna AND mm» показывает стремительный рост: в 2006 году была опубликована лишь одна работа, а в 2022 году – 15 публикаций по данной теме, что указывает на растущую актуальность разработки широкополосных антенн мм-диапазона длин волн; суммарно в период с 2006 по 2024 год было опубликовано 83 работы и, в основном, это работы по анализу выбранных конструкций.

Многоэлементные антенные системы позволяют динамически формировать диаграмму направленности (ДН), создавая нули в направлении помех, а максимумы – в направлении абонентских терминалов (системы spatial division multiple access, SDMA), а также обеспечивают пространственное мультиплексирование в системах MIMO. Однако, работоспособность антенной решетки (АР) может быть нарушена из-за взаимовлияния антенных элементов, что влечет за собой деградацию производительности телекоммуникационной системы или её полную неспособность обмениваться данными с абонентскими терминалами. При управлении лучами ДН могут появляться нежелательные нули ДН, вызванные эффектом «ослепления» решетки, рост уровня боковых лепестков (УБЛ) и искажения ДН². Из-за роста связи между приемопередающими антеннами систем MIMO растет и корреляция каналов связи, что снижает спектральную эффективность системы и ведет к уменьшению скорости обмена данными [1]. Актуальность решения задачи снижения взаимной связи печатных излучателей подтверждается данными SCOPUS: результаты поиска «mutual AND coupling AND antenna AND reduction», по ключевым словам, аннотациям и заголовкам статей показывают стремительный рост числа публикаций в 21-м веке: в 2000 году была опубликована одна работа, а в 2023 – 128 публикаций по теме снижения взаимной связи излучателей.

Постепенный переход телекоммуникационных систем в диапазон мм-длин волн потребовал разработку новых подходов к определению

¹ Hong W. [и др.] The role of millimeter-wave technologies in 5G/6G wireless communications // IEEE Journal of Microwaves. – 2021. – Т. 1, № 1. – С. 101–122.

² Воскресенский Д. И. [и др.] Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток : учебное пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Радиотехника, 2012. – 744 с.

диэлектрических параметров широко используемых фольгированных диэлектриков на частотах более 30 ГГц. Классические резонансные методы неприменимы из-за малых размеров опытных образцов и фидерных систем³. Только при использовании точных данных о частотных свойствах диэлектрической подложки возможно достоверное моделирование СВЧ – устройств мм – диапазона. Данные SCOPUS свидетельствуют об устойчивом росте числа публикаций по запросу «(measurement or characterization) AND complex AND permittivity and millimeter» начиная с 2002 года, что подчеркивает актуальность решения проблемы определения свойств диэлектриков в мм-диапазоне длин волн.

На фоне усложнения конструкций антенн и устройств СВЧ мм-диапазона, повышенных требований к антенным решеткам, а также высокой чувствительности изготавливаемых антенных систем к погрешностям изготовления и используемым материалам эвристический подход к проектированию СВЧ – устройств, зависящий исключительно от опыта инженера, теряет свою эффективность. В связи с этим возникает необходимость развития регулярных методов решения задач синтеза, учитывающих вышеперечисленные особенности построения антенных систем мм-диапазона.

При массовом проектировании и производстве различных антенн особую роль играет автоматическое решение задач конструктивного синтеза. В отечественной и иностранной литературе немногочисленны работы по автоматическому проектированию антенн мм-диапазона и разработке подходов к их синтезу. В абсолютном большинстве рассмотренных публикаций процесс синтеза антенн имел эвристический характер. Авторы применяли системы автоматизированного проектирования (САПР), такие как Altair FEKO, Ansys Electronics Desktop или CST Studio Suite, позволяющие проводить электромагнитный анализ исследуемых устройств, но в которых автоматическая обработка большого числа антенных конструкций затруднительна. Использовались и пакеты прикладных математических программ, такие как Mathematica, MATLAB и Mathcad, в которых исследователи математически описывали решаемую задачу, а результатом её решения были размеры синтезируемой структуры, но не геометрическая модель устройства для производства. Комбинирование возможностей математических пакетов и САПР создаст новые инструменты для разработчиков антенн и устройств СВЧ, что может ускорить решение частных инженерных проблем, препятствующих освоению мм-диапазона длин волн в системах связи.

Целью диссертационной работы является разработка методик автоматического синтеза печатных излучателей и низкопрофильных

³ Krupka J. [и др.] Measurements of the complex permittivity of low loss ferrites at millimeter wave frequencies // Materials Research Bulletin. – 2024. – Т. 179. – С. 112994.

развязывающих устройств мм-диапазона длин волн с расширенной полосой рабочих частот.

Следующие **задачи** необходимо решить для достижения цели диссертационной работы:

1. Разработать методику автоматического синтеза топологии широкополосных микрополосковых антенн и развязывающих устройств для мм-диапазона длин волн на основе современных вычислительных методов.

2. Численно и экспериментально исследовать синтезированные структуры с целью проверки достижения заданных параметров.

3. Экспериментально исследовать влияние производственных погрешностей на микрополосковые антенны мм-диапазона длин волн.

4. Разработать методику определения относительной диэлектрической проницаемости фольгированных диэлектриков в мм-диапазоне длин волн.

5. Численно и экспериментально определить диэлектрические свойства фольгированного диэлектрика в мм-диапазоне длин волн

Научная новизна работы заключается в том, что:

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 мм-диапазоне с помощью одномодовых SIW-резонаторов; проведено численное и экспериментальное исследование фольгированного диэлектрика.

Решение задачи синтеза антенных излучателей относится к классу обратных задач электродинамики. Результат решения задачи синтеза может быть проверен путем решения прямой задачи электродинамики, т. е. анализа синтезированной структуры. **Достоверность результатов** синтеза микрополосковых антенн подтверждена согласованностью экспериментально полученных данных и результатов моделирования антенн в САПР. Результаты определения относительной диэлектрической проницаемости исследованного фольгированного диэлектрика в мм-диапазоне длин волн соотносятся с данными производителя для более низких частот.

Практическая ценность результатов диссертационной работы, выражается в следующем:

1. Создан инструмент для разработчиков антенн в виде программы, комбинирующей возможности численных методов оптимизации и электродинамического моделирования современных конструкций антенных систем.

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

3. Разработана и апробирована методика измерения диэлектрической проницаемости материала подложки для СВЧ – устройств миллиметрового диапазона длин волн в диапазоне от 30 до 170 ГГц.

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

Акты о внедрении результатов диссертационного исследования приведены в приложении А.

Основные положения, выносимые на защиту диссертационной работы:

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

2. Методика увеличения развязки между печатными излучателями путем оптимального размещения квадратных проводящих пластин на поверхности диэлектрической подложки, а также квадратных вырезов в проводящем экране, подтвержденная результатами расчетов и экспериментальными данными.

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

4. Модифицированная резонаторная методика определения свойств фольгированных диэлектриков в мм-диапазоне длин волн, подтвержденная результатами расчетов и экспериментальными данными.

Апробация диссертации

Результаты диссертационной работы были обсуждены в ходе следующих конференций:

1. 34-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2024).

2. Международная научная конференция «Излучение и Рассеяние Электромагнитных волн «ИРЭМВ-2023».
3. Международная научная конференция российских молодых исследователей в области электротехники и электроники (EIconRus 2023).
4. Международная научная конференция «Излучение и Рассеяние Электромагнитных волн «ИРЭМВ-2021».
5. Всероссийская научно-техническая конференция «Антенны и распространение радиоволн» (АРР 2018).

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 14 работ, в том числе 7 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК [1–7] и 7 в сборниках научных трудов российских и международных научных конференций [8–14], выполненных в соавторстве.

Личный вклад

Общий объём публикаций составил 9,375 п.л, из которых 8,86 п.л. – личный вклад автора.

Вклад автора в работе [3]: численная и экспериментальная реализация метода разности фаз для определения относительной диэлектрической проницаемости подложки, численная и экспериментальная реализация метода многомодовых резонаторов для определения относительной диэлектрической проницаемости подложки, численная и экспериментальная реализация метода одномодовых резонаторов для определения относительной диэлектрической проницаемости подложки.

Вклад автора в работах [1; 2; 10]: реализация генетического алгоритма в MATLAB, исследование поведения целевой функции, определенной в САПР, в зависимости от параметров генетического алгоритма, анализ характеристик синтезированных антенн и развязывающих структур.

Вклад автора в работах [4; 5; 6; 9; 13]: разработка макросов на языках VBScript и IronPython для САПР Ansys HFSS, исследование характеристик волноводно-щелевых антенных решеток, построенных с помощью макросов.

Вклад автора в работах [7; 14]: численное исследование 14 развязывающих устройств, экспериментальное исследование двух изготовленных антенн, определение спектральной эффективности печатных антенн с развязывающей структурой и без неё.

В работе [8] автор выполнил численное исследование девяти развязывающих структур, выполненных на основе квадратных кольцевых резонаторов.

Вклад автора в работе [11]: разработка, изготовление и экспериментальное исследование микрополосковых линий для определения относительной диэлектрической проницаемости полимера, разработка, изготовление и экспериментальное исследование кольцевых резонаторов для определения относительной диэлектрической проницаемости полимера,

экспериментальное определение относительной диэлектрической проницаемости полимера методом волноводной линии передачи.

Вклад автора в работе [12]: оптические исследования погрешностей производства многомодовых SIW-резонаторов, оценка влияния погрешностей производства многомодовых SIW-резонаторов на вычисленные значения относительной диэлектрической проницаемости подложки.

В диссертационном исследовании автором разработана методика автоматического синтеза широкополосных микрополосковых антенн, разработан программный код, объединяющий возможности САПР для электромагнитного моделирования и MATLAB для полной автоматизации процесса конструктивного синтеза микрополосковых развязывающих устройств с требуемыми частотной характеристикой и направленными свойствами, а также антенн с заданной частотной и пространственной характеристиками, численно и экспериментально исследованы опытные образцы МПА, представлена методика оценки влияния технологических погрешностей на результаты синтеза МПА и развязывающих структур на основе оптических измерений, разработана методика определения относительной диэлектрической проницаемости фольгированных диэлектриков, разработан программный код для обработки данных измерений S – параметров SIW-резонаторов и микрополосковых линий, выполнены экспериментальные исследования заданного фольгированного диэлектрика тремя методами в диапазоне 1–170 ГГц.

Структура работы

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность диссертационного исследования, отражена научная новизна результатов работы, поставлены цели и сформулированы задачи исследования, показаны методы подтверждения достоверности результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, представлен список публикаций по результатам работы.

В первой главе приведен обзор литературы, рассмотрена история развития СВЧ – техники мм-диапазона, в частности антенн, антенных решеток и мобильных систем. Описаны особенности построения современных антенных решеток, перечислены методы определения свойств применяемых СВЧ – диэлектриков. Обозначена проблема взаимной связи при создании таких антенных решеток и пути её снижения. Перечислены подходы к конструктивному синтезу антенных излучателей и антенных решеток.

Во второй главе рассмотрена методика решения задачи автоматического конструктивного синтеза микрополосковой антенны. В подразделе 2.1 поставлена задача конструктивного синтеза излучателя в заданном частотном диапазоне при заданных направленных свойствах [2; 10]. Решение задачи синтеза топологии излучающего элемента МПА осуществлено путем замены сплошной металлизированной поверхности патча, представленного на рисунке 1, на перфорированную, представляющую собой набор элементарных квадратных металлических участков, называемых пикселями. Требуемые характеристики антенны:

- центральная частота – f_0 ;
- угловые отклонения максимумов излучения на центральной частоте не превышают допустимого значения ξ в H -плоскости – $|\theta_H - \theta_0|_{f_0} \leq \xi$ и в E -плоскости – $|\theta_E - \theta_0|_{f_0} \leq \xi$;
- импеданс возбуждающей микрополосковой линии (МПЛ) – Z ;
- максимально допустимый уровень рассогласования – $|S_{11}| \leq -K$ дБ;
- полоса согласования – максимально достижимая.

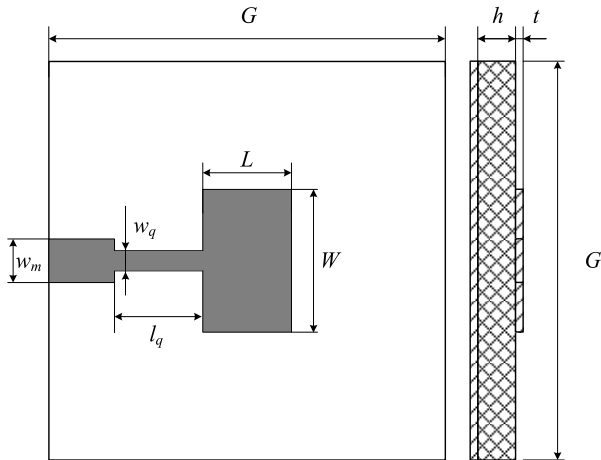


Рисунок 1 – Базовая конструкция МПА

В качестве целевой функции (ЦФ) принято выражение, учитывающее как согласование МПА в N частотных точках по уровню K , так и направленные свойства МПА. В силу слабой направленности МПА форма главного лепестка ДН не имеет большого значения, поэтому требование к ДН в ЦФ представлено в виде допустимого углового отклонения максимума ДН от нормали ξ . С учетом требований к МПА ЦФ:

$$CF = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N H(f_i)}{N}, & \text{если } (|\theta_H - \theta_0|_{f_0} \leq \xi) \wedge (|\theta_E - \theta_0|_{f_0} \leq \xi), \\ 0, & \text{если } (|\theta_H - \theta_0|_{f_0} > \xi) \vee (|\theta_E - \theta_0|_{f_0} > \xi), \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{где } H(f_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } |S_{11}(f_i)| \leq K \text{ дБ}, \\ 0, & \text{если } |S_{11}(f_i)| > K \text{ дБ}. \end{cases}$$

В подразделе 2.2 приведен расчет базовой конструкции МПА для частоты $f_0 = 33,85$ ГГц из материала RO4350В толщиной $h = 0,51$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3,48$, определенной на частоте 10 ГГц [2], и толщиной металлизации $t = 35$ мкм. Величина ЦФ для базовой конструкции составила 0,07 при $N = 1001$, $\xi = 40^\circ$, $K = -10$.

В подразделе 2.3 рассмотрена методика решения задачи конструктивного синтеза МПА мм-диапазона. Для решения задачи конструктивного синтеза МПА были объединены возможности САПР CST Studio Suite по электромагнитному моделированию МПА и система математического программирования MATLAB для реализации ГА, как показано на рисунке 2.

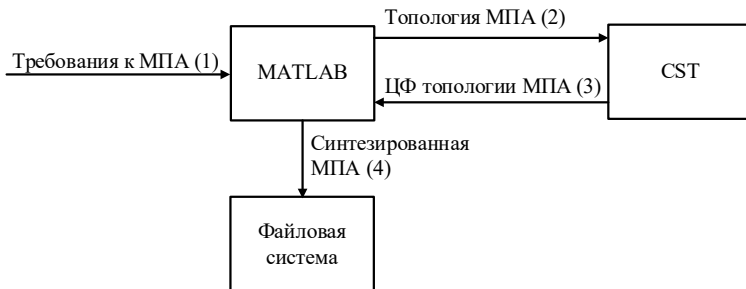


Рисунок 2 – Этапы решения задачи конструктивного синтеза

Во введении показана принципиальная возможность применения ГА для решения задачи синтеза одиночного печатного излучателя мм-диапазона длин волн. Данный алгоритм основан на принципах естественного отбора, приводящих к постепенной эволюции членов популяции и улучшению их характеристик, которые оцениваются с помощью функции приспособленности, которую в задачах оптимизации называют ЦФ. Блок-схема реализованного в данной работе ГА, направленного на максимизацию значения ЦФ, представлена на рисунке 3.

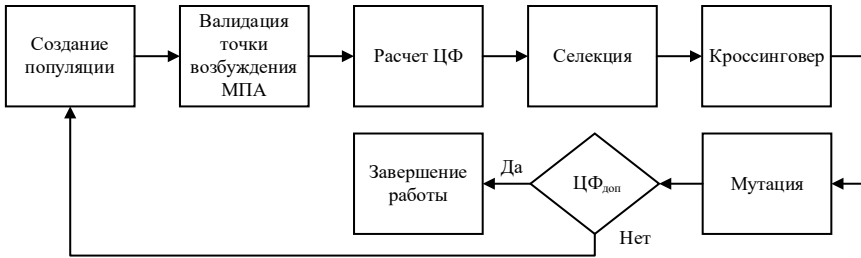


Рисунок 3 – Этапы работы ГА

В подразделе 2.4 описана реализация генетического алгоритма в САПР CST Studio Suite и MATLAB.

В подразделе 2.5 приведены исследование влияния предварительного отбора особей на скорость сходимости ГА и пример результатов конструктивного синтеза МПА с пикселями, размещенными на верхнем слое диэлектрика. На рисунке 4 сравнены модули коэффициентов отражения от входа прототипа МПА и синтезированной МПА, величина ЦФ для которой 0,36, что в 5,2 раза больше, чем у базовой МПА. На частотах выше 40 ГГц отчетливо видно улучшение согласования антенны.

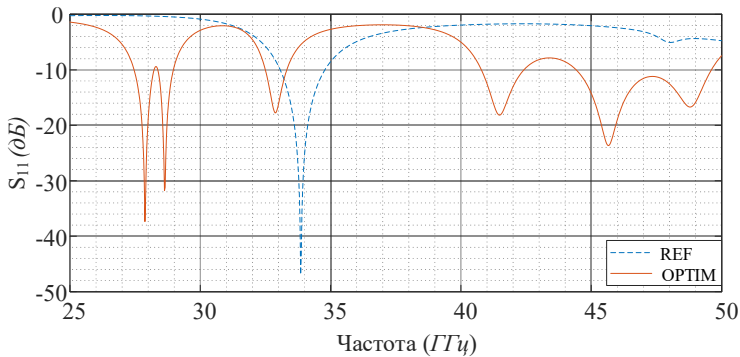


Рисунок 4 – Сравнение модулей коэффициентов отражения S_{11} синтезированной и базовой антенн

В подразделе 2.6 рассмотрен синтез конструкций МПА для производства опытных образцов с учетом ограничений на максимальную толщину фольгированного диэлектрика, вызванных применением СВЧ – соединителей типа Southwest 1892-04A, а также их влиянием на направленные свойства МПА. С помощью ГА были синтезированы и изготовлены МПА, показанные на рисунке 5: с пикселями на верхнем слое диэлектрика и на обоих слоях диэлектрика.

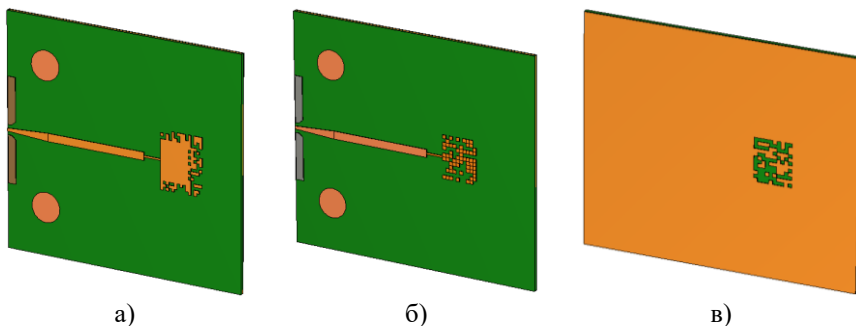


Рисунок 5 – Синтезированные МПА: с пикселями на верхнем слое (а), с «дефектом экрана» и пикселями на верхнем слое диэлектрика: вид сверху (б) и вид снизу (в)

В подразделе 2.7 представлены результаты экспериментальных исследований синтезированных МПА. Из-за чувствительности мм-устройств к производственным погрешностям были изготовлены пять опытных образцов для каждого типа синтезированной МПА и для базовой конструкции МПА. На рисунке 6 приведено сравнение модуля коэффициента S_{11} , полученного в САПР, и экспериментально полученные значения модуля S_{11} в диапазоне 25–50 ГГц для базовой конструкции МПА. Среднее значение ЦФ для изготовленных МПА совпадает с величиной ЦФ, определенной решателем в частотной области, и составляет 0,03.

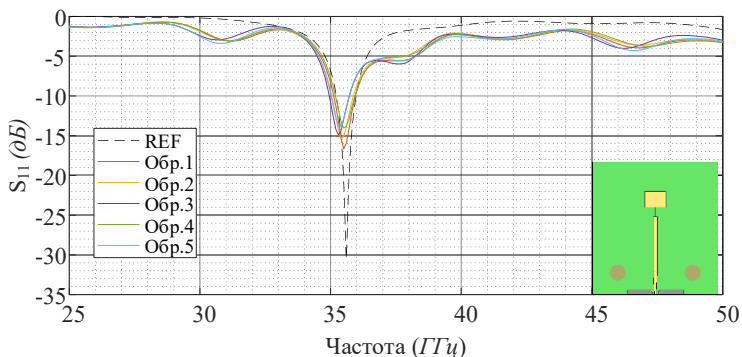


Рисунок 6 – Сравнение модулей коэффициентов отражения S_{11} синтезированной и базовой антенн

На рисунке 7 отображены различия между расчетными и экспериментальными данными для синтезированной МПА с пикселями, размещенными на верхнем слое диэлектрика. Средняя величина ЦФ для экспериментальных образцов равна 0,033, а значение ЦФ для модели МПА

составило 0,025. Значение ЦФ для синтезированной модели МПА несколько меньше величины ЦФ для базовой антенны, так как в процессе синтеза использовался временной метод, результаты которого смещены по частоте и резонанс в области верхней границы исследуемого диапазона смещен за максимальную частоту 50 ГГц.

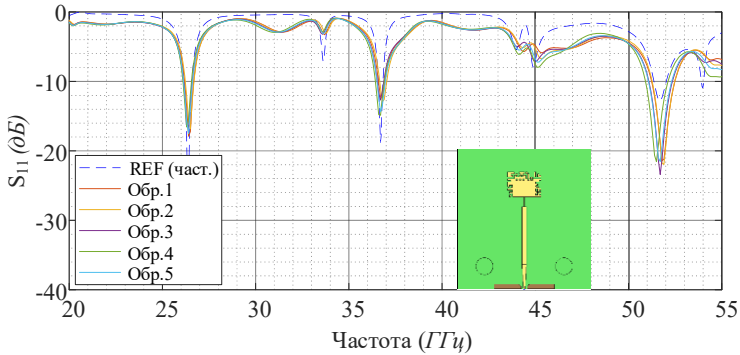


Рисунок 7 – Сравнение модулей коэффициентов отражения S_{11} синтезированной и соответствующей модели в САПР («REF»)

На рисунке 8 показан измеренный модуль коэффициента отражения от входа синтезированной МПА с пикселями на верхнем слое и «дефектами экрана» в сравнении с расчетным для данной топологии. Величина ЦФ для экспериментальных образцов равна 0,39, а значение ЦФ для модели МПА – 0,27, что может быть объяснено дополнительными потерями отраженных волн, вносимых СВЧ – соединителем и отличающимся тангенсом угла диэлектрических потерь. Экспериментально показано, что прототип синтезированной МПА с пикселями на обоих слоях обеспечивает в 13 раз более широкую полосу согласования в исследованном диапазоне, чем прототип базовой МПА.

В подразделе 2.8 приведены выводы, указывающие на применимость данного подхода к автоматическому конструктивному синтезу широкополосных печатных антенн, подтвержденные результатами расчетов и экспериментальными данными.

В третьей главе рассмотрена методика решения задачи автоматического конструктивного синтеза развязывающих устройств для двухэлементной антенной решетки. В подразделе 3.1 представлены исследованные базовые элементы для снижения взаимной связи между излучателями двухэлементной АР.

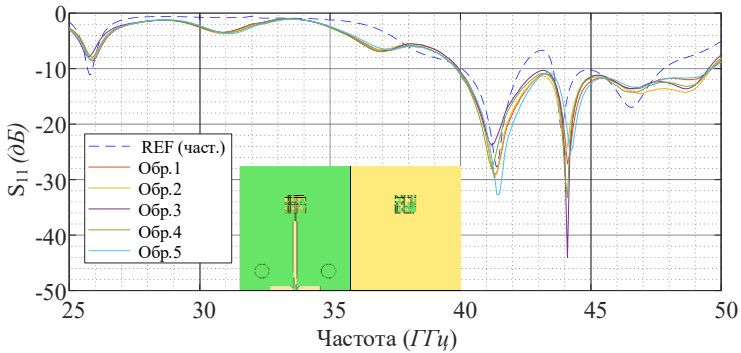


Рисунок 8 – Модуль коэффициента отражения S_{11} от входа пяти изготовленных образцов МПА с пикселями на верхнем слое и «дефектами экрана», а также соответствующей модели в САПР («REF»)

В подразделе 3.2 поставлена задача конструктивного синтеза развязывающего устройства. Требуется синтезировать печатное развязывающее устройство, ограниченное площадью $A \times G$ между излучателями базовой АР (рисунок 9) и обеспечивающее заданную развязку K между излучателями.

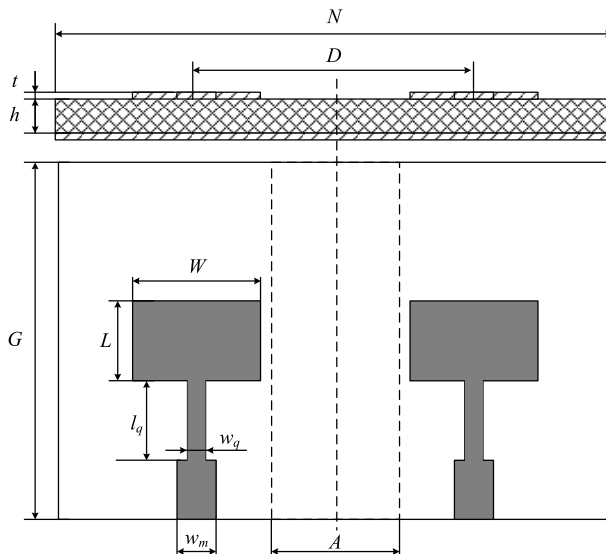


Рисунок 9 – Модель двухэлементной АР с микрополосковым возбуждением

Излучатели АР возбуждаются микрополосковыми линиями шириной w_m с волновым сопротивлением Z , соединенные с четвертьволновыми трансформаторами шириной w_q и длиной l_q . Ширина каждого излучающего полоска W , а длина L . Прототип АР размещен на подложке толщиной h с относительной диэлектрической проницаемостью ε и толщиной металлизации t .

Требования к двухэлементной АР:

- отклонение максимума излучения в H -плоскости – $|\theta_H - \theta_0| \leq \xi$;
- отклонение максимума излучения в E -плоскости – $|\theta_E - \theta_0| \leq \xi$;
- импеданс возбуждающей микрополосковой линии (МПЛ) – Z ;
- максимально допустимый уровень рассогласования излучателей на центральной частоте $|S_{11}|_{f_0} \leq A$ дБ и $|S_{22}|_{f_0} \leq A$ дБ;
- максимально допустимый уровень взаимной связи $|S_{21}| \leq -K$ дБ.

Решение задачи синтеза топологии развязывающего устройства осуществлено путем размещения на диэлектрической подложке перфорированной проводящей структуры, представляющей собой набор элементарных квадратных металлических участков. В качестве ЦФ принято выражение, учитывающее согласование патчей на центральной частоте по уровню B , их развязку в N частотных точках по уровню K , а также направленные свойства МПА. В силу слабой направленности МПА форма главного лепестка ДН АР не имеет большого значения, поэтому пусть требование к ДН АР в ЦФ представлено в виде допустимого углового отклонения максимума ДН АР от нормали ξ . С учетом требований к АР ЦФ приняла следующий вид:

$$CF = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^J H(f_i)}{J}, & \text{если } (|\theta_H - \theta_0|_{f_0} \leq \xi) \wedge (|\theta_E - \theta_0|_{f_0} \leq \xi) \wedge (|S_{11}|_{f_0} \leq B) \wedge \\ & \wedge (|S_{22}|_{f_0} \leq B), \\ 0, & \text{если } (|\theta_H - \theta_0|_{f_0} > \xi) \vee (|\theta_E - \theta_0|_{f_0} > \xi) \vee (|S_{11}|_{f_0} \leq B) \vee \\ & \vee (|S_{22}|_{f_0} \leq B), \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{где } H(f_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } |S_{21}(f_i)| \leq -K \text{ дБ,} \\ 0, & \text{если } |S_{21}(f_i)| > -K \text{ дБ.} \end{cases}$$

В подразделе 3.3 описана методика конструктивного синтеза развязывающих устройств, аналогичная методике конструктивного синтеза одиночного излучателя из главы 2. Анализ модели двухэлементной АР

проведен в $J = 1001$ частотной точке в диапазоне 25–50 ГГц при $A = -10$ дБ, $K = -30$ дБ и $\xi = 40^\circ$ с помощью временного решателя, использующего аппаратное ускорение.

В подразделе 3.4 представлены результаты синтеза развязывающих структур с помощью ГА, при расположении пикселей на верхнем слое диэлектрика, на нижнем слое и комбинация этих решений. Сравнение графиков частотной зависимости коэффициента передачи между излучателями базовой и синтезированных АР приведены на рисунке 10. Как видно из рисунка, широкополосную развязку обеспечивает комбинирование пикселей на верхнем и нижних слоях диэлектрика.

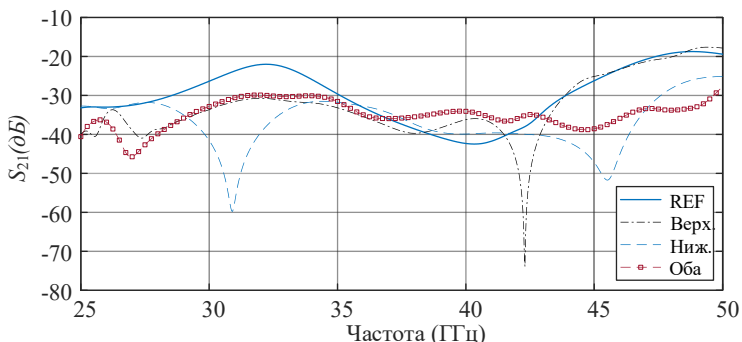


Рисунок 10 – Сравнение графиков частотной зависимости коэффициента передачи между излучателями базовой («REF») и синтезированных АР с пикселями на верхнем слое диэлектрика («Верх»), на нижнем («Ниж») и на обоих слоях («Оба»)

В подразделе 3.5 рассмотрен синтез конструкций АР для производства опытных образцов; аналогично одиночным антенным излучателям были внесены изменения в конструкцию двухэлементной АР в соответствии с производственными допусками и учетом влияния СВЧ – соединителей. С помощью ГА были синтезированы две развязывающие структуры: с пикселями только на верхнем слое диэлектрика и с пикселями, расположенными на обоих слоях.

Подраздел 3.6 посвящен экспериментальному исследованию изготовленных АР. Для учета влияния технологических погрешностей на результаты синтеза МПА на основе данных оптических измерений, определена область анализа чувствительности самых узких и коротких элементов конструкции МПА. При моделировании устройств мм-диапазона важно учесть шероховатости проводников, вносящих потери и определяющие значение конструктивной относительной диэлектрической проницаемости («design

dielectric constant») подложки. Были рассмотрены 4 модели потерь в проводниках, наименьшую среднеквадратичную ошибку между экспериментальными данными и моделированием в САПР обеспечило использование конструктивной относительной диэлектрической проницаемости, учитывающей шероховатости меди (рисунок 11). Среднее значение ЦФ для изготовленных прототипов базовой АР составляет 0,745, что сопоставимо с величиной 0,74, полученной в CST Studio Suite. Данные оптических измерений выявили относительное отклонение с геометрических размеров не более 14%.

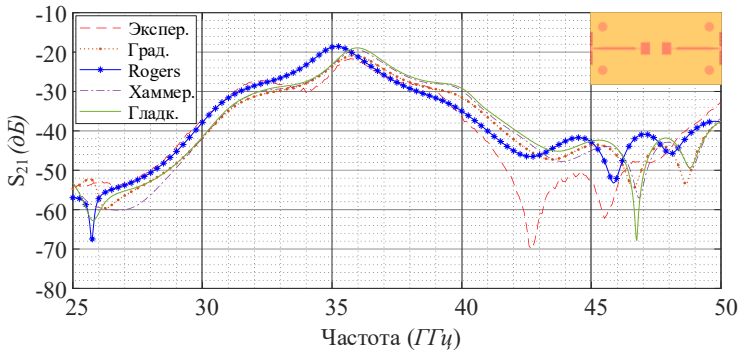


Рисунок 11 – Усредненный модуль коэффициента передачи S_{21} для пяти изготовленных образцов базовой АР («Экспер.») и четырех моделей потерь в проводника в САПР

На рисунке 12 представлено сравнение усредненных значений экспериментальных значений модуля коэффициента передачи для базовой АР и синтезированных АР. Из рисунка видно улучшение модуля коэффициента передачи для АР с пикселями на верхнем слое в диапазоне 37–42 ГГц. Усредненное значение ЦФ базовой конструкции составило 0,745, а для АР с пикселями на верхнем слое – 0,76, то есть было получено улучшение развязки на 2%. Данные оптических измерений выявили относительное отклонение полученных геометрических размеров, не превышающее 4%. ЦФ для АР с пикселями на обоих слоях – 0,889, то есть экспериментально показано улучшение развязки на 19% относительно базовой конструкции. Таким образом, комбинирование пикселей на верхнем и нижнем слоях показало свою эффективность при решении задачи конструктивного синтеза развязывающих устройств.

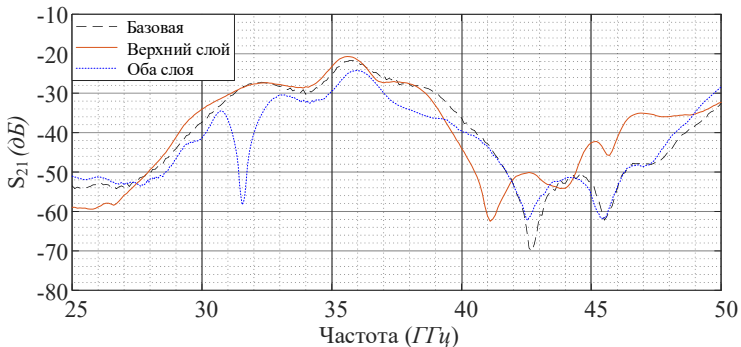


Рисунок 12 – Сравнение средних модулей коэффициента передачи S_{21} для пяти изготовленных образцов базовой АР, АР с пикселями на верхнем слое и АР с пикселями на обоих слоях

В подразделе 3.7 приведен анализ эмпирически полученных развязывающих структур на основе кольцевых резонаторов, размещенных между излучателями на верхнем и нижних слоях диэлектрика. Применение вложенных (комплиментарных) кольцевых резонаторов на верхнем слое диэлектрика, а также «дефекты» экрана в виде периодической структуры из SRR – резонаторов или ромбовидных резонаторов, показало значительное улучшение развязки в исследуемом диапазоне.

В подразделе 3.8 обсуждаются результаты численного и натурального экспериментов, подтверждающие применимость методики увеличения развязки между печатными излучателями путем оптимального размещения квадратных проводящих пластин на поверхности диэлектрической подложки, а также квадратных вырезов в проводящем экране, а также методики учета влияния технологических погрешностей на результаты синтеза МПА на основе оптических измерений.

Четвертая глава посвящена экспериментальному определению относительной диэлектрической проницаемости фольгированного диэлектрика, широко применяемого в СВЧ – устройствах мм-диапазона. В подразделе 4.1 рассмотрены предпосылки применения одномодовых SIW-резонаторов для определения ϵ .

В подразделе 4.2 рассмотрена модель SIW-резонатора. В подразделе 4.3 рассмотрена методика применения одномодовых SIW-резонаторов для определения ϵ . Фидерная система SIW-резонатора выступает в роли внешней нагрузки, что приводит к смещению резонансной частоты и снижению

добротности резонатора. Нагруженная резонансная частота f_L может быть аппроксимирована как⁴:

$$f_L = f_U \cdot \left(1 + \frac{A}{Q_e^a}\right), \quad (3)$$

где f_U – ненагруженная резонансная частота, Q_e – внешняя добротность, a и A – произвольные коэффициенты.

Для определения ненагруженной резонансной частоты, которая может быть использована для точного определения ε , изменялась конфигурация возбуждающей щели для получения зависимости нагруженной резонансной частоты от внешней добротности. Варьирование длины возбуждающей щели привело к изменению коэффициента связи возбуждающего волновода с SIW-резонатором, и таким образом был определен набор нагруженных частот. В рамках численного эксперимента рассмотрена модель резонатора на подложке из материала RO3003G2 толщиной $h = 0,127$ мм в САПР CST Studio Suite. По результатам расчетов была определена ненагруженная резонансная частота, незначительно отличающаяся от резонансной частоты, полученной методом собственных мод в САПР.

В подразделе 4.4 описано экспериментальное определение относительной диэлектрической проницаемости с помощью одномодовых резонаторов. Для определения относительной диэлектрической проницаемости в диапазоне 30–170 ГГц были разработаны и изготовлены 52 пары резонаторов: для 13 резонансных частот с 4 разными по длине возбуждающими щелями. Используя предложенную методику и значения эффективных размеров резонатора⁵, были определены ненагруженные резонансные частоты, на основе которых были определены значения ε :

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{2f_{H_{mnk}}}\right)^2 \left[\left(\frac{m}{w_{эфф}}\right)^2 + \left(\frac{n}{h_{эфф}}\right)^2 + \left(\frac{k}{l_{эфф}}\right)^2 \right], \quad (4)$$

где m, n, k – число стоячих полуволн поля по осям x, y и z , $w_{эфф}, h_{эфф}, l_{эфф}$ – эффективные значения ширины, высоты и длины.

В подразделе 4.5 представлена верификация экспериментально определенных значений относительной диэлектрической проницаемости методом разности фаз в диапазоне 1–65 ГГц, и с помощью многомодовых SIW-

⁴ Kajfez D. Q Factor Measurements Using MATLAB. – Norwood : Artech House, 2011. – 189 с.

⁵ Yan Li [и др.] Simulation and experiment on SIW slot array antennas // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2004. – Т. 14, № 9. – С. 446–448. DOI: 10.1109/LMWC.2004.832081

резонаторов в диапазоне 65–170 ГГц. Результаты обработки данных измерений в сравнении с ранее полученными результатами и данными производителя подложки до 110 ГГц представлены на рисунке 13. По данным рисунка можно сделать вывод, что частотная зависимость ϵ , полученная с помощью набора одномодовых SIW-резонаторов, согласуются с данными производителя и результатами, полученными другими методами.

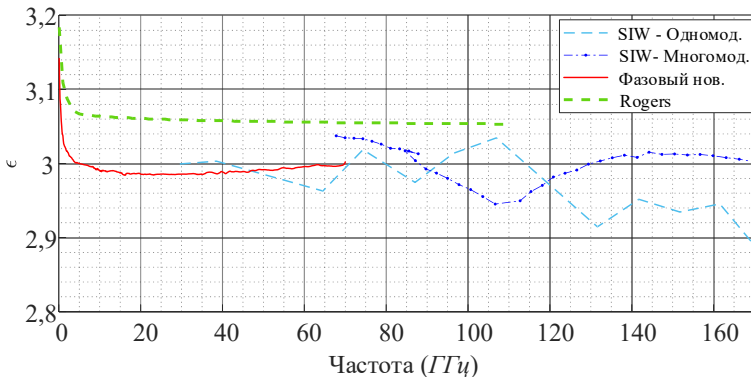


Рисунок 13 – Сравнение экспериментально определенных значений относительной диэлектрической проницаемости материала Rogers 3003G2 в диапазоне 1–170 ГГц

В подразделе 4.6 методом Монте-Карло проведена оценка влияния производственных допусков на вычисленное значение относительной диэлектрической проницаемости.

В подразделе 4.7 представлены выводы и обсуждение результатов моделирования и измерений, подтверждающих применимость предложенной методики определения свойств фольгированных диэлектриков в мм-диапазоне длин волн.

В **заключении** представлены решенные задачи и сделан вывод о достижении цели диссертационного исследования.

В **приложении** приведены акты внедрения результатов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Представленные в диссертационном исследовании результаты описывают особенности автоматизированного конструктивного синтеза МПА и АР в мм-диапазоне длин волн.

Разработаны: методика автоматического синтеза широкополосных микрополосковых антенн, программный код, объединяющий возможности САПР для электромагнитного моделирования и MATLAB для полной автоматизации процесса конструктивного синтеза микрополосковых развязывающих устройств с требуемыми частотной характеристикой и направленными свойствами, а также антенн с заданной частотной и пространственной характеристиками, численно и экспериментально исследованы опытные образцы МПА, методика определения диэлектрической проницаемости фольгированных диэлектриков, разработан программный код для обработки данных измерений S – параметров SIW-резонаторов и микрополосковых линий.

Выполнены экспериментальные исследования заданного фольгированного диэлектрика тремя методами в диапазоне $1 - 170$ ГГц.

Предложена и апробирована методика оценки влияния технологических погрешностей на результаты синтеза МПА и развязывающих структур на основе оптических измерений, проведено статистическое моделирование производственных погрешностей методом Монте-Карло для оценки их влияния на рассчитанное значение относительной диэлектрической проницаемости.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. Мигалин, М. М. Снижение взаимной связи печатных антенных элементов с помощью генетического алгоритма / М. М. Мигалин, В. А. Обуховец // Антенны. – 2024. – № 3(289). – С. 65-74. – DOI 10.18127/j03209601-202403-08 (K2).

2. Мигалин, М. М. Особенности применения генетического алгоритма для синтеза печатных антенн / М. М. Мигалин, В. А. Обуховец // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 5. – С. 129-135. – DOI 10.18127/j00338486-202405-15 (K1).

3. Мигалин, М. М. Определение параметров фольгированных диэлектриков с помощью печатных структур / М. М. Мигалин, В. А. Обуховец // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 6(242). – С. 257-266. – DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-257-266 (K2).

4. Мигалин, М. М. Применение макросов для автоматизированного выполнения однотипных операций при моделировании в САПР Ansys HFSS волноводно-щелевых антенн, построенных по SIW-технологии / М. М. Мигалин, В. Г. Кошкидько, В. В. Демшевский // Антенны. – 2023. – № 1(281). – С. 63-77. – DOI 10.18127/j03209601-202301-04 (K2).

5. Кошкидько, В. Г. Исследование частотной зависимости диаграммы направленности резонансной волноводно-щелевой антенной решетки, состоящей из подрешеток, в САПР Ansys HFSS / В. Г. Кошкидько, М. М. Мигалин // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23, № 4. – С. 15-24. – DOI 10.32603/1993-8985-2020-23-4-15-24 (K2).

6. Кошкидько, В. Г. Применение макросов языка VBScript при моделировании волноводно-щелевых антенн в САПР Ansys HFSS / В. Г. Кошкидько, М. М. Мигалин // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 6-17. – DOI 10.32603/1993-8985-2020-23-1-6-17 (K2).

7. Обуховец, В. А. Повышение спектральной эффективности систем ММО за счет снижения взаимной корреляции антенных элементов / В. А. Обуховец, М. М. Мигалин // Антенны. – 2018. – № 8(252). – С. 38-45 (K2).

Публикации в сборниках трудов конференций

8. Мигалин, М. М. Улучшение развязки печатных излучателей систем ММО мм-диапазона длин волн / М. М. Мигалин, В. А. Обуховец // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2024. – № 6. – С. 38-39.

9. Migalin, M. M. Automated SIW Slotted Waveguide Antenna Design Using ANSYS HFSS Scripts / M. M. Migalin, V. G. Koshkidko, V. V. Demshevsky // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), June 26-30, 2023, Divnomorskoe, Russia : Conference Proceedings. – Piscataway, NJ : IEEE, 2023. – P. 188-191.

10. Migalin M. M. MM-Wave Patch Antenna Synthesis Using Genetic Algorithm / M. M. Migalin, Obukhovets V. A. // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), June 26-30, 2023, Divnomorskoe, Russia : Conference Proceedings. – Piscataway, NJ : IEEE, 2023. – P. 212-215.

11. Complex Dielectric Permittivity Measurement of 3D Printing Resin FTD Nano Clear in the 1–10 GHz Band / M. M. Migalin, A. V. Kovalev, S. R. Gadzhiev, [et al.] // Proceedings of the Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (theory and practical applications), November 20, 2023, St. Petersburg, Russia. – Piscataway, New Jersey: IEEE, 2023. – P. 82-85.

12. Migalin, M. M. Manufacturing process influence on SIW resonator permittivity extraction technique at millimeter waves / M. M. Migalin, V. G. Koshkid'ko // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), June 28 – July 2, 2021, Divnomorskoe, Krasnodar Region, Russia : Conference Proceedings. – Piscataway, NJ: IEEE, 2021. – P. 155-158.

13. Koshkid'ko, V. G. Frequency Performance Analysis of a Linear Equidistant Slotted Waveguide Antenna Consisting of Subarrays / V. G. Koshkid'ko, M. M. Migalin // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Krasnodar Region, Russia June 24-28, 2019 : Conference Proceedings. – Piscataway, NJ: IEEE, 2019. – P. 480-483.

14. Обуховец, В. А. Исследование методов развязки антенных элементов систем ММО в устройствах мобильной связи / В. А. Обуховец, М. М. Мигалин // Антенны и распространение радиоволн: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 17–19 октября 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), 2018. – С. 117-121.

Мигалин Михаил Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОСТРОЕНИЯ АНТЕННЫХ
РЕШЕТОК МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Автореф. дис. на соискание учёной степени канд. тех. наук

Подписано к печати 06.06.2025 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 80 экз.

Усл. печ. лист. 1,0. Уч. изд. л. 1,0. Заказ №1249

Отпечатано типографией ДИАПАЗОН+

г. Ростов-на-Дону, пер. Островского, 124