

На правах рукописи



Нгуен Мань Туан

Антенны, моделируемые оптимальной токовой сеткой

Специальность 2.2.14 –
Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель –

Газизов Тальгат Рашитович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой телевидения
и управления, ТУСУР

Официальные оппоненты –

Дунаевский Григорий Ефимович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиоэлектроники
Национального исследовательского Томского
государственного университета;

Горбачев Анатолий Петрович,
доктор технических наук, профессор,
профессор Новосибирского государственного
технического университета

Ведущая организация –

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
университет телекоммуникаций
и информатики»

Защита состоится 09 сентября 2025 г. в 09 часов 00 мин на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУР, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/cc369h62>.

Автореферат разослан «__» июня 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор физико-математических наук



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

С конца XIX века радиоэлектронные устройства (РЭУ) активно проникали во все сферы современного общества. Этому в немалой степени способствовали их антенны. С быстрым развитием современных технологий РЭУ становятся меньше по размеру и массе. В этой связи возникает необходимость совершенствования антенн и разработки их новых типов с меньшими размерами и массой, которые могут быть интегрированы в РЭУ и при этом обеспечивать необходимые характеристики. Учитывая быстрое изменение климата по всему миру, РЭУ должны эффективно работать в различных погодных условиях. Более того, для улучшения передачи и приема сигнала антенна часто размещается вне помещений. Следовательно, необходимо уменьшить поверхность антенны, чтобы снизить её сопротивление воздушным или водным потокам, позволяя эффективно работать в сложных погодных условиях, таких как сильные ветер и дождь. Кроме того, часто устанавливается много наружных антенн, что значительно влияет на общий ландшафт. Поэтому актуальна разработка новых антенн, без этих недостатков.

Создание антенн из проводной сетки (ПС) представляет собой одно из простых, но эффективных направлений их развития. Переход от сплошных металлических поверхностей традиционных антенн к ПС значительно уменьшает их площадь поверхности и массу. Это позволяет легко интегрировать их в радиолокационные и спутниковые системы. Хотя антенны из ПС имеют много преимуществ, они всё же обладают некоторыми ограничениями, такими как низкий коэффициент усиления и узкая полоса рабочих частот. Кроме того, использование всех проводов в сетке может быть избыточным и приводит к тому, что масса и площадь поверхности антенны не оптимизированы. Это требует совершенствования параметров ПС для создания антенн, устраняющих эти недостатки.

Таким образом, создание разреженных антенн из ПС актуально. Это даёт более эффективные, компактные и дешёвые антенные системы, применимые в различных сферах нашей жизни, начиная от коммуникаций и связи и заканчивая технологическими и научными исследованиями.

Степень разработанности темы

Многие публикации последних лет посвящены уменьшению массы и размеров антенн и затрат для их моделирования и изготовления. Известными зарубежными исследователями в этой области являются Balanis A., Babich F., Buttazzoni G., Comisso M., Fourie A.P.C., Haupt R., Harrington R.F., Lee K.S.H., Luca D., Rao S., Richmond J.H., Rubinstein A., Trueman C.W., Tubbal F.E., Werner D.H. и др. Российские ученые также активно работали в данной области: Бузов А.Л., Веремьев В.И., Воскресенский Д.И., Гошин Г.Г., Ключев Д.С., Кравченко Г.Г., Кутузов В.М., Минкин М.А., Надененко С.И., Седельников Ю.Е., Степанов М.А., Тыщук Ю.Н. и др. исследовали характеристики разреженных антенн и антенных решёток.

Недавно Алхадж Хасан А.Ф. и Газизов Т.Р. запатентовали (RU 2814795) аппроксимацию оптимальной токовой сеткой (АОТС) для создания

разреженных антенн. Её идея – исключить из сетки провода с малыми токами, так как их вклад в излучение мал. Это уменьшает массу, парусность и габариты антенны при контроле её характеристик допуском удаления элемента сетки (ДУЭС), а также затраты на её последующее моделирование, но применение АОТС не исследовалось.

Цель работы – разработать методику создания разреженных антенн из ПС на основе АОТС. Для её достижения надо решить следующие **задачи**:

1. Модифицировать АОТС для упрощения её применения.
2. Разработать рекомендации по моделированию исходных структур из ПС, к которым применимы АОТС и её модификации для создания разреженных структур из ПС.
3. Применить АОТС и её модификации к различным типам антенн и проанализировать влияние выбора частоты, на которой моделируются разреженные антенны.
4. Разработать методику создания разреженных антенн из ПС и проверить её экспериментально.

Научная новизна

1. Предложены модифицированные аппроксимации оптимальной токовой сеткой, отличающиеся удалением или соединением свободных проводов после аппроксимации оптимальной токовой сеткой.
2. Разработана методика создания антенн из проводной сетки, отличающаяся использованием аппроксимации оптимальной токовой сеткой и её модификаций.
3. Впервые созданы разреженные рупорные антенны за счёт аппроксимации оптимальной токовой сеткой.

Теоретическая значимость

1. Применительно к проблематике диссертации результативно использован метод моментов (МоМ).
2. Проведена модернизация аппроксимации оптимальной токовой сеткой.
3. Изучено влияние ДУЭС на разреженные антенны.

Практическая значимость

1. Создана система практических рекомендаций по моделированию разреженных антенн.
2. Разработаны программные модули с графическим интерфейсом пользователя для автоматизированного проектирования разреженных антенн.
3. Созданы разреженные рупорные антенны с меньшей массой.
4. Результаты использованы в учебном процессе ТУСУРа и трёх научно-исследовательских работах госзадания (3 акта внедрения и письмо поддержки).

Методы исследования: компьютерное моделирование, АОТС, метод моментов, тонкопроводная аппроксимация, лабораторный эксперимент.

Положения, выносимые на защиту

1. Разреженные антенны из проводной сетки совершенствуются модифицированными аппроксимациями оптимальной токовой сеткой: устраняющей свободные провода; соединяющей ближайшие провода; восстанавливающей провода с максимальным током.

2. Методика создания антенн, аппроксимированных оптимальной токовой сеткой, позволяет создать разреженные проводные сетки рупорной, конической рупорной, рефлекторной и патч-антенн с контролируемым уменьшением относительного числа проводов сетки, требуемой памяти (пропорциональной квадрату этого числа) и основного времени вычисления (пропорционального кубу этого числа) при последующем моделировании.

3. Созданные разреженные рупорные антенны из проводной сетки позволили уменьшить массу рупорной антенны до 1,4 и 9,2 раза, а площадь поверхности – до 1,5 и 7,5 раза, по сравнению с исходной структурой из проводной сетки и сплошной структурой, при среднем расхождении по модулю коэффициента отражения до 2,1 дБ, коэффициенту стоячей волны по напряжению – 0,3, модулю импеданса – 6,2 Ом и диаграммам направленности в E и H плоскостях – 2,9 и 3,1 дБ.

Достоверность результатов подтверждена компьютерным моделированием и лабораторным экспериментом. Модификации АОТС и рекомендации по моделированию структур из ПС проведены на основе широко известного и проверенного метода моментов. Экспериментальные данные, полученные при создании разреженных антенн из ПС, соответствуют моделированию, что подтверждает эффективность предложенной методики.

Использование результатов

1. Проект «Теоретические основы создания перспективных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, работающей в экстремальных условиях», госзадание FEWM-2022-0001, 2022–2023 гг.

2. Проект «Исследование путей создания пространственно-распределенных многоцелевых информационно-телекоммуникационных систем радиомониторинга и связи, включающих оптические каналы, их ключевых компонент на основе численных и экспериментальных методов анализа СВЧ и оптических сигналов в процессе их формирования, преобразования и обработки в радиочастотных устройствах, приемных и передающих фотонных интегральных модулях и при распространении в неоднородных средах», госзадание FEWM-2023-0014, 2023–2025 гг.

3. Проект «Методология автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, функционирующей в условиях деструктивных воздействий», госзадание FEWM-2024-0005, 2024–2026 гг.

4. Учебный процесс по дисциплине «Основы компьютерного моделирования и проектирования РЭС» для студентов бакалавриата радиотехнического факультета ТУСУРа.

Апробация результатов. Результаты позволили подготовить заявки и победить в конкурсах: госзаданий (проекты FEWM-2022-0001, FEWM-2023-0014, FEWM-2024-0005); на назначение стипендий (Президента ТУСУРа в 2023 г., Правительства РФ студентам и аспирантам по приоритетным направлениям в 2023 г., «Просвещение» фонда «Традиции и дружба» Посольства Вьетнама в России в 2023 и 2024 гг., им. К.А. Валиева в 2024 г., администрации Города Томска для талантливой и одаренной молодёжи в

2024 г.). Результаты докладывались на конференциях: Научная сессия ТУСУР, Томск, 2023, 2024; ЭСиСУ, Томск, 2023, 2024; ПРФН, Томск, 2023, 2024; РРВ, Йошкар-Ола, 2023; НИР, Омск, 2023, 2024; Техносферная и информационная безопасность, Тольятти, 2023; Школа молодых новаторов, Курск, 2023; Актуальные проблемы прикладной математики и механики, Джанхот, 2023; Актуальные проблемы физической и функциональной электроники, Ульяновск, 2023; ИТММ, Томск, 2023; СВЧ, Омск, 2024; Шарыгинские чтения, Томск, 2024; EDM, Altai Republic, 2023, 2024; USBEREIT, Yekaterinburg, 2023; APEDE, Saratov, 2024; UralCon, Magnitogorsk, 2023, 2024; SIBIRCON, Novosibirsk, 2024; RusAutoCon, Sochi, 2023, 2024; ICIEAM, Sochi, 2023; ICCT, Vladikavkaz, 2024; ADMInC, St. Petersburg, 2023, 2024; WECONF, St. Petersburg, 2024; SYNCHROINFO, Vyborg, 2024; EMCTECH, Vienna, Austria, 2024; PIERE, Novosibirsk, 2024.

Публикации. Опубликовано 67 работ (6 без соавторов): 5 статей в журналах из перечня ВАК; 1 статья в журнале из перечня ВАК по смежной отрасли наук; 3 статьи в журналах, индексируемых WoS/Scopus из Q1/Q2; 2 статьи в других журналах, индексируемых WoS/Scopus; 21 доклад в трудах конференций, индексируемых WoS/Scopus; 13 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и 22 доклада в трудах других конференций (в автореферате не приведены).

Личный вклад. Участие в постановке задач исследования и получении результатов, составляющих научную новизну работы. Часть данных по моделированию получена совместно с *Алхаджем Хасаном А.Ф.* Изготовление разреженных антенн выполнено с *Дангом Т.Ф.* Непосредственный вклад автора состоит в моделировании, обработке и интерпретации результатов.

Структура и объём: введение, 5 разделов, заключение, список сокращений, список литературы из 416 наименований и приложение; объём с приложением – 255 с., в т.ч. 178 рисунков и 60 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор по теме исследования

В подразделе 1.1 показана актуальность работы и обоснован выбор МоМ для проектирования антенн. **В подразделе 1.2** выполнен обзор аппроксимации поверхности антенн проводами, а **в подразделе 1.3** – моделирования разреженных антенн из ПС с помощью АОТС на основе МоМ. **В подразделе 1.4** сформулированы цель и задачи работы.

2. Модификации аппроксимации оптимальной токовой сеткой

В подразделе 2.1 разработаны модификации АОТС на основании геометрического положения, такие как соединяющая АОТС (САОТС), устраняющая АОТС (УАОТС) и соединяющая ближайшие АОТС (СБАОТС). После АОТС при большом ДУЭС для непечатных антенн часто возникают технические трудности из-за наличия свободных (несоединенных) проводов. Для устранения этого недостатка САОТС восстанавливает радиальные провода, идущие к свободным проводам до их соединения с любым проводом сетки, УАОТС ищет свободные провода и удаляет их, оставляя только подключенные провода к основной сетке, а СБАОТС восстанавливает только те провода,

которые необходимы для установления связи между этим проводом и ближайшими к нему проводами в сетке. Сначала, для пояснения модификации АОТС описана аппроксимация поверхности рефлекторной и конической рупорной антенн с помощью ПС. Затем, пояснены предлагаемые подходы к получению разреженных антенн на основе геометрического расположения проводов в сетке. Показано, что с их помощью можно получить разреженные антенны, позволяющие не только снизить технические трудности при её изготовлении, но и использовать её в последующем моделировании с минимальными вычислительными затратами и достигать при этом приемлемого сохранения характеристик. Однако, они применимы только к радиальным структурам из ПС, таким как рефлекторные и конические рупорные антенны. Поэтому, надо модернизировать существующие подходы для улучшения точности и расширения их применения на все структуры из ПС. В подразделе 2.2 модернизированы АОТС, УАОТС и СБАОТС для создания разреженных антенн. Основные результаты заключаются в выявлении ограничений предыдущих алгоритмов и подробном описании модернизации каждого для устранения этих ограничений. На основе АОТС и её модификаций разработаны новые алгоритмы, использующие координаты начала и конца проводов в сочетании с алгоритмом поиска свободных проводов и определения короткого пути для их соединения. Эти алгоритмы отличаются повышенной точностью, эффективностью и универсальностью, что позволяет применять их к различным типам структур из ПС. Также представлена модифицированная АОТС, называемая максимально-токовой АОТС (МТАОТС), позволяющая создать разреженную антенну из соединяющих проводов с максимальным током, поскольку их вклад в излучение больше.

3. Рекомендации по проектированию антенн из проводной сетки для создания разреженных структур

В подразделе 3.1 предложены рекомендации по проектированию исходной ПС рупорных антенн, подходящей для получения разреженных ПС после АОТС и её модификаций. Показаны различия между новыми и ранее предложенными рекомендациями. Новые проверены на рупорных антеннах UHF-, X- и K/Ка-диапазонов (рисунок 3.1). Модуль коэффициента отражения ($|S_{11}|$), максимальный коэффициент усиления ($KУ_{\text{макс}}$) и коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) рупорных структур из ПС, спроектированных по новым рекомендациям, сравнивались с полученными численно другими методами, а также экспериментально для тех же антенн (рисунки 3.2–3.4).

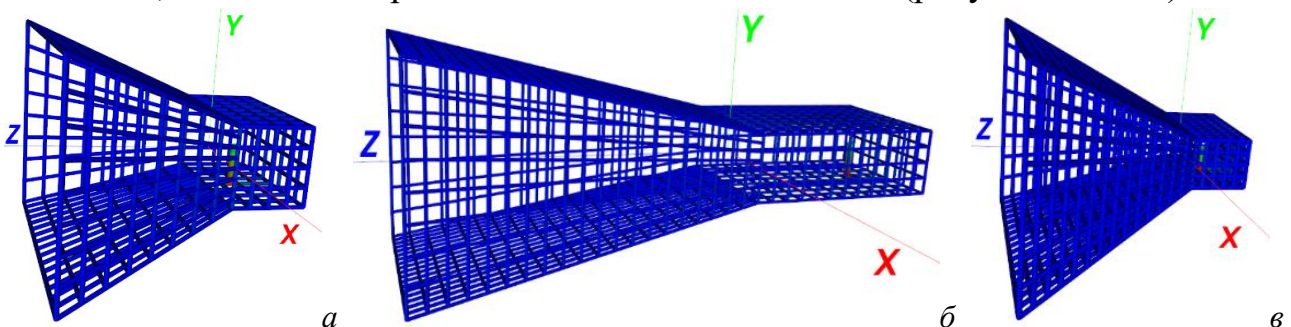


Рисунок 3.1 – Рупорные антенны из ПС для UHF- (а), X- (б) и K/Ка- (в) диапазонов частот

Минимум $|S_{11}|$ рупорной антенны UHF-диапазона составляет: для ПС минус 34,5 дБ на частоте 855 МГц; для сплошной структуры в CST минус 39,1 дБ на частоте 840 МГц, в IE3D минус 25,9 дБ на частоте 840 МГц и при измерении минус 34,1 дБ на частоте 860 МГц (рисунок 3.2а). Полоса рабочих частот ($|S_{11}| < -10$ дБ) для ПС немного больше, чем для сплошной антенны. Она составляет: для ПС 0,52 ГГц (0,7–1,22 ГГц); для сплошной структуры в CST 0,42 ГГц (0,71–1,13 ГГц), в IE3D 0,45 ГГц (0,71–1,16 ГГц) и при измерении 0,48 ГГц (0,71–1,19 ГГц). Сравнение $KU_{\text{макс}}$ также показало хорошую согласованность. Примечательно, что $KU_{\text{макс}}$ для ПС немного выше, чем для сплошной структуры в диапазоне частот 0,95–1,3 ГГц.

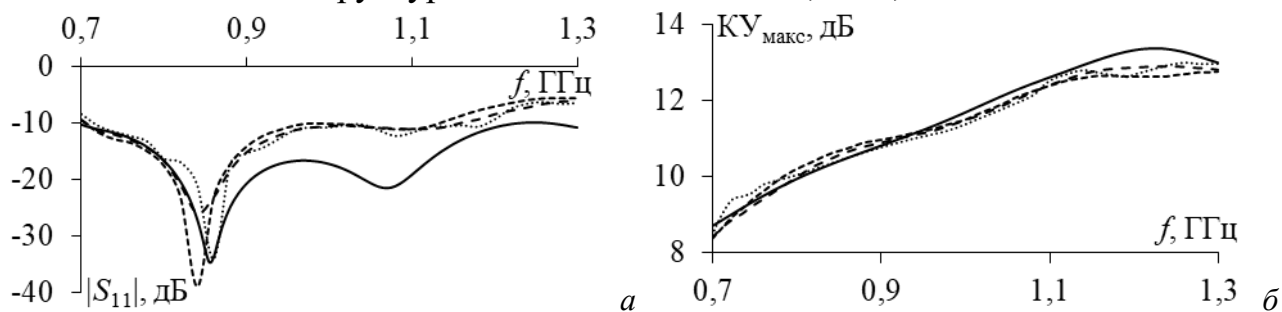


Рисунок 3.2 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $KU_{\text{макс}}$ (б) рупорной антенны UHF-диапазона, полученные для ПС (—) и сплошной структуры в CST (---), IE3D (— · —) и измерением (····)

Из рисунка 3.3 видно, что результаты для ПС немного хуже измеренных для различных структур. Так, КСВН для ПС немного выше измеренных на большинстве частот диапазона, но меньше 1,6 и, по-прежнему, обеспечивает рабочую полосу в X-диапазоне ($КСВН < 2$). $KU_{\text{макс}}$ для ПС ниже вычисленных и измеренных, но различие мало (лишь 0,5 дБ).

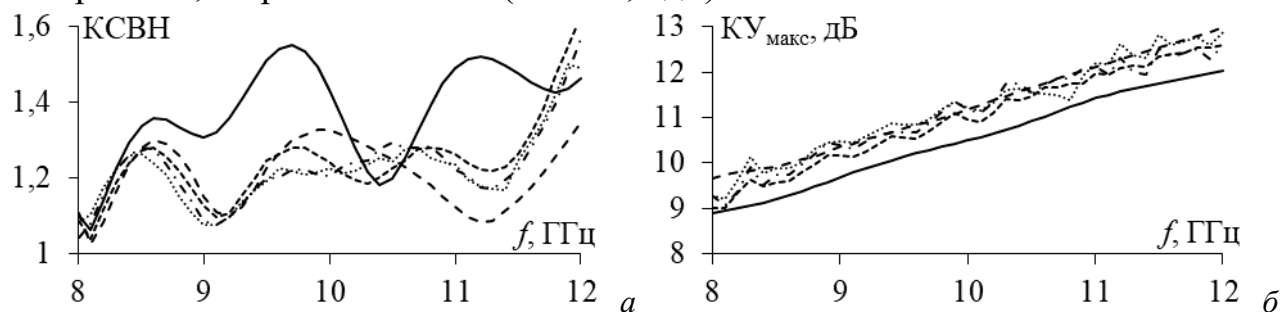


Рисунок 3.3 – Частотные зависимости КСВН (а) и $KU_{\text{макс}}$ (б) рупорной антенны X-диапазона, полученные для ПС (—), экспериментально для металлической печати (— · —), медного (····) и металлического покрытий (---) и численно в HFSS (---)

Из рисунка 3.4а видно, что $|S_{11}|$ для ПС ближе к измеренным, чем вычисленный в CST: рабочая полоса для ПС составляет 13,6 ГГц (23,5–37,1 ГГц); для сплошной структуры в CST 3,5 ГГц (26,6–30,1 ГГц), а при измерении 16,5 ГГц (19,9–36,4 ГГц). Кроме того, резонансные частоты составляют: для ПС 25,9 и 29,7 ГГц; для сплошной структуры в CST 25,5, 28,0 и 31,4 ГГц, а при измерении 26,3 и 29,7 ГГц. Из рисунка 3.4б видно, что $KU_{\text{макс}}$ для ПС всегда выше вычисленных и измеренных для сплошной структуры: на частоте 28 ГГц $KU_{\text{макс}}$ для ПС составляет 14,4 дБ; для сплошной структуры в CST 13,6 дБ, а при измерении 12,0 дБ.

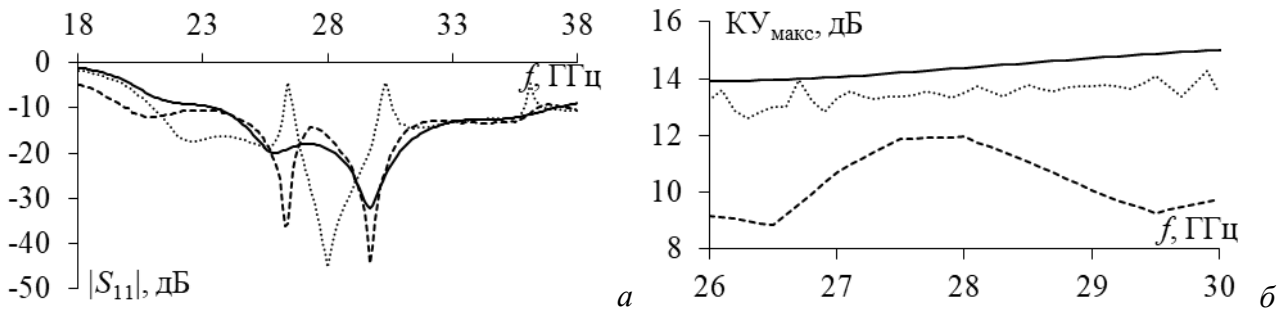


Рисунок 3.4 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $KU_{\text{макс}}$ (б) рупорной антенны К/Ка-диапазона, полученные для ПС (—) и сплошной структуры в CST (···) и измерением (- -)

В подразделе 3.2 предложены и подробно описаны рекомендации по проектированию исходной ПС для конической рупорной антенны с различными моделями возбуждения, на основе которых могут быть получены разреженные ПС после АОТС и её модификаций. Рекомендации проверены на антеннах Х- и С-диапазонов (рисунок 3.5). Рисунки 3.6 и 3.7 показывают согласованность характеристик ПС и сплошной структуры (моделировалась МКРВО).

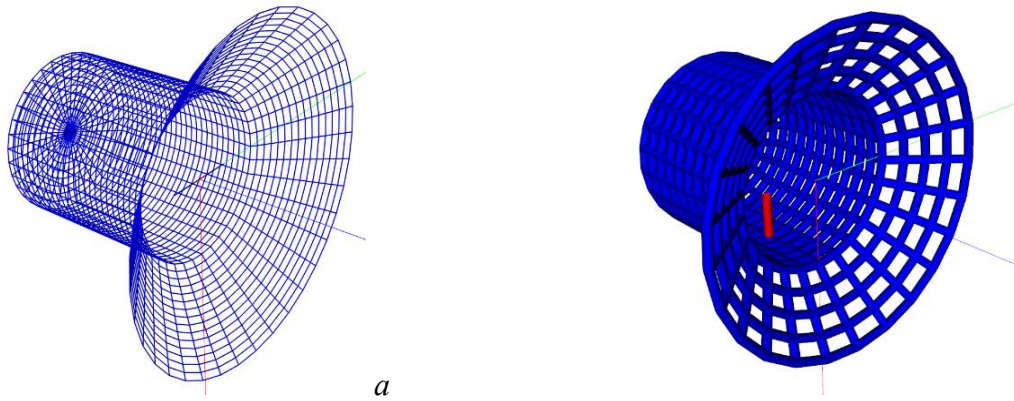


Рисунок 3.5 – ПС для конических рупорных антенн Х- (а) и С- (б) диапазонов

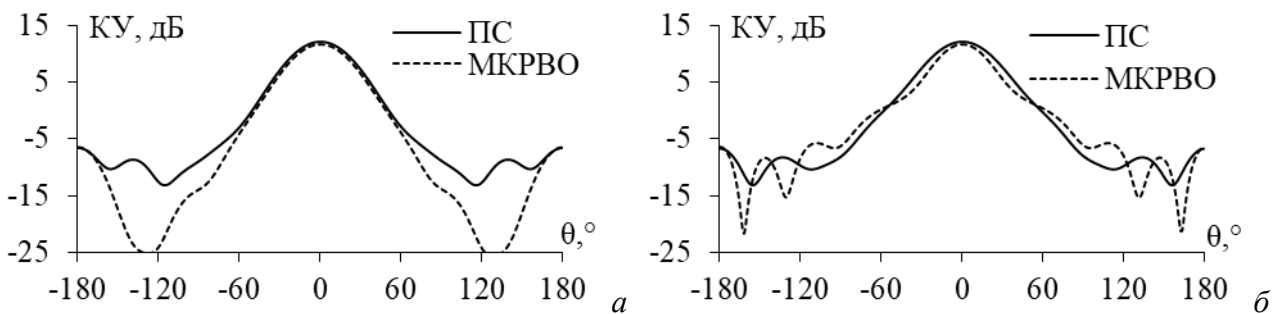


Рисунок 3.6 – КУ конической рупорной антенны Х-диапазона в E (а) и H (б) плоскостях на частоте 8 ГГц, вычисленные для ПС и сплошной структуры посредством МКРВО

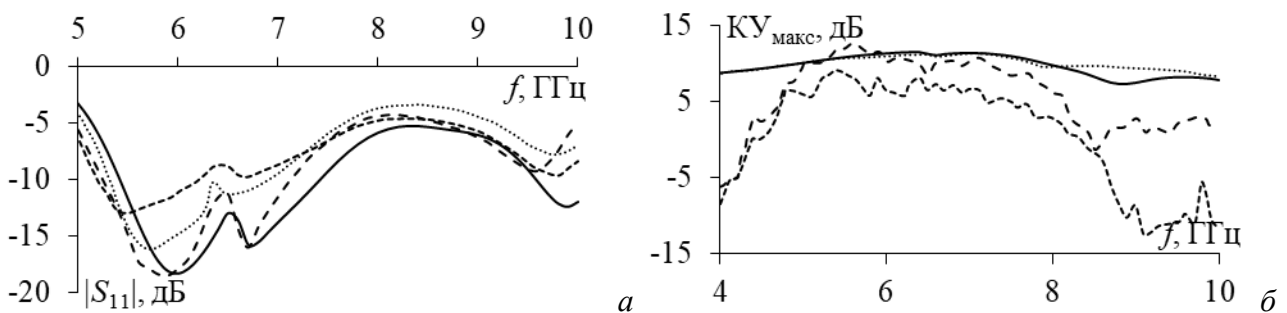


Рисунок 3.7 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $KU_{\text{макс}}$ (б), измеренные на моделях из металлизированной смолы (- -) и металлического литья (—) и вычисленные для модели в HFSS (···) и ПС (—) для конической рупорной антенны С-диапазона

В подразделе 3.3 представлена подробная методология аппроксимации сплошной поверхности рефлекторных антенн посредством ПС. Предложены новые рекомендации по проектированию исходной ПС, на основе которой могут быть получены разреженные ПС после АОТС и её модификаций. Их эффективность показана для разных рефлекторных антенн, работающих на центральных частотах 2,4 ГГц (S_1) и 3,5 ГГц (S_2) (рисунок 3.8). Сравнение диаграмм направленности (ДН) КУ на рисунках 3.9 и 3.10 для ПС и сплошных структур также показало согласованность, что подтверждает эффективность исходных ПС, созданных на основе предложенных рекомендаций.

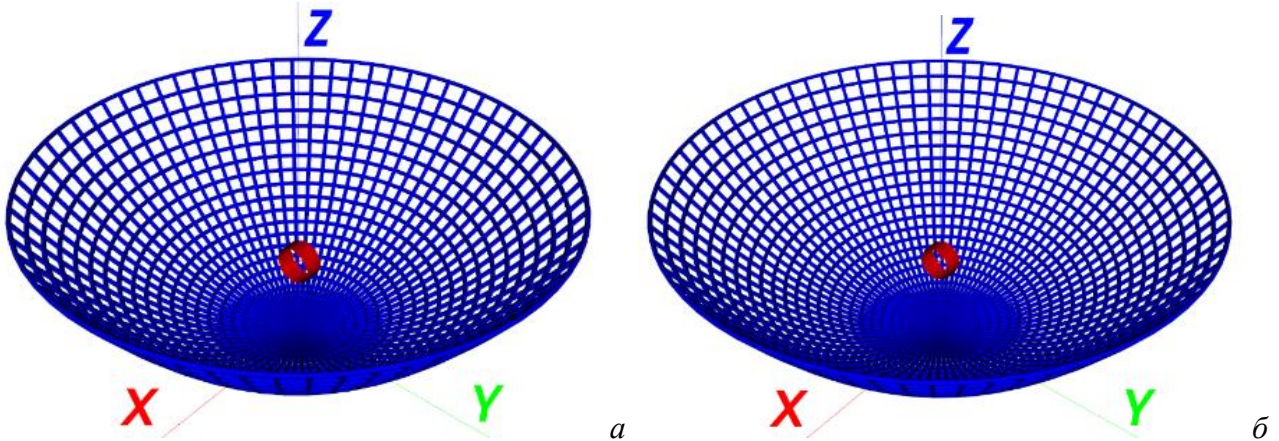


Рисунок 3.8 – Рефлекторные антенны из ПС: S_1 (а) и S_2 (б)

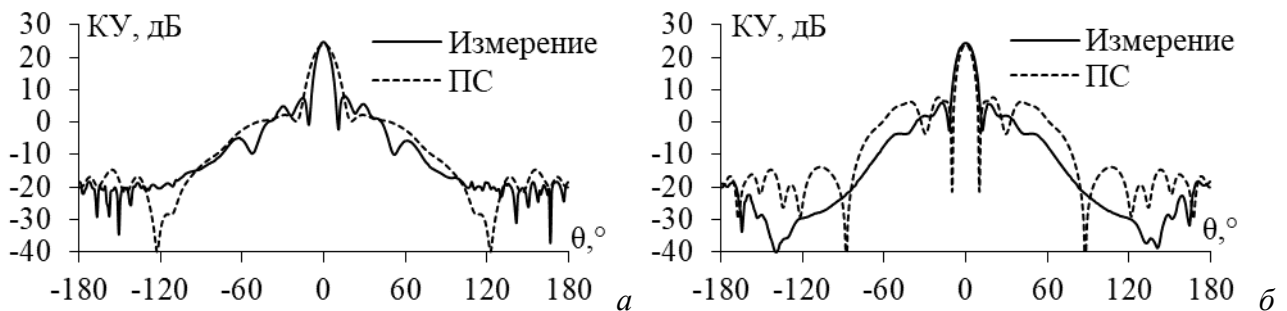


Рисунок 3.9 – ДН КУ рефлекторной антенны S_1 в E (а) и H (б) плоскостях на 2,4 ГГц, вычисленные для ПС на основе МоМ и измеренные для сплошной структуры

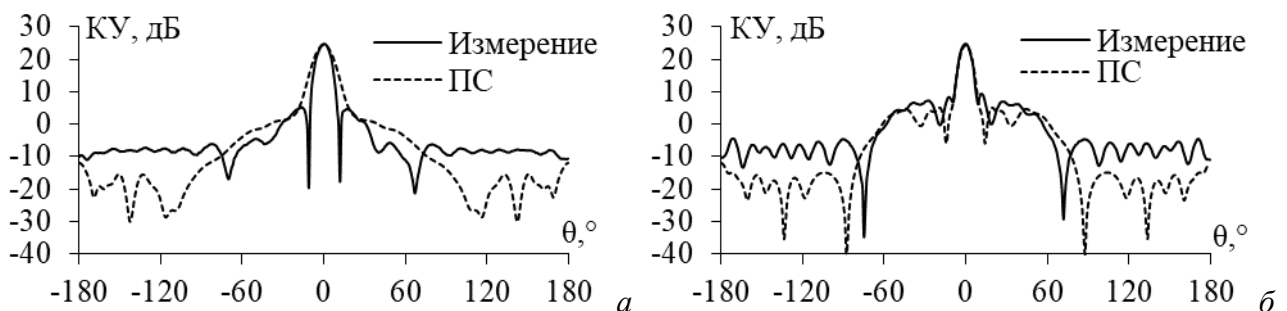


Рисунок 3.10 – ДН КУ рефлекторной антенны S_2 в E (а) и H (б) плоскостях на 3,55 ГГц, вычисленные для ПС на основе МоМ и измеренные для сплошной структуры

В подразделе 3.4 проанализировано влияние видов нормирования тока на уменьшение массы разреженных ПС по сравнению с исходной. Сравнивались зависимости уменьшения массы антенны от ДУЭС для различных типов антенн. Показано резкое уменьшение массы после АОТС при нормировании по максимальному току и плавное – по среднему. Представлены и сравнены разреженные ПС, полученные после АОТС с различными видами

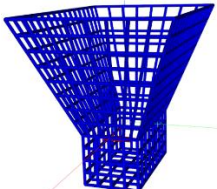
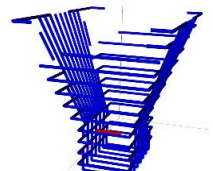
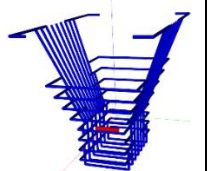
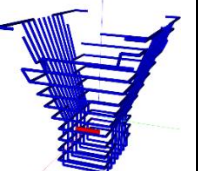
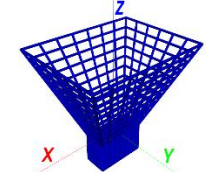
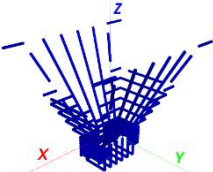
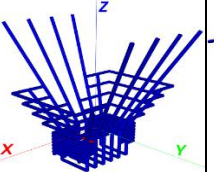
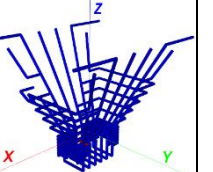
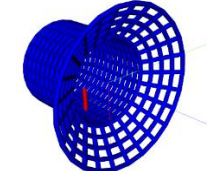
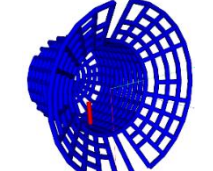
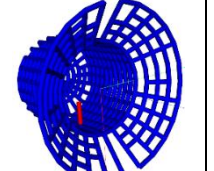
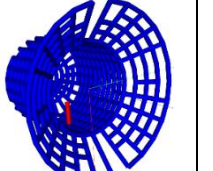
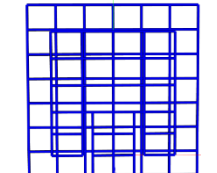
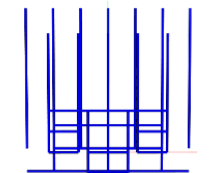
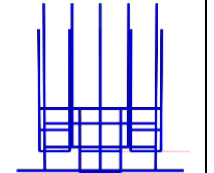
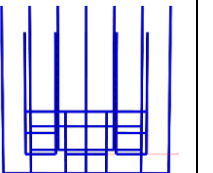
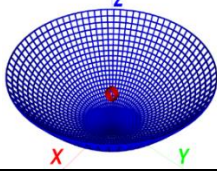
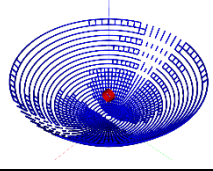
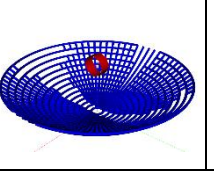
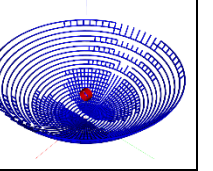
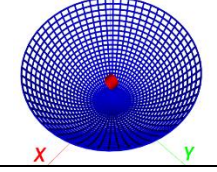
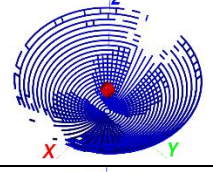
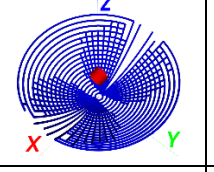
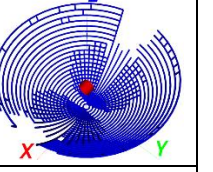
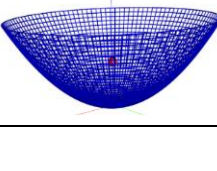
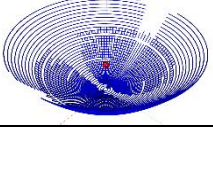
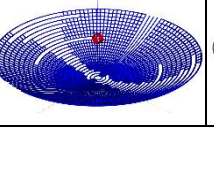
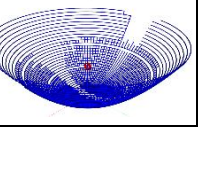
нормирования тока при одинаковых ДУЭС. Кратко обсуждены причины расхождений результатов. Проведенные анализ и обсуждение полезны для выбора подходящего вида нормирования тока для получения разреженных ПС с требуемым уменьшением массы.

4. Применение методики к различным типам антенн

Обобщённые результаты раздела сведены в таблицы 4.1 и 4.2.

В подразделе 4.1 разработан программный модуль с графическим интерфейсом пользователя (ГИП) для создания исходной и разреженных ПС рупорной антенны на основе АОТС в TUSUR.EMC. Его работоспособность показана на примере рупорной антенны из литературы. Разреженные антенны получены после АОТС при различных ДУЭС. Благодаря ГИП можно быстро проанализировать, оценить и выбрать разреженную структуру по требованиям.

Таблица 4.1 – Прототипы, исходные и разреженные ПС разных типов антенн

f , ГГц	ДУЭС, %	Прототип	Исходная ПС	После АОТС	После УАОТС	После СБАОТС
0,7-1,3	75					
18-38	80					
5,3-6,3	20					
2-3	30					
3,4-3,7	30					
5,1-5,9	10					
10-12	20					

Кроме этого, разработан и апробирован оптимизационный алгоритм на основе АОТС для получения разреженных ПС, удовлетворяющих заданным критериям в рабочем диапазоне частот. На основе алгоритма разработан программный модуль с ГИП в системе TUSUR.EMC для рупорной антенны. Его возможности продемонстрированы и верифицированы применением к рупорной антенне К/Ка-диапазона. Разработанный программный модуль представляет собой эффективный инструмент для оптимизации разреженных антенн, отвечающих специфическим требованиям.

В подразделе 4.2 представлены результаты применения АОТС и её модификаций к рупорным антеннам UHF- и К/Ка-диапазонов, **в подразделе 4.3** – конической рупорной антенне С-диапазона, **в подразделе 4.4** – 3D-печатной патч-антенне, а **в подразделе 4.5** – рефлекторным антеннам S-, С- и Х-диапазонов (таблица 4.1). Их улучшения и максимальные расхождения по сравнению с исходной ПС обобщены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Улучшения и максимальные расхождения разреженных ПС после АОТС и её модификации по сравнению с исходной ПС разных типов антенн

Ан-тенна	f , ГГц	ДУЭС, %	Подход	Уменьшение			Максимальное расхождение характеристик			
				Масса	Память	Время	$KU_{\max}$, дБ	КСВН	$ S_{11} $, дБ	$ Z $, Ом
Рупор	0,7–1,3	75	АОТС	1,86	3,45	6,40	2,38	1,20	14,64	30,45
			УАОТС	2,03	4,11	8,32	3,14	1,11	12,51	31,02
			СБАОТС	1,83	3,35	6,14	2,33	1,22	13,00	28,14
	18–38	80	АОТС	2,36	5,56	13,11	2,22	0,51	3,24	6,51
			УАОТС	2,46	6,05	14,89	2,41	0,48	3,22	6,74
			СБАОТС	2,32	5,38	12,48	2,20	0,46	3,14	6,15
Кони-ческий рупор	5,3–6,3	25	АОТС	1,19	1,42	1,69	1,67	0,53	2,32	22,98
			УАОТС	1,19	1,42	1,69	1,67	0,53	2,32	22,98
			СБАОТС	1,19	1,42	1,69	1,67	0,53	2,32	22,98
Патч	2–3	30	АОТС	1,52	2,31	3,51	0,22	2,79	6,04	41,49
			УАОТС	1,72	2,95	5,07	1,54	11,52	15,88	66,63
			СБАОТС	1,49	2,22	3,31	0,88	3,08	15,81	136,12
Реф-лек-тор	3,4–3,7	30	АОТС	1,39	1,94	2,71	0,14	0,007	2,83	0,34
			УАОТС	1,99	3,97	7,91	3,91	0,018	8,78	0,72
			СБАОТС	1,37	1,88	2,58	0,09	0,006	3,30	0,29
	5,1–5,9	10	АОТС	1,51	2,28	3,44	0,12	0,01	0,26	0,08
			УАОТС	1,80	3,24	5,84	2,20	0,01	0,13	0,46
			СБАОТС	1,49	2,21	3,27	0,10	0,01	0,25	0,09
	10–12	20	АОТС	1,37	1,87	2,57	0,30	0,014	0,63	0,54
			УАОТС	1,78	3,17	5,64	3,47	0,032	0,85	1,48
			СБАОТС	1,36	1,86	2,53	0,28	0,016	0,61	0,70

Кроме этого, в каждом подразделе также приведен сравнительный анализ выбора частот, на которых получены разреженные структуры после АОТС и её модификаций, на основе различных распределений тока в ПС на разных частотах. Их характеристики в зависимости от ДУЭС сравнивались с характеристиками исходной структуры на определенных частотах. Анализ показал, что СБАОТС наиболее эффективна для создания разреженных

структур с характеристиками, близкими к характеристикам исходной антенны, и менее зависима от ДУЭС. Однако АОТС и УАОТС дают меньшие массу антенны и затраты на моделирование. Получены разреженные ПС после разных АОТС при определенном ДУЭС. Их характеристики и исходной ПС сравнивались в рабочем диапазоне частот. На основе сравнения подробно представлены рекомендации по выбору подходящих частот для получения разреженных ПС из каждой антенны.

В подразделе 4.6 предложена простая методика моделирования для создания скрытых антенн. Она позволяет значительно уменьшить вычислительные затраты на получение новых структур.

5. Создание разреженных антенн из проводной сетки

В подразделе 5.1 представлены методика создания разреженных ПС и формулы для расчета их массы антенны и силы ветра, действующей на неё. Методика применима к различным типам антенн для получения их разреженных ПС. **В подразделе 5.2** представлено преобразование сплошной поверхности рупорной антенны UHF-диапазона в ПС (рисунок 5.1). Характеристики ПС, полученные путем моделирования и эксперимента, хорошо согласуются с характеристиками сплошной структуры (рисунок 5.2).

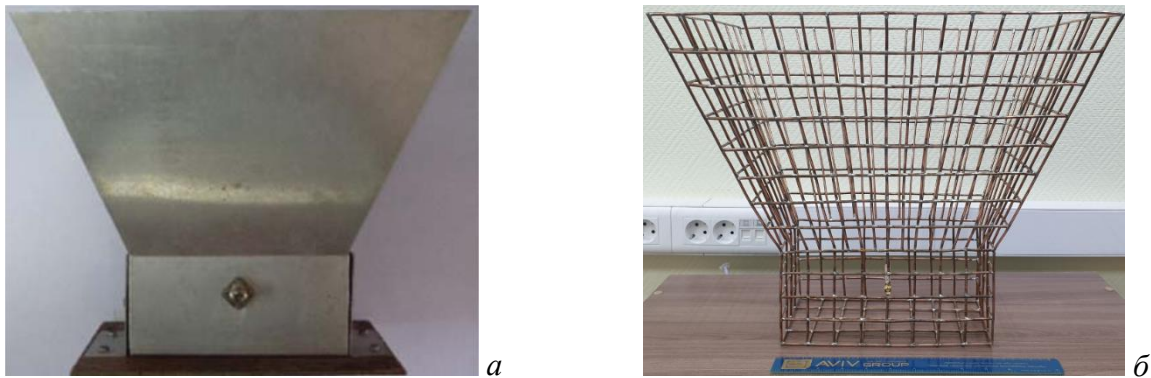


Рисунок 5.1 – Рупорная антенна (а) и её ПС (б)

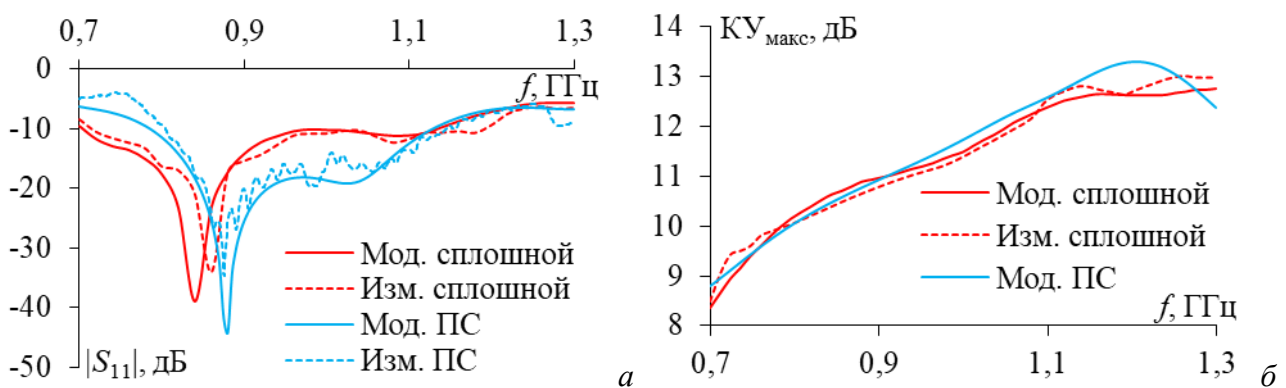


Рисунок 5.2 – Частотные зависимости антенны $|S_{11}|$ (а) и $KU_{\text{макс}}$ (б), полученные измерением и моделированием рупорной антенны и её ПС

В подразделе 5.3 сравнены результаты моделирования разреженных ПС рупорной антенны после АОТС и её модификаций. **В подразделе 5.4** приведены результаты эксперимента для разреженных ПС рупорной антенны UHF-диапазона после АОТС и её модификаций при ДУЭС=5, 10, 25, 40% (рисунки 5.3–5.5). Их масса уменьшается до 1,41 и 9,23 раза, а площадь

поверхности – до 1,45 и 7,45 раза по сравнению с исходной ПС и сплошной структурой, при сохранении необходимых антенных характеристик (среднее расхождение по $|S_{11}|$ в диапазоне частот до 2,07 дБ, КСВН – 0,26, $|Z|$ – 6,15 Ом и ДН в E и H плоскостях на центральной частоте – 2,88 и 3,14 дБ). Кроме того, они могут быть использованы в приложениях, где требуются скрытые и трудно обнаруживаемые антенны, не влияющие на общий ландшафт. С ростом ДУЭС антенные характеристики разреженных структур из ПС немного уменьшаются, но это вполне приемлемо, учитывая уменьшение массы и площади поверхности. В подразделе 5.5 приведены достоинства и перспективы полученных результатов.

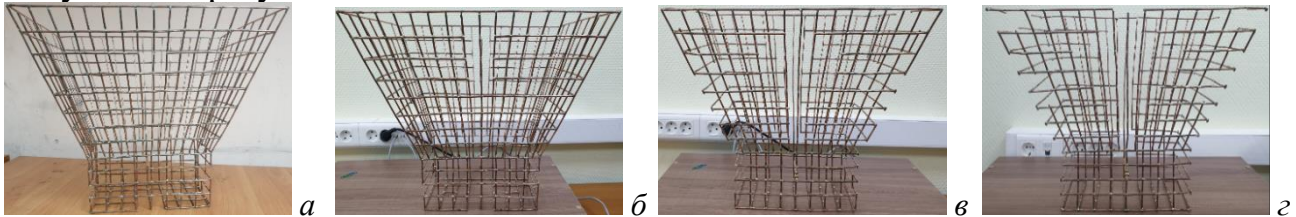


Рисунок 5.3 – Разреженные структуры из ПС рупорной антенны при ДУЭС=5 (а), 10 (б), 25 (в), 40 (г) %

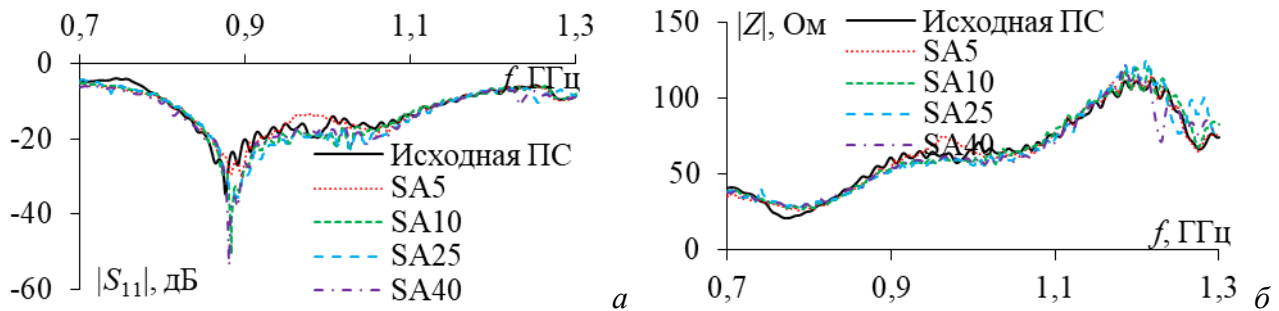


Рисунок 5.4 – Измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|Z|$ (б) для исходной и разреженных ПС рупорной антенны

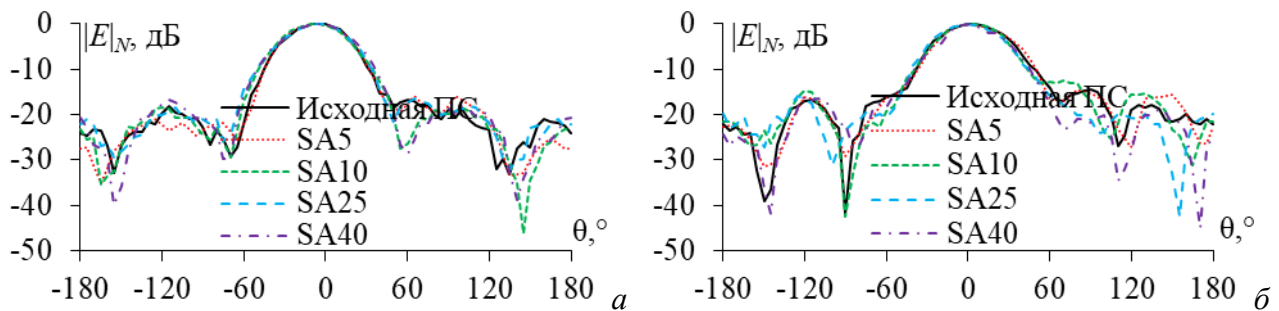


Рисунок 5.5 – Измеренные ДН в E (а) и H (б) плоскостях на центральной частоте 0,915 ГГц для исходной и разреженных ПС рупорной антенны

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги работы:

1. Предложены модификации АОТС для создания разреженных антенн. Они позволяют не только снизить технические трудности при их изготовлении, но и использовать их в последующем моделировании с минимальными вычислительными затратами и приемлемым сохранением характеристик.

2. Даны рекомендации по проектированию ПС рупорной, конической рупорной и рефлекторной антенн для получения их разреженных структур после АОТС.

3. Созданы программные модули с ГИП, предназначенные для получения и оптимизации исходных и разреженных ПС рупорной антенны в системе TUSUR.EMC. Тестирование показало эффективность программы и алгоритма оптимизации на основе АОТС в получении разреженных ПС, удовлетворяющих заданным критериям в рабочем диапазоне частот.

4. Разработана методика, позволяющая создать разреженные ПС рупорной, конической рупорной, рефлекторной и патч-антенн, с контролируемым уменьшением числа проводов сетки, требуемой памяти и времени вычисления при последующем моделировании.

5. Предложена простая методика моделирования для создания скрытых антенн, значительно уменьшающая вычислительные затраты на их получение.

6. Методика создания разреженных ПС впервые экспериментально проверена на рупорной антенне UHF-диапазона. Характеристики антенны, полученные путем моделирования и эксперимента для исходной ПС, хорошо согласуются с характеристиками сплошной структуры. Различные разреженные ПС были созданы после АОТС и её модификаций при ДУЭС=5, 10, 25, 40%. Они уменьшили массу антенны до 1,41 раза и 9,23 раза, а площадь поверхности – до 1,45 раза и 7,45 раза, по сравнению с исходной ПС и сплошной структурой, при сохранении её характеристик.

Рекомендации. Модификации АОТС могут быть использованы для получения непрерывных разреженных структур из ПС без технических сложностей: в учебном процессе и НИОКР. Перед применением АОТС и её модификаций надо выполнить точное моделирование исходной структуры из ПС по предложенным рекомендациям. Перед изготовлением разреженной антенны из ПС надо точно смоделировать её характеристики и выбрать подходящий ДУЭС. Для быстрого получения исходных и разреженных ПС удобны разработанные программные модули с ГИП.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Усовершенствование программного модуля для упрощения моделирования различных типов антенн из ПС и получения разреженных структур после АОТС и её модификаций. Проведение экспериментов на различных типах антенн из ПС для получения их разреженных ПС. Исследование и разработка алгоритмов, применимых к рассеивателям и экранам из ПС для создания их разреженных ПС при сохранении необходимых характеристик.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК (5)

1. Алхадж Хасан А.Ф. Моделирование антенн методом моментов: аппроксимация поверхности проводами / А.Ф. Алхадж Хасан, М.Т. Нгуен, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26. – № 2. – С. 51–71.

2. Нгуен М.Т. Верификация модифицированного подхода к аппроксимации антенн проводной сеткой / М.Т. Нгуен, А.Ф. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов // Радиотехника. – 2023. – Т. 87. – № 12. – С. 118–128.

3. **Нгуен М.Т.** Инновационные подходы к проектированию разреженных проводно-сеточных антенн: разработка алгоритмов и оценка их эффективности // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – № 4. – С. 1–47.

4. **Нгуен М.Т.** Рекомендации по проектированию конических рупорных структур из проводной сетки для создания разреженных антенн / **М.Т. Нгуен**, А.Ф. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов // Известия вузов. Радиофизика. – 2025. – Т. 68. – № 2. – С. 140–156.

5. **Нгуен М.Т.** Влияние шага исходной проводной сетки на создание разреженных антенн // Системы управления, связи и безопасности. – 2025. – № 2. – С. 39–63.

Статья в журнале из перечня ВАК по смежной отрасли наук (1)

6. **Нгуен М.Т.** Развитие и применение новых подходов к моделированию и проектированию разреженных проводных сеточных антенн / **М.Т. Нгуен**, А.Ф. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2024. – № 6. – С. 1–45.

Статьи в журналах, индексируемых WoS и Scopus из Q1/Q2 (3)

7. Alhaj Hasan A.F. Wire-grid and sparse MoM antennas: Past evolution, present implementation, and future possibilities / A.F. Alhaj Hasan, **M.T. Nguyen**, S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov // Symmetry. – 2023. – Vol. 15. – No. 2. – P. 378.

8. **Nguyen M.T.** Generating sparse wire-grid antennas using maximum current-based optimal current grid approximation / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. – 2025. DOI: 10.1109/OJAP.2025.3543559.

9. Dang T.P. Generation of sparse antennas and scatterers based on optimal current grid approximation / T.P. Dang, **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // Algorithms. – 2025. – Vol. 18. – No. 3. – P. 171.

Статьи в журналах, индексируемых WoS и Scopus (2)

10. Alhaj Hasan A.F. Modelling and designing wire-grid sparse antennas using MoM-based approaches for enhanced performance and reduced cost / A.F. Alhaj Hasan, **M.T. Nguyen**, T.R. Gazizov // Microwave Review. – 2023. – Vol. 29. – No. 2. – P. 83–94.

11. **Nguyen M.T.** Comparative analysis of OCGA-based sparse K/Ka band horn antenna structures at different frequencies / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // Microwave Review. – 2024. – Vol. 30. – No. 2. – P. 60–70.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus (21)

12. Alhaj Hasan A.F. Wire grid sparse antennas: Verification of a modified modeling approach / A.F. Alhaj Hasan, **M.T. Nguyen**, T.R. Gazizov // 2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology. – Yekaterinburg (Russia), 15–17 May, 2023. – P. 100–104.

13. Gazizov T.R. A simple modeling methodology for creating hidden antennas / T.R. Gazizov, A.F. Alhaj Hasan, **M.T. Nguyen** // 2023 International Conference on

Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – Sochi (Russia), 15–19 May, 2023. – P. 1080–1084.

14. Alhaj Hasan A.F. Novel MoM-based approaches for generating wire-grid sparse antenna structures / A.F. Alhaj Hasan, **M.T. Nguyen**, T.R. Gazizov // 2023 IEEE 24th Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials. – Altai Republic (Russia), 29 June–3 July, 2023. – P. 570–576.

15. Alhaj Hasan A.F. Efficient sparse antenna design using MoM-WG: Comparative study of horn, conical horn, and reflector antennas by advanced approximations / A.F. Alhaj Hasan, **M.T. Nguyen**, T.R. Gazizov // 2023 International Russian Automation Conference. – Sochi (Russia), 10–16 September, 2023. – P. 709–715.

16. **Nguyen M.T.** Simulation-based performance evaluation of wire-grid approach for 3D printed antennas: Comparative analysis and experimental validation / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // International Ural Conference on Electrical Power Engineering. – Magnitogorsk (Russia), September 29–October 01, 2023. – P. 194–199.

17. **Nguyen M.T.** Equivalent 3D printed perforated X-band horn antenna sparsed wire-grid structures using OCGA / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2023 Antenna Design and Measurement International Conference. – St. Petersburg (Russia), 19–21 October, 2023. – P. 31–36.

18. **Nguyen M.T.** Comparative analysis of C/OCGA sparse horn antenna structures at different frequencies / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. – Novosibirs (Russia), 10–12 November, 2023. – P. 530–536.

19. **Nguyen M.T.** Sparse structures of 3D printed K/Ka-band horn antenna using OCGA and its modification / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2024 IEEE 24th Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials. – Altai (Russia), 28 June–02 July, 2024. – P. 600–609.

20. **Nguyen M.T.** Sparse wire grid 3D printed patch antenna / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // XXVII International Conference wave electronics and its application in information and telecommunication systems. – St. Petersburg (Russia), 03–07 June, 2024. – P. 1–7.

21. **Nguyen M.T.** Comparative analysis of 5G patch antenna sparse structures characteristics at different frequencies / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – Vyborg (Russia), 01–03 July, 2024. – P. 1–8.

22. **Nguyen M.T.** Sparse wire grid UHF-band pyramidal horn antenna / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2024 International Russian automation conference. – Sochi (Russia), 08–14 September, 2024. – P. 449–455.

23. **Nguyen M.T.** Comparative analysis of C-band conical horn antenna sparse structures characteristics at different frequencies / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2025. – Vol. 1324. – P. 163–175.

24. **Nguyen M.T.** Sparse wire grid C-band conical horn antenna / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies. – Vladikavkaz (Russia), 01–05 October, 2024. – P. 1–7.

25. **Nguyen M.T.** Comparative analysis of UHF-band horn antenna sparse structures characteristics at different frequencies / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies. – Vladikavkaz (Russia), 01–05 October, 2024. – P. 1–7.

26. **Nguyen M.T.** Recommendations on modeling wire grid horn structures for sparse antenna generation / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2024 International Ural conference on electrical power engineering. – Magnitogorsk (Russia), 27–29 September, 2024. – P. 114–120.

27. **Nguyen M.T.** Recommendations on designing wire grid conical horn structures for sparse antenna generation / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2024 International conference on actual problems of electron devices engineering. – Saratov (Russia), 26–27 September, 2024. – P. 107–112.

28. **Nguyen M.T.** Comparative analysis of sparse structures characteristics of X-band reflector antenna at different frequencies / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2024 Antenna Design and Measurement International Conference. – St. Petersburg (Russia), 23–25 October, 2024. – P. 16–22.

29. **Nguyen M.T.** Recommendation on modeling wire grid reflector structures for sparse antenna generation / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2024 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Science. – Novosibirsk (Russia), 30 September–02 October, 2024. – P. 31–35.

30. **Nguyen M.T.** Sparse wire grid S-band reflector antenna / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2024 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences. – Novosibirsk (Russia), 30 September–02 October, 2024. – P. 36–40.

31. **Nguyen M.T.** Optimal sparse wire grid structures: Development and verification of an OCGA-based algorithm / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2024 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology. – Vienna (Austria), 16–18 October, 2024. – P. 1–7.

32. **Nguyen M.T.** Comparative analysis of sparse structures characteristics of S-band reflector antenna at different frequencies / **M.T. Nguyen**, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // 2024 PIERE IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering. – Novosibirsk (Russia), 15–17 November, 2024. – P. 230–237.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ (13)

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616977. Генерация конструкции зеркальной антенны за счёт аппроксимации оптимальной токовой сеткой / А.Ф. Алхадж Хасан, **М.Т. Нгуен**, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов; заявл. 04.03.2023; зарег. 04.04.2023.

34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617502. Генерация конструкции зеркальной антенны за счёт соединяющей аппроксимации оптимальной токовой сеткой / **М.Т. Нгуен**, А.Ф. Алхадж Хасан, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов; заявл. 05.04.2023; зарег. 11.04.2023.

35. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617713. Генерация конструкции зеркальной антенны за счёт устраняющей аппроксимации оптимальной токовой сеткой / **М.Т. Нгуен**, А.Ф. Алхадж Хасан, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов; заявл. 06.04.2023; зарег. 12.04.2023.

36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617597. Генерация конструкции зеркальной антенны за счёт соединяющей аппроксимации оптимальной токовой сеткой с минимальным количеством проводов / **М.Т. Нгуен**, А.Ф. Алхадж Хасан, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов; заявл. 06.04.2023; зарег. 11.04.2023.

37. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619337. Генерация эквивалентной разреженной проводной сетки для развертываемой зеркальной антенны из композитных материалов / **М.Т. Нгуен**, А.Ф. Алхадж Хасан, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов; заявл. 27.04.2023; зарег. 10.05.2023.

38. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619600. Генерация конструкции рупорной антенны за счёт аппроксимации оптимальной токовой сеткой / А.Ф. Алхадж Хасан, **М.Т. Нгуен**, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов; заявл. 27.04.2023; зарег. 12.05.2023.

39. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660653. Генерация эквивалентной проводной сетки для развертываемой зеркальной антенны из композитных материалов / **М.Т. Нгуен**, А.Ф. Алхадж Хасан, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов; заявл. 19.05.2023; зарег. 23.05.2023.

40. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667728. Генерация конструкции рупорных антенн за счёт АОТС / **М.Т. Нгуен**; заявл. 04.07.2024; зарег. 29.07.2024.

41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667325. Генерация конструкции рупорных антенн за счёт соединяющей аппроксимации оптимальной токовой сеткой с минимальным количеством проводов и проверкой их соединения по координатам / **М.Т. Нгуен**; заявл. 04.07.2024; зарег. 23.07.2024.

42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667727. Генерация конструкции рупорных антенн за счёт УАОТС / **М.Т. Нгуен**; заявл. 04.07.2024; зарег. 29.07.2024.

43. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682479. Генерация конструкции конической рупорной антенны С-диапазона за счёт аппроксимации оптимальной токовой сеткой / **М.Т. Нгуен**, А.Ф. Алхадж Хасан; заявл. 21.09.2024; зарег. 24.09.2024.

44. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682626. Генерация конструкции пирамидальной рупорной антенны

УВЧ-диапазона за счёт аппроксимации оптимальной токовой сеткой / **М.Т. Нгуен**, А.Ф. Алхадж Хасан; заявл. 21.09.2024; зарег. 25.09.2024.

45. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664804. Система компьютерного моделирования электромагнитной совместимости ТУСУР.ЭМС (TUSUR.EMC) / Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.А. Квасников, А.А. Иванов, А.О. Белоусов, А.Е. Максимов, Д.В. Клюкин, Х.А.Ф. Алхадж, Г.Ю. Ким, Е. Жечев, А.В. Осинцев, В.А. Семенюк, **М.Т. Нгуен**, М.Е. Комнатнов; заявл. 10.06.2024; зарег. 25.06.2024.