

Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Косак Роман Эдуардович

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ АНТЕННЫ С РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ЩЕЛЬЮ И АНТЕННЫЕ
РЕШЕТКИ НА ИХ ОСНОВЕ

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2026

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:

Юханов Юрий Владимирович
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 сектора
разработки и испытаний антенно-фидерных устройств.

Защита состоится «17» декабря 2026 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.14 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, 21 Ж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1357192/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Отзыв (с указанием ФИО (полностью), ученой степени со специальностью, 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 ЮФУ801.02.14 по адресу: 347922, Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Д», а также в формате pdf – на e-mail: dvsemenihina@sfedu.ru.

Ученый секретарь

диссертационного совета ЮФУ801.02.14

доктор технических наук, доцент,

профессор ПИШ «Инженерия киберплатформ» ЮФУ



Семенихина Д.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На текущий момент фазированные антенные решетки (ФАР) находят применение в радионавигационных системах обеспечения аэропортов, системах спутникового вещания и связи с искусственными спутниками земли, радиолокации, радиосвязи, радиоастрономии, системах связи с подвижными объектами и системах обеспечения безопасности движения автомобиля, судостроительной промышленности и передовых системах беспроводной связи¹. ФАР, содержащие большое число управляемых излучателей, входят в состав различных наземных, корабельных, авиационных и космических радиотехнических комплексов.

В последнее время наблюдается постоянно растущая потребность в увеличении ширины рабочей полосы частот (РПЧ) ФАР для военных, научных и коммерческих систем и приложений, вследствие чего возникает необходимость работы с широкополосными (ШП) и сверхширокополосными (СШП) сигналами. Существует несколько определений ШП и СШП сигналов. В работе для их определения используется коэффициент перекрытия (КП), который определяется как отношение верхней частоты к нижней. Под ШП понимается антенна, излучатель или антенная решетка (АР) с КП, который больше 1,1, но меньше 2,0, а СШП – с шириной РПЧ октава и более^{2,3} ($KP \geq 2$) по уровню коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) ≤ 3 .

На базе СШП антенн возможна реализация интегрированных многофункциональных бортовых систем. СШП радары применяются для обнаружения и наблюдения объектов на дистанциях до нескольких километров для контроля акваторий, аэропортов и различных территорий особого назначения. Многочисленные СШП радары применяются в лесном хозяйстве, для обнаружения подземных коммуникаций, управления автотранспортом и поисково-спасательных операций, в системах спутниковой связи, телекоммуникаций, в загоризонтных РЛС, для систем активных помех, систем лазерной связи, радиолокации ЛА, радиосвязи, в военной сфере^{3,4} т. д.

ФАР может содержать значительное количество излучателей, а, следовательно, излучатели должны быть дешевыми, надежными, идентичными по характеристикам и иметь малую массу. Даже небольшое снижение массы и стоимости отдельного излучателя в составе ФАР дает весьма значительный эффект, а применение ненаправленных или слабо направленных излучателей целесообразно при сканировании в широком секторе углов.

Применение определенного типа излучателей позволяет добиться различных преимуществ. К примеру, улучшение массогабаритных характеристик СШП ФАР связано с использованием печатных излучателей на основе антенн с расширяющейся щелью (антенн Вивальди). Основной задачей является разработка и согласование (уменьшение КСВН) излучателя ФАР, способного работать в СШП в заданном секторе углов сканирования. Характеристики излучателя в составе ФАР зависят от параметров самого элемента. Для их улучшения можно использовать различные изменения конфигурации.

Размер антенны или излучателя измеряется в длинах волны. Он показывает количество длин волн на верхней рабочей частоте, укладываемых в геометрическом размере антенны. Достижимая РПЧ антенн и излучателей Вивальди прямо пропорциональна их высоте. При

¹ Хансен Р.С. Сканирующие антенные системы СВЧ [пер. с англ. под ред. Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина]. М.: Изд-во «Сов. радио», Т. 1, 1966, 538 с.

² Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны. 2 изд. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.

³ Latha T., Ram G., Kumar G. A. and Chakravarthy M. Review on Ultra-Wideband Phased Array Antennas // IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 129742–129755, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3114344.

⁴ Mokole E. L. and Sabath F. Ultrawideband Technologies and Applications // IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 60, no. 3, pp. 8–9, June 2018, DOI: 10.1109/MAP.2018.2820006.

использовании в качестве одиночных антенн, антенны с расширяющейся щелью обычно имеют длину в несколько длин волн, а щель расширяется на ширину одной или более длин волны. Этот значительный продольный размер является недостатком АР на основе антенн с расширяющейся щелью. В работе компактными считаются антенны и излучатели, высота которых менее длины волны на верхней частоте. Современные радиотехнические комплексы требуют использования антенн и излучателей со сниженными габаритами, в связи с чем уменьшение продольного размера СШП антенн Вивальди является актуальной задачей.

Итак, на данный момент существует необходимость расширения РПЧ ФАР до одной–двух октав при сохранении широкоугольного сканирования и компактности излучателей. В ФАР могут использоваться различные излучатели, однако наиболее подготовленными к практической реализации являются ФАР на основе антенны Вивальди. Таким образом, разработка ШП и СШП ФАР с возможностью широкоугольного сканирования и антенн со сниженными габаритными показателями на текущий момент является актуальной задачей для различных областей науки и техники.

Объект исследования: антенны с расширяющейся щелью и АР на их основе.

Предмет исследования: характеристики моделей и макетов антенн с расширяющейся щелью и АР на их основе.

Научная проблема: разработка СШП антенн с расширяющейся щелью и АР на их основе с уменьшенными габаритными показателями.

Целью диссертационной работы является разработка СШП антенн с уменьшенным продольным размером для современных радиотехнических комплексов.

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

1. Исследование влияния внешней кромки на характеристики антенн.
2. Разработка и исследование СШП антенн с расширяющейся щелью с уменьшенными габаритными характеристиками.
3. Разработка и исследование компактных СШП излучателей ФАР. Поиск возможностей улучшения их характеристик.
4. Разработка и исследование малоэлементных АР размером 4×4 . Поиск путей уменьшения влияния краевых эффектов на их характеристики.
5. Изготовление макетов разработанных антенн и антенной решетки. Проведение экспериментальных исследований их характеристик.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Исследовано влияние внешней конфигурации кромки СШП антенн с расширяющейся щелью на их характеристики, на основе которых предложена новая конфигурация внешней кромки антенны, описываемая формулой кардиоиды, позволяющая увеличить коэффициент перекрытия РПЧ при уменьшенном продольном размере антенны.
2. Разработаны и исследованы электродинамические модели компактных СШП излучателей на основе антенн с расширяющейся щелью, способные работать в нижней части УВЧ-диапазона в режиме широкоугольного сканирования в секторе углов $\pm 60^\circ$ благодаря использованию вырезов и вставок различной конфигурации.
3. Исследовано влияние вставок различной конфигурации на внешних краях кардиоидных излучателей для уменьшения влияния краевого эффекта малоэлементных АР размером 4×4 . Предложены вставки прямоугольной формы размером $25,5 \times 140,0$ мм, позволяющие улучшить согласование АР в нижней части УВЧ-диапазона.
4. Исследовано влияние растекания токов по антенне и распределения поля в плоскости антенны на искажения и отклонения её трехмерных ДН. Определено отклонение основного лепестка ДН, появление боковых лепестков и изменение КСВН.

Теоретическая значимость проведенного исследования:

1. Исследовано влияние внешней конфигурации кромки антенн. Показано, что предложенная кардиоидная конфигурация внешней кромки антенны позволила улучшить согласование, увеличить КП и уменьшить продольный размер.
2. Исследованы параметры разработанных излучателей ФАР. Оценены их предельные возможности по КСВН. Найдены конфигурации вырезов и вставок, улучшающие согласование и увеличивающие КП излучателей в составе ФАР.
3. Показано, что прямоугольные согласующие вставки на внешней кромке кардиоидных излучателей малоэлементной АР уменьшают влияние краевых эффектов.

Практическая значимость проведенного исследования:

1. Разработана и изготовлена СШП антенна с расширяющейся щелью с новой конфигурацией внешней кромки, описываемой формулой кардиоиды. Антенна имеет продольный размер $\sim 13,5 \lambda$ на частоте 15 ГГц, позволяет работать с КП $\sim 4,2$ и обеспечивает коэффициент усиления (КУ) от 6,5 до 17,0 дБ.
2. Разработана и изготовлена СШП кардиоидная антенна уменьшенного размера. Антенна позволяет работать с КП $\sim 4,6$ и имеет продольный размер 2λ на частоте 25 ГГц, что на 1–3 λ меньше, чем у аналогов.
3. Разработана и изготовлена малоэлементная АР кардиоидных излучателей с прямоугольными вставками на их внешней кромке. Предложено уменьшение влияния краевых эффектов на характеристики малоэлементной АР размером 4×4 путем изменения конфигурации внешней кромки излучателей.
4. По результатам разработки антенн и излучателей получены 4 патента на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Метод исследования в диссертационной работе заключается в применении численного моделирования методом конечных элементов с помощью программного обеспечения ANSYS HFSS.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Антенна с внешней конфигурацией кромки, выполненной по кардиоидной форме, с расширенной РПЧ, улучшенным согласованием и уменьшенным продольным размером по сравнению с аналогами.
2. Изменение конфигурации компактных СШП излучателей позволяет улучшить согласование, увеличить КП и уменьшить их продольный размер.
3. Подключение отдельных излучателей малоэлементных АР на основе кардиоидного излучателя на согласованные нагрузки позволяет улучшить согласование и расширить РПЧ. Согласование кардиоидных излучателей малоэлементных АР в среднем лучше, чем излучателей Вивальди, а КП больше.
4. Вставки прямоугольной формы на внешней кромке крайних кардиоидных излучателей малоэлементной АР уменьшают влияние краевых эффектов на характеристики решетки, а также позволяют улучшить согласование в РПЧ, вследствие чего АР становится СШП независимо от формы экрана (квадратной или прямоугольной).
5. Результаты экспериментальных исследований характеристик согласования и излучения кардиоидных антенн и малоэлементной АР кардиоидных излучателей со вставками прямоугольной формы на внешней кромке подтверждают результаты численного моделирования.

Соответствие паспорту специальности. Направление диссертационной работы заключается в разработке СШП антенн с расширяющейся щелью и АР на их основе и соответствует пунктам паспорта специальности 2.2.14 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»:

1. Исследование характеристик антенн и микроволновых устройств для их параметризации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т. д.

2. Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных микроволновых устройств, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами.

Апробация диссертационной работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на Всероссийских и Международных конференциях:

1. Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн «ИРЭМВ-2021» (РФ, Дивноморское, 28 июня – 02 июля 2021).

2. 17-я Международная молодёжная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ-2021» (РФ, г. Севастополь, 11–15 октября 2021).

3. 8-я Всероссийская Микроволновая Конференция (Международная конференция) (РФ, г. Москва, 23–25 ноября 2022).

4. Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2023» (РФ, г. Таганрог, 07–09 июня 2023).

5. Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн «ИРЭМВ-2023» (РФ, Дивноморское, 26–30 июня 2023).

6. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2024» (РФ, г. Таганрог, 05–07 июня 2024).

7. 9-я Всероссийская Микроволновая Конференция (Международная конференция) (РФ, г. Москва, 25–29 ноября 2024).

8. Всероссийская научная конференция «Излучение и Рассеяние Электромагнитных Волн, ИРЭМВ-2025» (РФ, Дивноморское, 23–27 июня 2025).

9. 35-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2025) (РФ, г. Севастополь, 07–13 сентября 2025).

10. 21-я Международная молодёжная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ-2025» (РФ, г. Севастополь, 06–10 октября 2025).

11. VI Международная научная конференция «Antenna Design and Measurement International Conference 2025» (ADMInC`25) (РФ, г. Санкт-Петербург, 01–03 октября 2025).

Личный вклад соискателя состоит в решении поставленных задач, предложении использования новой конфигурации кромки СШП антенны с расширяющейся щелью, описываемой формулой кардиоиды, и пути снижения влияния краевых эффектов на характеристики малоэлементной АР. Автором разработаны электродинамические модели и исследованы характеристики СШП антенн с расширяющейся щелью, излучателей в составе бесконечных ФАР и малоэлементных АР. Подготовлены основные публикации совместно с сотрудниками кафедры Антенн и радиопередающих устройств. Соответствие экспериментальных и численных математических и физических моделей подтверждается совпадением экспериментальных результатов с расчетными данными.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается их соответствием физическим представлениям, а также проведением эксперимента и совпадением результатов численных и экспериментальных данных.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 20 работ, в том числе 4 статьи в журналах из перечня ВАК, 5 патентов и 11 работ в сборниках научных трудов российских и международных научных конференций, выполненных в соавторстве.

Структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов и заключения. Она содержит 194 страниц машинописного текста, 103 рисунка и список использованной литературы из 274 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, дана информация о структуре диссертации.

В первой главе проведен анализ изученных разработок антенн с расширяющейся щелью и излучателей АР и ФАР на их основе.

Использованы наименования следующих секторов сканирования ФАР: до 30° включительно – узкоугольное сканирование, $31^\circ - 45^\circ$ включительно – сканирование, более 46° – широкоугольное сканирование. Определено, что довольно перспективными являются излучатели ФАР на основе антенн с расширяющейся щелью благодаря целому ряду ее достоинств, таких как: низкая стоимость материала, простота изготовления и транспортировки, возможность достижения малогабаритного размера и малого веса изделия, возможность создания линейной и двойной поляризации, планарность. Анализ проведенного обзора литературы показывает, что чем больше КП, тем меньше компактных излучателей ФАР с расширяющейся щелью, вследствие чего задача по исследованию и разработке таких излучателей является актуальной.

На текущий момент известно большое количество различных конфигураций кромки антенн Вивальди, при этом довольно распространенными являются антенны с эллиптической конфигурацией кромки. Недостатком таких антенн является высота, превышающая одну или даже несколько длин волн, особенно при $КП \geq 4$. В связи с этим, исследование конфигурации кромок антенн с расширяющейся щелью для обеспечения СШП и уменьшенного размера является актуальной задачей. Использование различных вырезов и вставок в конфигурации антенн в ряде случаев позволяет улучшить согласование, расширить РПЧ, сместить нижнюю рабочую частоту вниз по оси частот, увеличить КУ и уменьшить уровень боковых лепестков (УБЛ).

В большинстве случаев проектирование ФАР начинается с излучателя в составе бесконечной ФАР, а краевые эффекты учитываются в конце процесса. Определено, что для уменьшения краевых эффектов крайних излучателей АР на нижних частотах можно использовать прямоугольные металлические вставки на внешних лепестках крайних излучателей.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию СШП антенн с расширяющейся щелью.

На основе прототипа⁵ (рисунок 1,а), разработана антенна Вивальди (рисунок 1,б) и ее модификация с синусоидальным гофром на кромке (рисунок 1,в).

⁵ Gazit E. Improved design of the Vivaldi antenna // IEEE Proceeding, 1988, vol. 135, no. 2, pp. 89–92, DOI: 10.1049/ip-h-2.1988.0020.

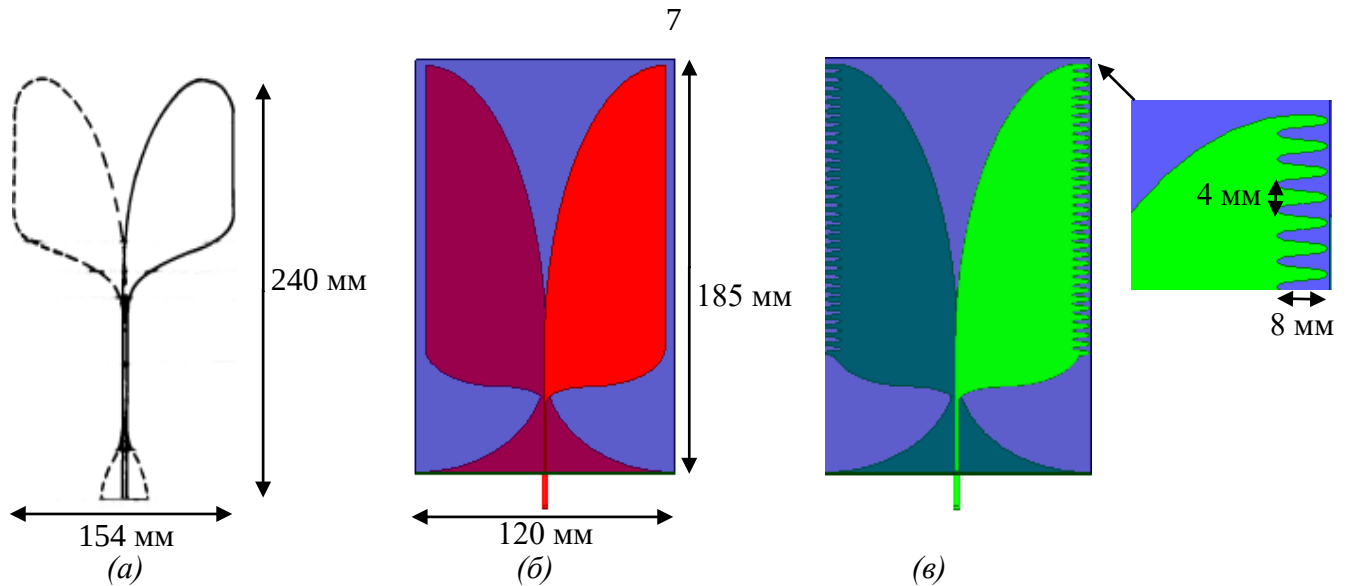


Рисунок 1 – Прототип (а), разработанная антенна Вивальди (б) и модификация (в)

Модификация антенны Вивальди в виде синусоидального рифления на внешней кромке позволяет перейти от ШП к СШП по уровню КСВН ≤ 2 , увеличить КУ в среднем на 1,4 дБ, а также уменьшить составляющую поля на кроссовой поляризации в среднем на 2 дБ практически во всей РПЧ. По сравнению с модификацией антенны Вивальди высота прототипа больше в ~ 5 раз, а КП больше в ~ 4 раза. Отсюда следует, что разработка более компактной СШП антенны с расширяющейся щелью со значением КП одна–две октавы и более, но с уменьшенным по сравнению с аналогами продольным размером является актуальной задачей.

На основе ранее изученной тенденции плавного скругления кромки печатных антенн с расширяющейся щелью разработана и исследована антенна с эллиптической конфигурацией щели и кардиоидной конфигурацией кромки для РПЧ от 4 до 15 ГГц. Расширяющаяся щель антенны описывается каноническим уравнением эллипса (1), где $a = 168,33$ мм, а $b = 31,70$ мм (1):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

а конфигурация кромки лепестков описывается формулой кардиоиды (2):

$$\begin{cases} x(t) = 0, \\ y(t) = \kappa \cdot \cos(t), \\ z(t) = \varsigma \cdot (\sin(t) + \sqrt{|\cos(t)|}), \end{cases} \quad (2)$$

где $\kappa = \frac{23}{420}$;

$$\varsigma = \frac{1}{10};$$

t изменяется от 0 до 2π с шагом $\frac{2\pi}{1000}$.

Результаты исследования показали, что конфигурация кромки СШП антенны с расширяющейся щелью, описываемая формулой кардиоиды, позволяет достичь хорошего согласования в СШП, однако разработанная кардиоидная антенна имеет значительную высоту на верхней рабочей частоте 15 ГГц – $13,5 \lambda$.

Далее проведена работа с целью уменьшения высоты СШП кардиоидной антенны с расширяющейся щелью, вследствие которой разработана и исследована кардиоидная антенна уменьшенного размера (рисунок 2) для работы в РПЧ от 6 до 25 ГГц. Ее характеристики представлены на рисунке 3.

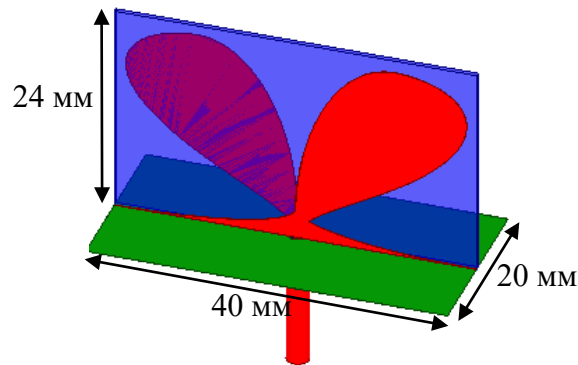


Рисунок 2 – Кардиоидная антенна уменьшенного размера высотой 24 мм

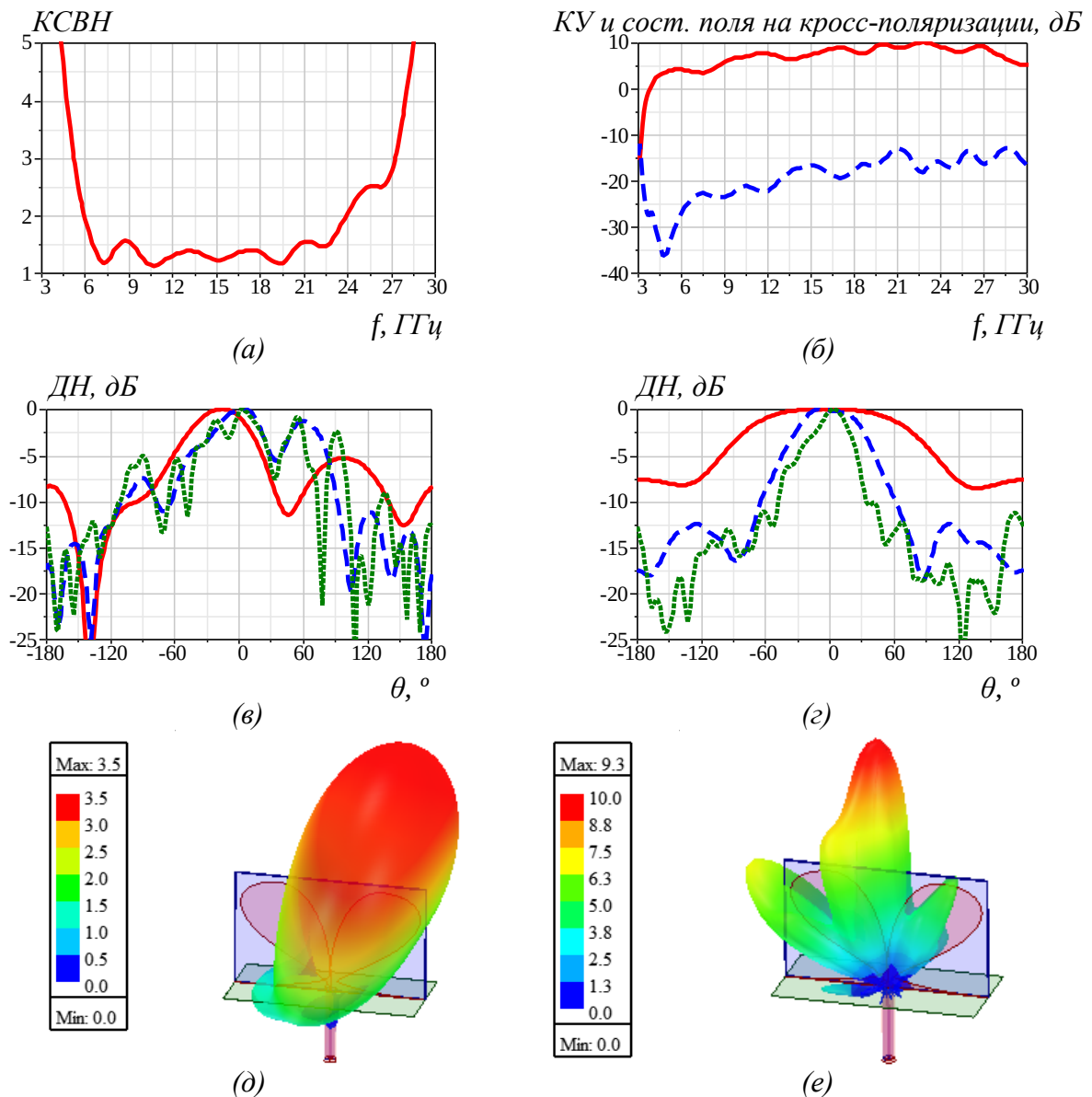


Рисунок 3 – Частотная характеристика (ЧХ) КСВН (а, —), КУ (б, —) и составляющей поля на кроссовой поляризации (б, --), ДН в Е- (в) и Н-плоскости (г) на частотах 6 (—), 15 (--) и 24 (---) ГГц, а также трехмерные ДН на частотах 6 (д) и 20 ГГц (е) кардиоидной антенны уменьшенного размера

По сравнению с характеристиками кардиоидной антенны высотой $13,5 \lambda$ удалось увеличить КП и снизить средний уровень КСВН с 2,4 до 1,7. Кардиоидная антенна уменьшенного размера имеет меньший продольный размер как на верхней частоте 27,55 ГГц: $2,204 \lambda$, так и на нижней частоте 5,24 ГГц: $0,419 \lambda$.

Исследуем характеристики кардиоидной антенны уменьшенного размера в полосе до 15 ГГц для сравнения с кардиоидной антенной высотой $13,5 \lambda$. В этом случае ее РПЧ находится от 5,95 до 15,00 ГГц (КП $\sim 2,521$) по уровню КСВН ≤ 2 , причем среднее значение КСВН ниже уровня КСВН = 1,6. КУ изменяется от 3,4 до 7,8 дБ. Составляющая поля на крессовой поляризации не превышает значение -15 дБ. Размер кардиоидной антенны уменьшенного размера на частоте 15 ГГц составляет $1,0 \lambda \times 2,0 \lambda \times 1,2 \lambda$. При этом, уменьшение высоты антенны более чем в 11 раз, а ширины – более чем в 2,5 раз приводит к уменьшению КУ на 5 – 9 дБ, расширению ДН на $35,1^\circ$ на 15 ГГц в Е-плоскости в полосе от 5 до 15 ГГц и уменьшению КП на 1,237 в полосе до 15 ГГц по сравнению с кардиоидной антенной высотой $13,5 \lambda$. Таким образом, конфигурация внешней кромки антенны с использованием кардиоидной формы позволяет расширить РПЧ, улучшить согласование и уменьшить высоту антенн и излучателей по сравнению с аналогами.

В третьей главе разработаны и исследованы компактные СШП излучатели в составе бесконечных ФАР.

Разработан и исследован излучатель Вивальди (рисунок 4,а) со сплошной кромкой лепестков, конфигурация которого идентична антенне Вивальди, при его размещении на прямоугольном (100×120 мм) и квадратном (120×120 мм) экране. Он является компактным, СШП, способным работать в режиме широкоугольного сканирования в Е-плоскости и в секторе углов до $\pm 45^\circ$ в Н-плоскости. Разработаны и исследованы модификации излучателя Вивальди с использованием различных вырезов и вставок (рисунок 4,б–е).

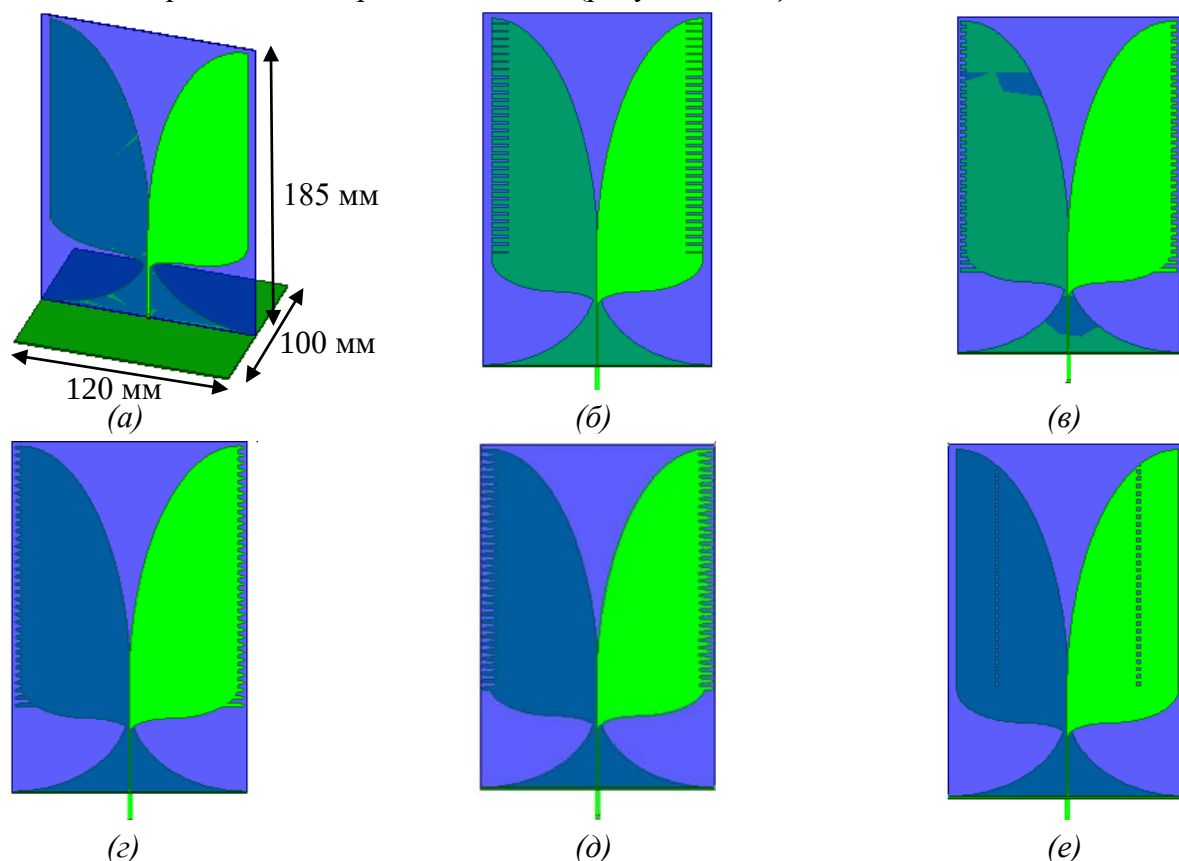


Рисунок 4 – Излучатель Вивальди и его модификации

В ходе сравнительного анализа модификаций излучателя Вивальди определено, что все излучатели в Е-плоскости являются СШП и способны сканировать в широком секторе углов $\pm 60^\circ$. В Н-плоскости они также являются СШП, но сектор углов сканирования в основном уменьшается до $\pm 45^\circ$.

Разработан и исследован кардиоидный излучатель (рисунок 5,а) на основе кардиоидной антенны высотой 270 мм при его размещении на прямоугольном (100×150 мм) и квадратном (150×150 мм) экране. Конфигурация расширяющейся щели описывается по формуле (1), где $a = 198,17$ мм, а $b = 57,57$ мм, а конфигурация кромки лепестков – по формуле (2) со следующими коэффициентами: $\kappa = \frac{1}{14}$, $\varsigma = \frac{1}{9}$. СШП кардиоидный излучатель способен работать в режиме широкоугольного сканирования в секторе углов $\pm 60^\circ$ с КП $\sim 2,184$ в обеих плоскостях. Разработаны и исследованы модификации кардиоидного излучателя использованием различных вырезов и вставок (рисунок 5,б–з).

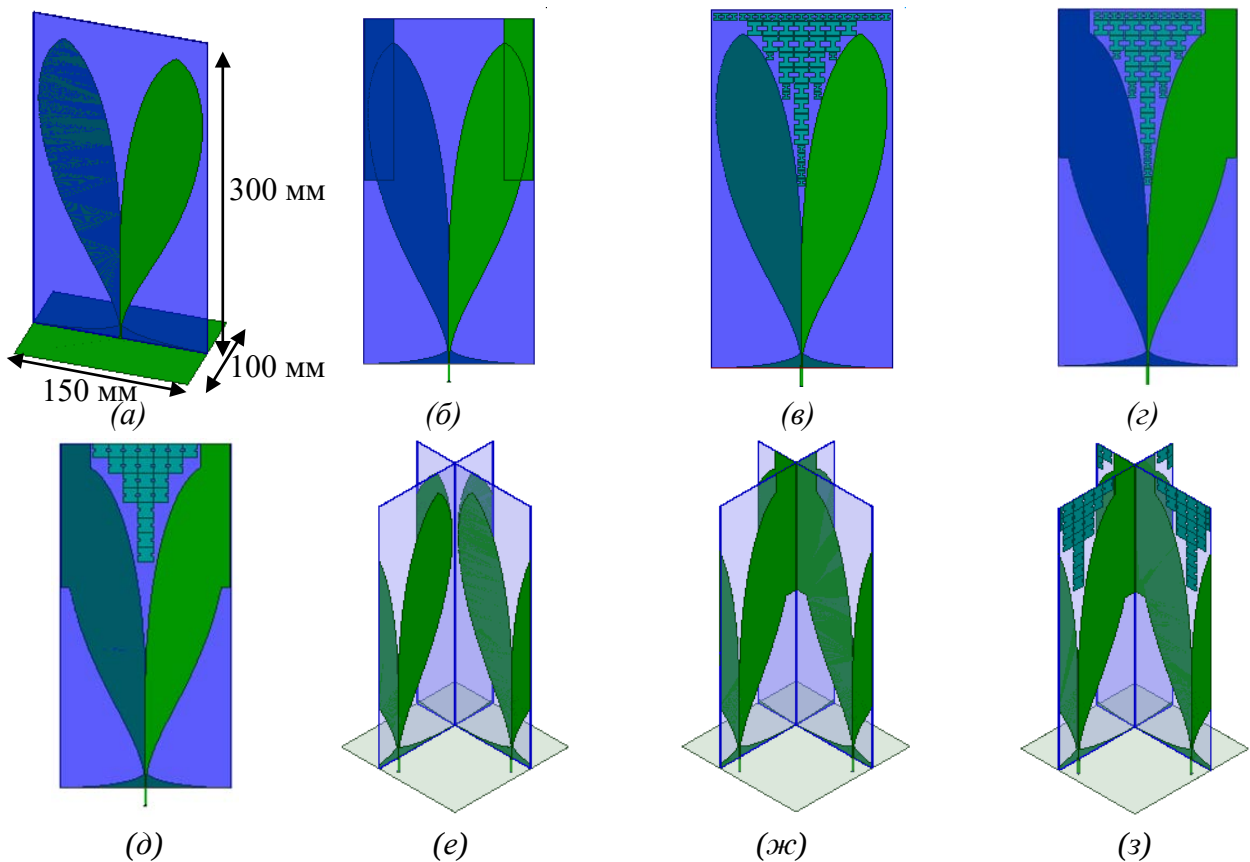


Рисунок 5 – Кардиоидный излучатель и модификации К0 – К4 (а–д), КД0 (е), КД1 (ж) и КД4 (з)

При анализе модификаций кардиоидного излучателя линейной поляризации определено, что все излучатели (кроме излучателя К2 на квадратном экране) при широкоугольном сканировании в Е-плоскости в секторе углов $\pm 60^\circ$ являются СШП. В Н-плоскости они также являются СШП, но сектор углов сканирования для излучателя К1 уменьшается до $\pm 45^\circ$ при размещении на любом из рассмотренных экранов. Все излучатели являются компактными (высота на верхней частоте $\sim 0,7 \lambda$).

Излучатель КД0 (рисунок 5,е) в режиме широкоугольного сканирования в обеих плоскостях является СШП. Увеличить КП на 44,5% и 34,9%, а также уменьшить средний уровень КСВН на $\sim 0,4$ в режиме широкоугольного сканирования в обеих плоскостях удастся благодаря использованию комбинации прямоугольных вставок на кромке (КД1) и согласующих вставок в расширяющейся щели излучателя КД4 (рисунок 5,з). Его РПЧ при широкоугольном

сканировании в обеих плоскостях превышает две октавы (рисунок 6, причем каждой кривой соответствует свое значение угла сканирования: 0° (—), 15° (---), 30° (---), 45° () и 60° (—)).

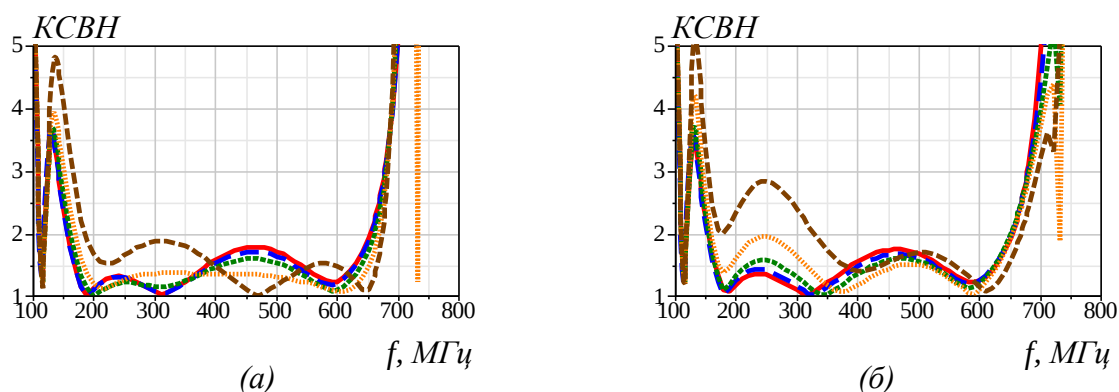


Рисунок 6 – ЧХ КСВН излучателя КД4 при широкоугольном сканировании в двух плоскостях

Таким образом, изменение конфигурации компактных СШП излучателей с использованием различных вырезов и вставок позволяет улучшить согласование, увеличить КП и уменьшить продольный размер.

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию конечных малоэлементных АР размером 4×4 . Исследованы характеристики АР излучателей Вивальди на квадратных (480×480 мм) и прямоугольных (400×480 мм) экранах. Под КСВН АР в главе 4 понимается активный КСВН (КСВН одного излучателя в составе АР при возбуждении других излучателей в составе АР), так как все излучатели решетки возбуждаются одновременно. Целью отключения отдельных излучателей малоэлементных АР является улучшение согласования решетки и увеличение КП.

Из исследования малоэлементных АР на основе разработанных излучателей Вивальди следует, что отключение отдельных излучателей приводит к улучшению согласования и расширению РПЧ. Определено, что при включении всех излучателей почти все АР являются ШП, а отключение ряда излучателей 1–4 позволяет работать в СШП. Также при отключении ряда излучателей 1–4 улучшается согласование АР. Изменение формы экрана значительного влияния на КСВН не оказывает.

Размещение АР кардиоидных излучателей на квадратных (600×600 мм) экранах по сравнению с прямоугольными (400×600 мм) приводит к расширению РПЧ. Отключение отдельных излучателей позволяет улучшить согласование и расширить РПЧ (в случае АР из рисунка 7,а до двух октав). Прямоугольные вставки на краях крайних излучателей позволяют уменьшить влияние краевого эффекта на характеристики АР (рисунок 7,б).

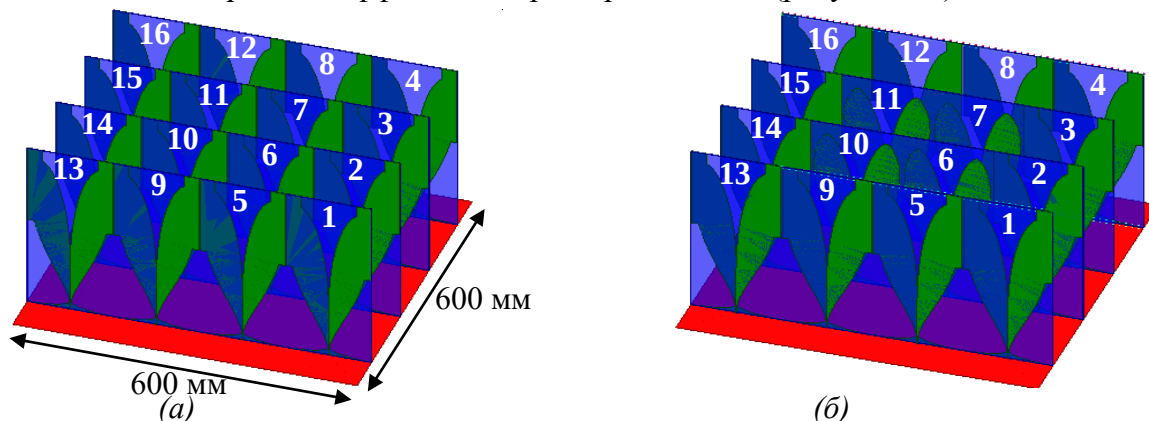


Рисунок 7 – Малоэлементная АР излучателей К1 (а), а также К1 и К0 (б)

Для обеспечения максимального КП рекомендовано использовать излучатели К1: при отключении ряда излучателей 1–4 РПЧ АР по уровню КСВН ≤ 2 располагается от 259,0 до 481,8 МГц (КП $\sim 1,860$, рисунок 8,а,б). Если необходимо использовать малоэлементную АР на прямоугольных и квадратных экранах, то рекомендовано использовать излучатели К3, а многоэлементную – К4 для обеспечения наилучшего согласования и наиболее широкой РПЧ.

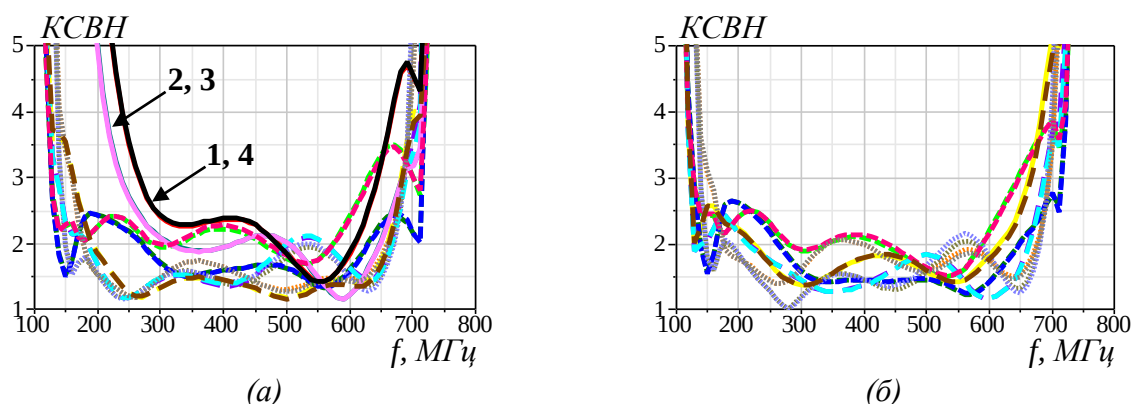


Рисунок 8 – КСВН АР излучателей К1 на квадратном экране при включении всех (а) и при подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки (б)

АР излучателей К1 и К0 является СШП вне зависимости от формы экрана, Использование прямоугольных вставок на кромке крайних излучателей позволяет уменьшить влияние краевого эффекта на характеристики АР (рисунок 9,а,б).

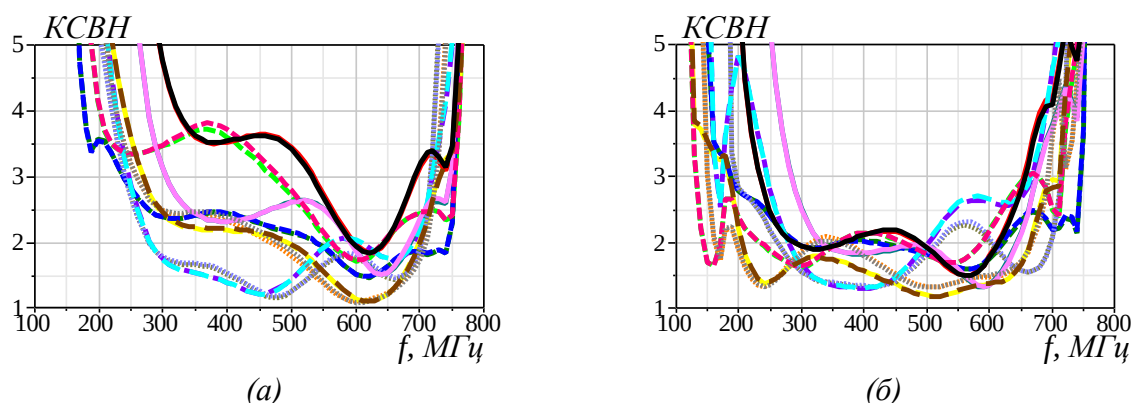


Рисунок 9 –КСВН АР излучателей К0 (а), а также КСВН АР излучателей К0 и К1 (б) на квадратном экране

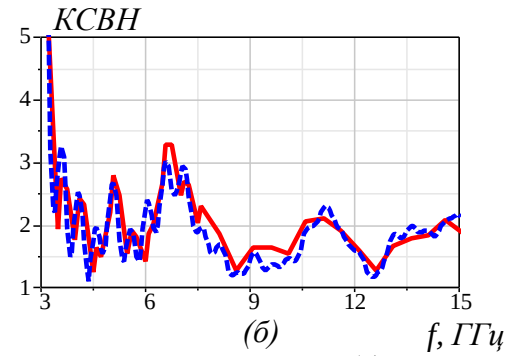
Согласование кардиоидных излучателей малоэлементных АР в среднем лучше, чем излучателей Вивальди, а КП больше. Отключение отдельных излучателей малоэлементных АР позволяет увеличить КП. Изменение конфигурации крайних компактных кардиоидных излучателей с расширяющейся щелью в составе малоэлементной АР позволяет уменьшить влияние краевых эффектов на характеристики решетки, а также улучшить согласование в РПЧ.

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования макетов антенн и АР. Поскольку технических возможностей определить активный КСВН АР нет, исследован КСВН каждого излучателя АР при подключении остальных на согласованные нагрузки.

Разработан и изготовлен макет кардиоидной антенны (рисунок 10,а), а также исследован его КСВН (рисунок 10,б). У КСВН макета отсутствует пик до уровня КСВН = 3,4 на 6,6 ГГц. Антенна имеет продольный размер $\sim 13,5 \lambda$ на частоте 15 ГГц и позволяет работать с КП $\sim 4,2$.



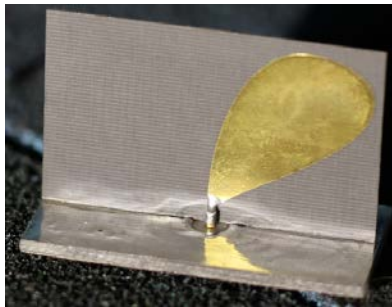
(a)



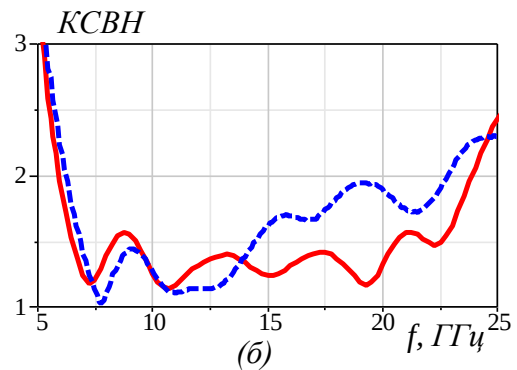
(б)

Рисунок 10 – Макет кардиоидной антенны (а), а также ЧХ КСВН модели (б, —) и макета (б, - -)

Разработан и изготовлен макет кардиоидной антенны уменьшенного размера (рисунок 11,а). КСВН макета на частотах выше 15 ГГц в основном больше КСВН модели на порядка 0,5, однако на РПЧ по уровню КСВН ≤ 3 это не влияет (рисунок 11,б).



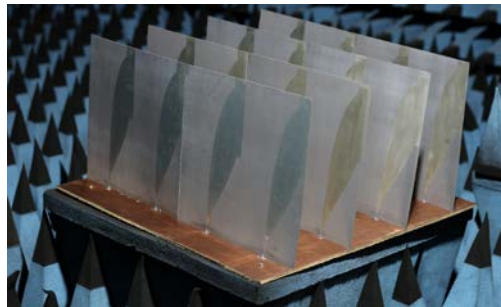
(a)



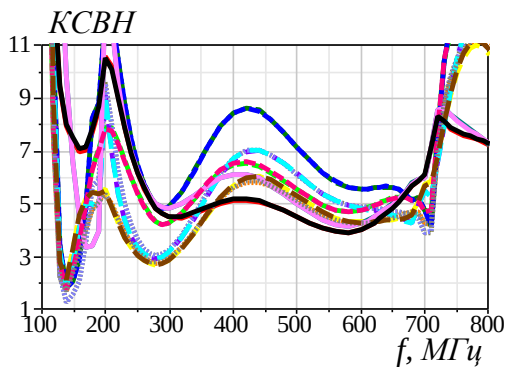
(б)

Рисунок 11 – Макет кардиоидной антенны уменьшенного размера (а), а также ЧХ КСВН модели (б, —) и макета (б, - -)

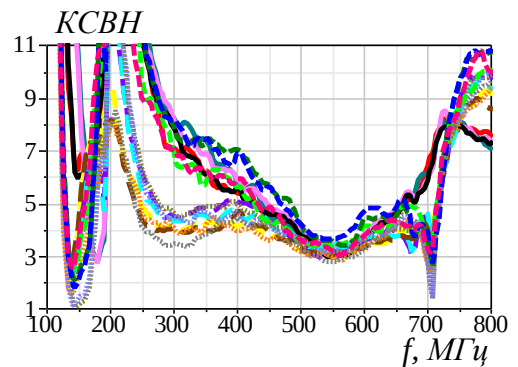
Разработан и изготовлен макет АР кардиоидных излучателей К1 с прямоугольными вставками на внешней кромке (рисунок 12,а). Исследованы КСВН модели и макета АР кардиоидных излучателей К1 (рисунок 12,б,в).



(a)



(б)

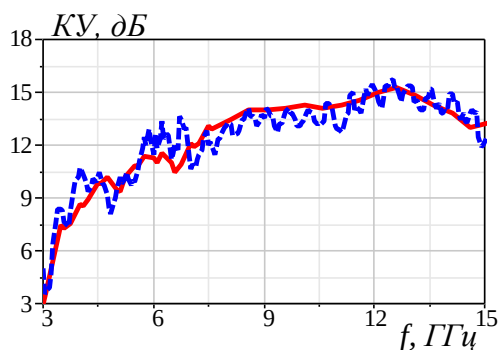


(в)

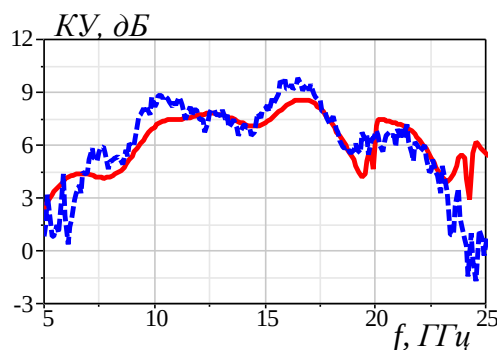
Рисунок 12 – АР кардиоидных излучателей К1 (а), а также ЧХ КСВН модели (б) и макета (в)

КСВН модели АР излучателей 5 – 12 (два центральных ряда) в полосе 250 – 720 МГц располагается ниже уровня КСВН = 7, а КСВН макета АР – в основном ниже уровня КСВН = 5.

Графики КУ макетов кардиоидной антенны и кардиоидной антенны уменьшенного размера в РПЧ имеют осцилляции порядка 2,3 дБ (рисунок 13,а) и 4 дБ (рисунок 13,б), однако средние уровни КУ макетов совпадают со средним уровнем КУ моделей. Различия более 4 дБ КУ модели и макета кардиоидной антенны уменьшенного размера наблюдаются на частотах выше 23 ГГц, что в основном связано с погрешностями в согласовании их поляризаций.



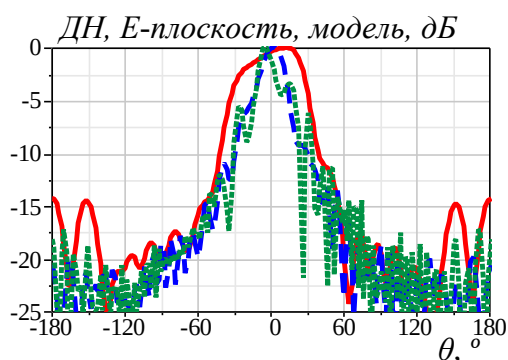
(а)



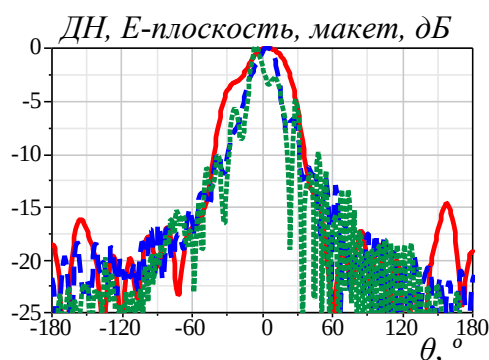
(б)

Рисунок 13 – ЧХ КУ кардиоидной антенны (а) и кардиоидной антенны уменьшенного размера (б): моделей (—) и макетов (---)

ДН модели и макета кардиоидной антенны на частотах 5, 10 и 15 ГГц в Е-плоскости представлены на рисунке 14,а,б, соответственно.



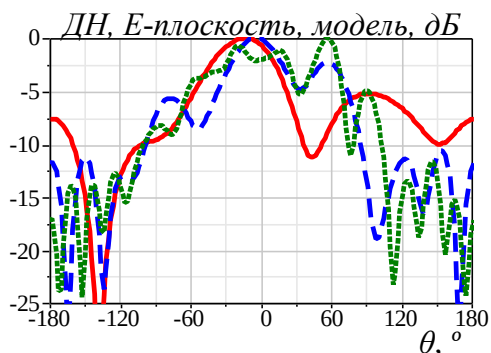
(а)



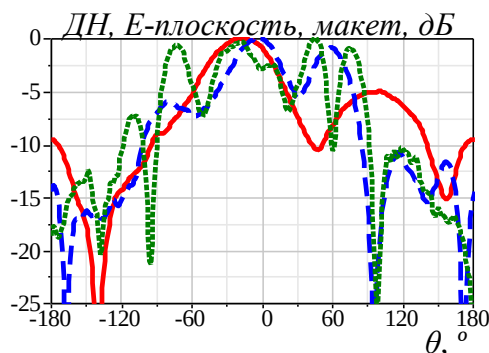
(б)

Рисунок 14 – ДН модели и макета кардиоидной антенны на частотах 5 (—), 10 (---) и 15 (---) ГГц в Е-плоскости

ДН модели и макета кардиоидной антенны уменьшенного размера на частотах 6 (—), 15 (---) и 24 (---) ГГц в Е-плоскости представлены на рисунке 15,а,б.



(а)



(б)

Рисунок 15 – ДН модели и макета кардиоидной антенны уменьшенного размера на частотах 6 (—), 15 (---) и 24 (---) ГГц в Е-плоскости

Ширина ДН макета кардиоидной антенны в Е-плоскости на частоте 5 ГГц уже на 11° , на 10 ГГц – на 3° , а на 15 ГГц – на 1° по сравнению с моделью. Ширина ДН макета кардиоидной антенны уменьшенного размера в Е-плоскости на частоте 6 ГГц практически совпадает. На 15 ГГц ширина ДН макета уже на 5° , а на 24 ГГц ширина ДН макета составляет 27° , а также наблюдаются два боковых лепестка, максимумы которых ориентированы на 45° и -73° .

ДН модели и макета малоэлементной АР кардиоидных излучателей К1 в Е-плоскости на частотах 300 (—), 450 (---) и 600 (---) МГц представлены на рисунке 16,а,б, соответственно. Ширина ДН макета малоэлементной АР кардиоидных излучателей К1 в Е-плоскости на частоте 300 МГц уже на 50° , на 450 МГц – шире на 6° , а на 600 МГц – шире на 2° .

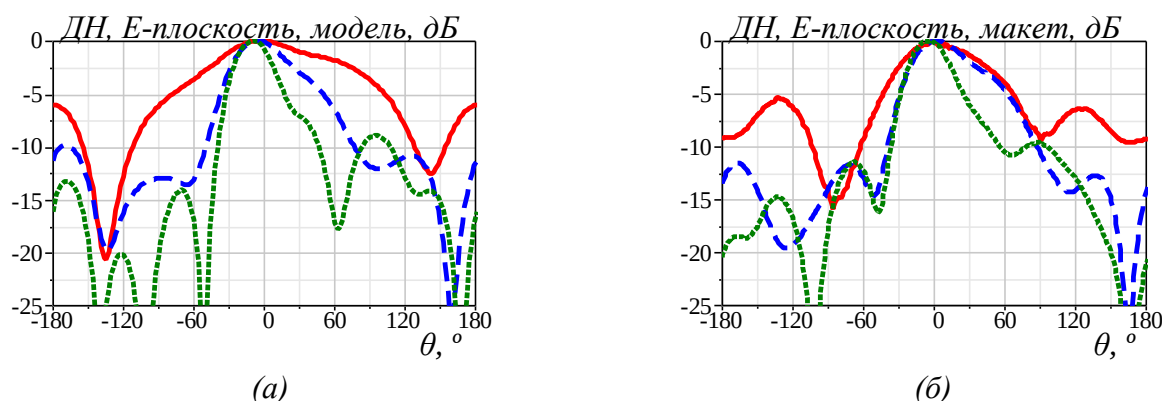


Рисунок 16 – ДН модели и макета малоэлементной АР кардиоидных излучателей К1 в Е-плоскости на частотах 300, 450 и 600 МГц

ДН моделей и макетов антенн похожи, однако ДН макета кардиоидной антенны уменьшенного размера с увеличением частоты приобретает ярко выраженные боковые лепестки, что связано с увеличением высоты антенны в λ на верхних частотах РПЧ.

В заключении сформулированы выводы о решении поставленных задач и достижении цели работы, а также определены возможные дальнейшие исследования по теме диссертации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ существующих СШП антенн с расширяющейся щелью и АР на их основе для выявления ключевых параметров, влияющих на их характеристики. Определено, что компактных СШП антенн и излучателей известно мало. На текущий момент известно большое количество различных конфигураций кромки антенн Вивальди, при этом недостатком таких антенн является высота, превышающая одну или даже несколько длин волн, особенно при $КП \geq 4$. Использование плавной скругленной или эллиптической конфигурации кромки, а также различные модификации антенн и излучателей с расширяющейся щелью позволяют улучшить согласование, сместить нижнюю рабочую частоту вниз по оси частот и увеличить КУ.

2. Проведено численное моделирование и исследование СШП антенн с расширяющейся щелью. В ходе моделирования и исследования антенны Вивальди определено, что разработать более компактную СШП антенну с расширяющейся щелью с сопоставимым с прототипом КП довольно сложно. Обнаружено преимущество кардиоидной кромки, которое заключается в расширении РПЧ ($КП \sim 4,010$ по уровню $КСВН \leq 2$), улучшении согласования (среднее значение $КСВН$ ниже уровня $КСВН = 1,7$) и возможности уменьшения высоты антенны. Однако, уменьшение высоты приводит к уменьшению КУ (в полосе от 5 до 15 ГГц КУ уменьшается на 5 – 9 дБ) и расширению ДН (на $35,1^\circ$ в Е-плоскости на 15 ГГц), что является недостатком.

3. Выполнено численное моделирование и исследование СШП компактных излучателей со сплошной кромкой и кромкой, конфигурация которой описывается кардиоидной формулой, в составе бесконечных ФАР. Определены следующие способы их модификации. Выделены компактные излучатели, позволяющие обеспечить СШП в режиме широкоугольного сканирования в Е- и Н-плоскости в зависимости от сектора углов сканирования. Так, компактный ($0,678 \lambda$ на верхней частоте) кардиоидный двухполяризационный СШП ($KП > 4,1$) излучатель ФАР способен сканировать в секторе углов $\pm 60^\circ$ в Е- и Н-плоскости.

4. Проведено численное моделирование и исследование малоэлементных АР. Определены способы улучшения их характеристик. Использование согласующих прямоугольных вставок на кромке крайних кардиоидных излучателей позволяет уменьшить влияние краевых эффектов на характеристики решетки, что приводит к улучшению согласования в нижней части РПЧ и увеличению КП АР. В результате независимо от формы экрана малоэлементная АР становится СШП с КП более октавы. Использование таких вставок на кромке всех кардиоидных излучателей с отключением избранного ряда излучателей позволяет улучшить согласование и работать в полосе частот с перекрытием более двух октав. Более того, согласование кардиоидных излучателей малоэлементных АР в среднем лучше, чем излучателей Вивальди, а КП больше.

5. Разработка и исследование макетов кардиоидной антенны, кардиоидной антенны уменьшенного размера и АР кардиоидных излучателей с прямоугольными вставками на внешней кромке позволяет подтвердить соответствие экспериментальных и численных математических и физических моделей совпадением экспериментальных результатов с расчетными данными.

Таким образом, в ходе проведенного исследования были успешно решены все поставленные задачи, а поставленная цель достигнута.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. Косак, Р. Э. Компактный сверхширокополосный излучатель Вивальди кардиоидной формы с прямоугольными импедансными вставками / Р. Э. Косак, А. В. Геворкян // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 3(239). – С. 276-284. – DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-276-284. – EDN QNNORI. K2

2. Косак, Р. Э. Антенная решетка компактных излучателей Вивальди с эллиптическими вырезами на кромке / Р. Э. Косак // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 5(241). – С. 232-242. – DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-232-242. – EDN DMZKYV. K2

3. Косак, Р. Э. Влияние согласующих элементов на характеристики кардиоидных излучателей / Р. Э. Косак, А. В. Геворкян // Антенны. – 2025. – № 6(298). – С. 57-71. – DOI 10.18127/j03209601-202506-07. – EDN BKISZY. K2

4. Косак, Р. Э. Компактный двухполяризационный сверхширокополосный кардиоидный излучатель с согласующими вставками / Р. Э. Косак, А. В. Геворкян // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2026. – Т. 29, № 2. – С. 39-48. – DOI 10.32603/1993-8985-2026-29-2-39-48. – EDN IXSKFY. K2

Публикации в сборниках трудов конференций, индексируемых в РИНЦ

5. Косак, Р. Э. Компактный элемент антенной решетки на основе излучателя Вивальди / Р. Э. Косак // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : сборник научных трудов : издаётся с октября 2018 года : выходит 1 раз в год. Вып. 4 : [материалы 17-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы

радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ-2021», 11-15 октября 2021 г., Севастополь, Российская Федерация] / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет»; научный редактор Гимпилевич Ю. Б. – Москва: РНТОРЭС им. А.С. Попова; Севастополь: СевГУ, 2021. – С. 100. – EDN PMFMLM. – URL: <https://rt-sevastopol.ru/conf2021issn/articles/001-018.pdf> (дата обращения 27.08.2026).

6. Kosak, R. E. Research of Ways to Improve Radiation Characteristics of Phased Array Radiator Based on Vivaldi Antenna / R. E. Kosak, A. V. Gevorkyan // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 28 June 2021 - 02 July 2021. – IEEE, 2021. – P. 211-214. – DOI 10.1109/RSEMW52378.2021.9494056. – EDN NGPXQA.

7. Kosak, R. E. A Compact Wide-Angle Scanning Vivaldi Radiator with Square Cutouts in the Metallization / R. E. Kosak, A. V. Gevorkyan // 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation, 23-25 November 2022. – IEEE, 2022. – P. 158-162. – DOI 10.1109/RMC55984.2022.10079429. – EDN KZZBRU.

8. Kosak, R. E. UWB Cardioid-Shaped Vivaldi Antenna / R. E. Kosak, A. V. Gevorkyan // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe Krasnodar Region, Russia, June 26-30, 2023. – IEEE, 2023. – P. 228-231. – DOI 10.1109/RSEMW58451.2023.10202121. – EDN GLIPXI.

9. Косак, Р. Э. Влияние синусоидального рифления кромки излучателя Вивальди на характеристики излучения / Р. Э. Косак // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении. "КомТех-2023": материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в двух томах. Т. 2 / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет", Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова; ответственный редактор С. И. Клевцов. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2023. – С. 124-129. – EDN YFBOHP.

10. Kosak, R. E. Compact Ultra-Wideband Cardioid-Shaped Vivaldi Radiator with H-Shaped Impedance Inserts in the Aperture / R. E. Kosak, A. V. Gevorkyan // Proceedings 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC), Russia, Moscow, November 25-29, 2024 / Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Science. – IEEE, 2024. – P. 330-334. – DOI 10.1109/RMC62880.2024.10846865. – EDN IY LXRI.

11. Косак, Р. Э. Влияние вставок эллиптической формы на кромке излучателя Вивальди на характеристики излучения / Р. Э. Косак // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении "КомТех-2024": материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в двух томах. Т. 2 / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет", Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; ответственный редактор С. И. Клевцов. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2024. – С. 251-256. – EDN UHX YQY.

12. Косак, Р. Э. Компактный кардиоидный излучатель фазированной антенной решетки с прямоугольными вставками / Р. Э. Косак, А. В. Геворкян // Всероссийская научная конференция "2025 Излучение и рассеяние электромагнитных волн": ИРМВ-2025, 23-27 июня 2025 г., с. Дивноморское, Краснодарский край, Россия: сборник докладов / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет", ООО "Радиомера". – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2025. – С. 94-99.

13. Косак, Р. Э. Двухполяризационный сверхширокополосный кардиоидный излучатель / Р. Э. Косак // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии = Microwave and Telecommunication Technology: издается с 2020 года: выходит 1 раз в год. Вып. 7: [материалы

35-й Международной научно технической конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМи Ко'2025), 7-13 сентября 2025 г.] – Севастополь : СевГУ, 2025. – С. 54-55. – EDN VHYTZV.

14. Косак, Р. Э. Шестнадцатиеlementная антенная решетка компактных излучателей Вивальди / Р. Э. Косак, Ю. В. Юханов // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : сборник научных трудов : издаётся с октября 2018 года : выходит 1 раз в год. Вып. 8 : [материалы 21-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ-2021», 6-10 октября 2025 г., Севастополь, Российская Федерация] / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет» ; научный редактор Афонин И. Л. – Москва: РНТОРЭС им. А.С. Попова ; Севастополь: СевГУ, 2025. – № 8. – С. 131. – EDN KCDGGL.

15. Косак, Р. Э. Влияние прямоугольных вставок на характеристики малоэлементных антенных решеток на основе кардиоидных излучателей / Р. Э. Косак, Ю. В. Юханов // Антенны и распространение радиоволн 2025 (APP'25) : VI Всероссийская научно-техническая конференция, 1-3 октября, 2025 : сборник докладов / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина). – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. – С. 11-13. – EDN UHMXAM. [*Переводная версия*: Influence of Rectangular Inserts on the Characteristics of Antenna Array with Small Element-Counts Based on Cardioid Radiators / R. E. Kosak and Y. V. Yukhanov // Proceedings of 2025 Antenna Design and Measurement International Conference (ADMInC'25), October 1-3, 2025. – IEEE, 2025. – P. 10-12. – DOI 10.1109/ADMInC68550.2025.11325332].

Патенты

16. Патент № 2824863 С1 Российская Федерация, МПК H01Q 1/38. Сверхширокополосная антенна Вивальди кардиоидной формы : № 2024110344 : заявл. 16.04.2024 : опубл. 14.08.2024, Бюл. № 23 / Р. Э. Косак ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет".

17. Патент № 2834735 С1 Российская Федерация, МПК H01Q 1/38. Компактный сверхширокополосный излучатель Вивальди кардиоидной формы широкоугольного сканирования с импедансными вставками : № 2024128817 : заявл. 27.09.2024 : опубл. 13.02.2025, Бюл. № 5 / Р. Э. Косак, А. В. Геворкян ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет".

18. Патент № 2859961 С1 Российская Федерация, МПК H01Q 1/38. Компактный сверхширокополосный кардиоидный излучатель с согласующими вставками : № 2025120239 : заявл. 22.07.2025 : опубл. 13.04.2026, Бюл. № 11 / Р. Э. Косак, А. В. Геворкян ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет".

19. Патент на полезную модель № 231877 U1 Российская Федерация, МПК H01Q 1/38. Компактный сверхширокополосный излучатель Вивальди кардиоидной формы с прямоугольными вставками : № 2024136334 : заявл. 04.12.2024 : опубл. 14.02.2025, Бюл. № 5 / Р. Э. Косак, А. В. Геворкян ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет".

20. Патент № 2853114 С1 Российская Федерация, МПК H01Q 1/38. Компактный двухполяризационный сверхширокополосный кардиоидный излучатель с согласующими вставками для широкоугольного сканирования : № 2025120244 : заявл. 22.07.2025 : опубл. 19.12.2025, Бюл. № 35 / Р. Э. Косак, А. В. Геворкян ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет".

Косак Роман Эдуардович
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ АНТЕННЫ С РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ЩЕЛЬЮ И
АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ НА ИХ ОСНОВЕ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 08.10.2026 г.
Бумага офсетная. Формат 60х84 1/16. Тираж 100 экз.
Усл. печ. лист.1,0. Уч. изд. л. 1,0. Заказ № 32

Отпечатано в отделе полиграфии центра услуг «Караван», 615400225064
347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 63, тел 8-928-600-8000