

На правах рукописи



Пропастин Алексей Алексеевич

Многоэлементные излучатели с секторной диаграммой направленности

Специальность 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Русов Юрий Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектронных систем и устройств ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Климов Константин Николаевич**, доктор технических наук, главный научный сотрудник ПАО «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина»

Кондратьева Светлана Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиофизики, антенн и микроволновой техники ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация: **Акционерное общество Центральное конструкторское бюро аппаратостроения**

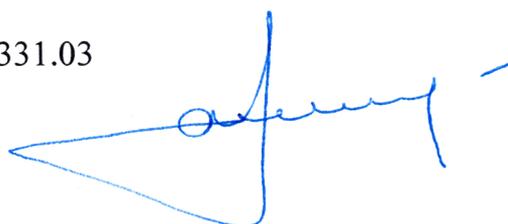
Защита диссертации состоится 5.12.2024 в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.331.03 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр. 1, зал Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <https://bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.03.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.03
к.т.н., доцент



М.В. Родин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При разработке радиотехнических систем различного назначения в настоящее время применяют технические решения на основе фазированных антенных решеток (ФАР). Повышение требований к тактико-техническим характеристикам радиотехнических систем приводит к усложнению устройств, входящих в их состав. В процессе совершенствования приемно-передающих и антенных трактов возникает необходимость разработки новых излучателей, удовлетворяющих более жестким техническим требованиям.

Развитие измерительной техники требует создание высококачественных коллиматорных стендов, обеспечивающих высокую равномерность электромагнитного поля в рабочей зоне и более эффективное использование площади коллиматора. Важным элементом коллиматорных стендов является облучатель зеркала коллиматора, который может обеспечить большую рабочую зону с требуемыми характеристиками электромагнитного поля. Этими характеристиками являются неравномерности по фазе и амплитуде, которые в современных коллиматорах достигают единиц градусов и десятых долей децибел. Таким требованиям удовлетворяет излучатель с секторной диаграммой направленности (ДН), поэтому разработка этих излучателей представляет практический интерес.

Другим применением подобных излучателей могут быть разреженные антенные решетки с модульным построением. ДН такого излучателя должна обеспечивать подавление дифракционных лепестков при соблюдении требуемого уровня боковых лепестков (УБЛ) в секторе сканирования луча.

Антенны с секторными диаграммами направленности (иначе контурными или столообразными) широко используются в качестве облучателей гибридных зеркальных и линзовых антенн, облучателей коллиматоров и активных ФАР, а также излучателей ФАР с небольшим сектором сканирования луча. Такие излучатели позволяют создать амплитудно-фазовое распределение (АФР) поля, отличающееся высокой равномерностью в сочетании с необходимым резким спадом уровня поля на краях апертуры, а облучатели – добиться необходимого резкого спада уровня поля на краях апертуры с учетом краевых эффектов. При использовании излучателей с секторной диаграммой направленности в качестве излучателей ФАР подавляются дифракционные лепестки или лепестки квантования, повышается равномерность коэффициента усиления ФАР в пределах сектора электрического сканирования луча и появляется возможность уменьшения числа фазовращателей в антенной решетке. Кроме того, такие излучатели в составе зеркальных антенн могут формировать косекансную ДН, что дает возможность их применения в многофункциональных интегрированных радиолокационных станциях региональных аэродромов, входящих в системы управления воздушным движением. Таким образом, исследование и разработка многоэлементных излучателей с секторной ДН представляет собой актуальную научно-техническую проблему.

Степень разработанности темы. Наибольших успехов в настоящее время в области исследования антенных решеток с секторными и парциальными диаграммами направленности добился российский ученый С.П. Скобелев. Вопросами формирования ДН, в том числе секторных, а также методами синтеза антенн занимались многие отечественные исследователи: Е.Г. Зелкин, В.Ф. Кравченко, В.Г. Соколов, Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий, А.А. Пистолькорс, Я.Н. Фельд, А.Ф. Чаплин и др., и зарубежные исследователи: S. Butterworth, A. Ksienski, D.R.K. Brayton, S.W. Director, G.D. Nachtel, L. Vidigal, P.M. Woodward, O.M. Vucsi и др. Разработка и проектирование излучающих систем, формирующих секторные ДН, также отражены в работах следующих ученых: Н.А. Бея, В.Н. Митрохина, Ю.Б. Нечаева, В.М. Крехтунова, Ю.С. Русова, С.Е. Банкова, В.А. Калошина, Е.В. Овчинниковой, С.Г. Кондратьевой, К.Н. Климова и др.

Помимо этого, имеется широкий спектр работ, охватывающих проблемы исследования возможности повышения качества синтезированных секторных ДН и уменьшения уровня боковых лепестков, а также совершенствования диаграммообразующих схем, позволяющих формировать секторные диаграммы направленности, отвечающие заданным требованиям. Развитие данного направления исследований можно наблюдать по многочисленным докладам на международных конференциях об успехах и новых разработках в данной области. Однако возрастающие требования к таким излучателям требуют поиска альтернативных научно-технических решений.

Объект исследования. Многоэлементный излучатель, формирующий секторную ДН в Е- и Н-плоскостях и содержащий диаграммообразующую схему возбуждения на базе волноводно-щелевого делителя мощности с излучающими элементами в виде открытых концов волноводов, влияние элементов матрицы рассеяния направленных ответвителей схемы возбуждения на основные электрические характеристики ДН излучателя.

Предмет исследования. Электрические характеристики секторной ДН: ширина главного лепестка ДН, уровень боковых лепестков, неравномерность поля в области вершины главного лепестка ДН, коэффициенты передачи и отражения на входах и выходах направленных ответвителей схемы возбуждения.

Цель работы. Исследование и разработка многоэлементных излучателей, формирующих двумерные секторные ДН в двух ортогональных плоскостях с требуемой шириной главного лепестка и неравномерностью поля в пределах заданного сектора углов.

Решаемые задачи:

1. Анализ различных способов аппроксимации целевой секторной ДН и синтез амплитудно-фазового распределения в раскрыве многоэлементного излучателя.

2. Разработка методики расчета матрицы рассеяния однокаскадной шахматной схемы возбуждения многоэлементного излучателя с учетом реальных характеристик направленных ответвителей.

3. Нахождение матрицы рассеяния волноводно-щелевого направленного ответвителя с учетом коэффициента отражения и коэффициента передачи в развязанное плечо.

4. Разработка методики расчета и конструкции многоэлементного излучателя, формирующего секторную ДН в двух ортогональных плоскостях.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Впервые исследовано влияние различных способов аппроксимации целевой секторной ДН на основные электрические характеристики синтезированной ДН линейного излучателя и обоснован выбор кусочно-линейной аппроксимации с независимыми параметрами аппроксимации верхнего и нижнего спадающих участков главного лепестка ДН при решении задачи синтеза амплитудно-фазового распределения в раскрыве многоэлементного излучателя.

2. Предложена методика расчета матрицы рассеяния однокаскадной шахматной схемы возбуждения с учетом коэффициента отражения и коэффициента передачи в развязанное плечо направленных ответвителей.

3. Решена задача нахождения матрицы рассеяния волноводно-щелевого направленного ответвителя с применением декомпозиции устройства на элементы связи и регулярные участки.

Методы исследования. В основу решения задач анализа характеристик поля излучения электродинамических структур положена система уравнений Максвелла. Для решения электродинамических задач использовался метод проекционного сшивания полей электромагнитного поля на границе частичных областей. Синтез секторной диаграммы направленности проводился с помощью метода интеграла Фурье, метода парциальных диаграмм направленности и метода изменяющихся проекций. Оптимизация разработанных математических моделей проводилась по методу деформированного многогранника. Для анализа СВЧ элементов и их соединений использовался метод декомпозиции.

Теоретическая и практическая значимость полученных в диссертации результатов состоит в следующем:

1. Полученная матрица рассеяния волноводно-щелевого направленного ответвителя позволяет определять электрические параметры направленного ответвителя с использованием матриц рассеяния отдельных щелей связи и может применяться при расчете многоэлементного излучателя с секторной ДН.

2. Применение кусочно-линейной аппроксимации верхнего и нижнего спадающих участков главного лепестка целевой секторной ДН с независимыми параметрами аппроксимации верхнего и нижнего спадающих участков главного лепестка ДН позволяет синтезировать секторную ДН с низким УБЛ для излучателей с малым числом элементов.

3. Созданы компьютерные программы, реализующие методику расчета многоэлементного излучателя, формирующего секторную ДН в Е- и Н-плоскостях и выполненного на базе шахматной схемы возбуждения.

Предложенные программы позволяют ускорить процесс разработки и моделирования излучателя.

4. Предложена методика, позволяющая назначать допуски на электрические характеристики направленных ответвителей для однокаскадной шахматной схемы возбуждения и одновременно обеспечивать требуемые значения ширины главного лепестка и УБЛ ДН излучателя.

5. Предложена конструкция излучателя на базе раскрыва из открытых концов прямоугольных волноводов, обеспечивающая формирование секторной ДН в Н- и Е-плоскостях, отличающаяся простотой сборки и пригодная для изготовления с использованием современных технологических процессов.

Обоснованность и степень достоверности полученных в диссертации результатов обеспечивается:

- строгой постановкой граничных условий;
- использованием известных методов решения электродинамических задач;
- сравнением результатов, полученных различными методами при решении одной и той же электродинамической задачи;
- проверкой сходимости полученных численных результатов;
- сравнением с имеющимися в научной литературе результатами научных исследований.

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

- X Всероссийской научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике», 20-22 июня 2016 г., Менделеево;
- 22-й международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», 19-21 апреля 2016 г., Воронеж;
- The International Scientific Conference Radiation and scattering of electromagnetic waves, 26-30 June 2017, Gelendzhik, Russia;
- 11-й международной научно-технической конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», ARMIMP-2018, 7-10 октября 2018 г, Суздаль;
- 6-ой Всероссийской микроволновой конференции, 28-30 ноября 2018г., Москва;
- 30-й Международной научно-технической конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», 6-12 сентября 2020 г., Севастополь;
- XXVIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», 27-29 сентября 2022 г., Воронеж;
- XX Международной научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии», 1-10 октября 2023 г., Махачкала.

Внедрение результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы внедрены в АО «НПП «Салют» и ОАО «Завод Магнетон», используются на кафедре «Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Личный вклад автора. Состоит в разработке варианта кусочно-линейной аппроксимации целевой секторной ДН для синтеза ДН методом интеграла Фурье; в разработке методики расчета матрицы рассеяния однокаскадной шахматной схемы возбуждения излучателя с учетом коэффициента отражения и коэффициента передачи в развязанное плечо направленного ответвителя; в разработке и исследовании конструкции излучателя с секторной ДН на базе решетки из открытых концов прямоугольных волноводов; в создании методик и соответствующих компьютерных программ, позволяющих ускорить процесс разработки и моделирования излучателей с секторной ДН; в исследовании и применении предложенной методики для построения ряда излучателей, которые могут применяться в составе коллиматорного стенда для измерения электрических характеристик антенн.

Положения, выносимые на защиту:

1. Применение кусочно-линейной аппроксимации верхнего и нижнего спадающих участков главного лепестка целевой секторной ДН, формируемой малоэлементной антенной решеткой, позволяет уменьшить СКО синтезированной ДН от целевой.

2. Предложенные выражения для нахождения матрицы рассеяния позволяют вычислять амплитудно-фазовое распределение, формируемое в раскрытие многоэлементного излучателя с помощью однокаскадной шахматной схемы возбуждения, что дает возможность исследовать влияние параметров направленных ответвителей, входящих в схему возбуждения, на характеристики формируемой многоэлементным излучателем ДН.

3. Предложенная методика анализа и расчета излучателя позволяет получать секторную ДН одновременно в Е- и Н-плоскостях с требуемыми значениями ширины главного лепестка и уровня боковых лепестков.

Публикации. Содержание диссертации отражено в 16 научных работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, из них 6 работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ по специальности 2.2.14, и 1 работа, индексируемая в базе Scopus.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа содержит введение, 4 главы, выводы по каждой главе, общие выводы по диссертационной работе и список источников, включающий 143 наименования. Работа изложена на 181 листах машинописного текста и содержит 108 рис. и 8 табл.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели, задачи и методы исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; рассматривается степень ее научной разработанности, область и предмет исследования; приводится информация об апробации работы, личном вкладе автора, подтверждается достоверность и обоснованность полученных результатов, структура

диссертации, внедрение результатов работы; формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 проведен аналитический обзор существующих конструкций излучателей, формирующих секторные диаграммы направленности. Проведен сравнительный обзор основных электрических характеристик рассмотренных излучателей, по результатам которого выявлены преимущества и недостатки конструкций излучателей.

Сделан вывод о том, что рассмотренные конструкции излучателей с секторными ДН не в полной мере удовлетворяют требованиям, которые могут предъявляться при разработке современных радиотехнических систем. Сформулирована актуальная проблема создания излучателя с секторной ДН в двух плоскостях с повышенными требованиями к уровню боковых лепестков и неравномерности вершины главного лепестка ДН.

В Главе 2 рассмотрены методы синтеза амплитудного распределения поля для формирования секторной ДН. Такими методами являются: метод интеграла Фурье, метод парциальных ДН и метод изменяющихся проекций. Проведен синтез АФР для линейной решетки излучателей из шести элементов с межэлементным расстоянием, равным половине длины волны. По результатам анализа синтезированных АФР сделан вывод, что метод парциальных ДН и метод изменяющихся проекций синтезируют такое АФР для линейного излучателя из шести элементов, которое формирует ДН с провалом в главном лепестке более 1 дБ, что не удовлетворяет требованиям к секторной ДН. На Рис. 1 представлены синтезированные ДН: а) методом интеграла Фурье, б) методом парциальных ДН, в) методом изменяющихся проекций, г) методом разложения по нечетным функциям Матье.

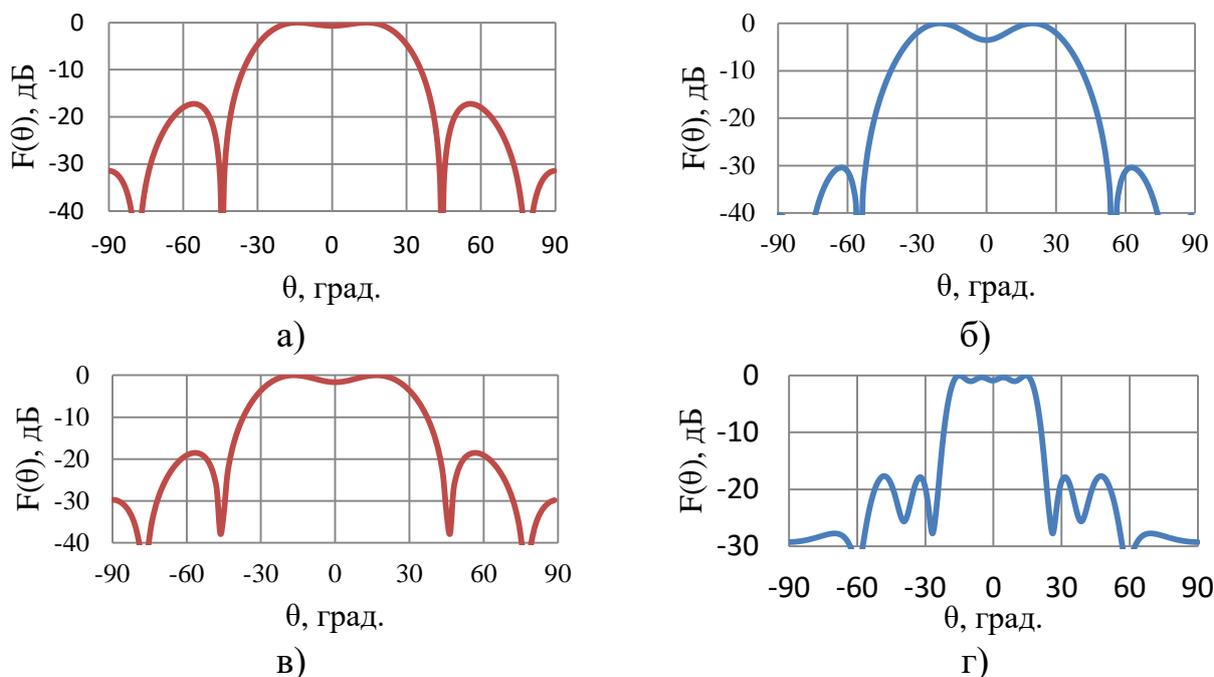


Рис. 1. Синтезированные ДН: (а) метод интеграла Фурье; (б) метод парциальных ДН; (в) метод изменяющихся проекций; (г) метод разложения по нечетным функциям Матье

Метод синтеза с помощью нечетных функций Матье больше подходит для излучателей с эллиптической апертурой. Синтезированное АФР не может быть точно реализовано в линейном излучателе и отличается большой неустойчивостью. В результате анализа выбран метод интеграла Фурье, так как восстановленная ДН отличается высокой равномерностью главного лепестка (Таблица 1). Увеличенный уровень боковых лепестков будет снижен за счет применения аппроксимации целевой секторной ДН.

По найденному АФР для многоэлементного излучателя находятся коэффициенты передачи направленных ответвителей для однокаскадной шахматной схемы возбуждения. С учетом найденных значений коэффициентов передачи определяются геометрические параметры направленных ответвителей. Разработана математическая модель излучателя, в которую входят матрицы рассеяния неидеальных направленных ответвителей, что позволяет принять во внимание отражения от направленных ответвителей, входящих в диаграммообразующие схемы для Н- и Е-плоскостей, а также отражения от выходов излучателей. Математическая модель позволяет проводить оптимизацию излучателя путем определения необходимых коэффициентов передачи направленных ответвителей.

Таблица 1.

Сравнительный анализ основных электрических характеристик синтезированных ДН

Наименование метода	Ширина ДН по уровню минус 1 дБ, град.	Ширина ДН по уровню минус 3 дБ, град.	УБЛ, дБ
Метод интеграла Фурье	44	54	-17
Метод изменяющихся проекций	не обеспечивает	58	-18
Метод разложения по нечетным функциям Матье	28	31	-17
Метод парциальных ДН	не обеспечивает	не обеспечивает	-30

Выполнена аппроксимация целевой ДН, имеющей точки разрыва, в которых производная функции ДН становится бесконечной. Для получения компромиссного решения между низким УБЛ и максимальной шириной главного лепестка ДН введена кусочно-линейная аппроксимация целевой ДН (Рис. 2).

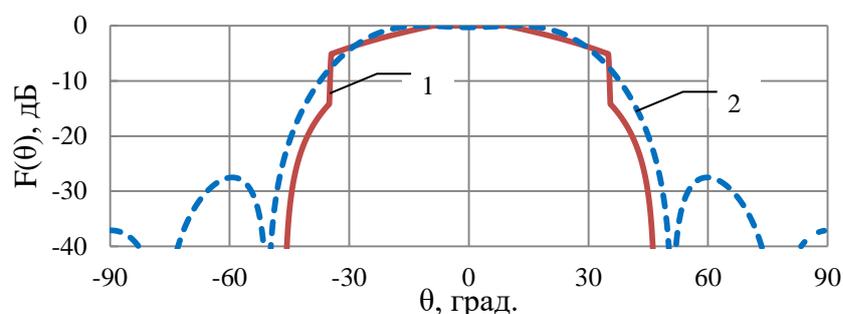


Рис. 2. Кусочно-линейная аппроксимация целевой ДН (1) и синтезированная ДН (2)

Функцию для аппроксимации можно записать с помощью функции Хэвисайда, которая будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 F(u) = & \eta(u+x_2) - \eta(u-x_2) + (u+x_1)(\eta(u+x_2) - \eta(u+x_1)) + \\
 & + (u-x_1)(\eta(u-x_2) - \eta(u-x_1)) + \\
 & + (u+x_2+x_3)(\eta(u+x_2+x_3) - \eta(u+x_2)) + \\
 & + (u-x_2-x_3)(\eta(u-x_2-x_3) - \eta(u-x_2)),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $x_1 = \theta_s - t_1$, $x_2 = \theta_s - t_2$, $x_3 = t_3$, $u = \sin(\theta_s)$, θ_s – ширина главного лепестка по уровню минус 1 дБ, t_1, t_2, t_3 – параметры, определяющие аппроксимацию верхнего и нижнего спадающих участков главного лепестка ДН.

Преимущество такой записи предложенной кусочно-линейной аппроксимации целевой ДН состоит в возможности взять от нее обратное преобразование Фурье и получить результат в аналитической форме:

$$\begin{aligned}
 A(u, x_1, x_2) = & \frac{2 \cos(u x_1) - \cos(u x_2) + 2 u i \cos(u x_2)}{u^2} + \\
 & + \frac{-2 x_1 u i \cos(u x_2) + 2 x_1 u \sin(u x_2) - 2 x_2 u \sin(u x_2)}{u^2} + \frac{2 \sin(u x_2)}{u}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

После синтеза АФР методом интеграла Фурье для аппроксимированной целевой ДН проведен анализ ДН, характеристики которой представлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Сравнение параметров ДН при различных аппроксимациях

Вид аппроксимации	Ширина ДН по уровню -1 дБ, град.	УБЛ, дБ
Отрезки ряда Фурье	42	-30
Дробно-рациональная модель	46	-23
Сглаживающий сплайн	42	-33
Атомарная функция $ip(x)$	52	-25
Кусочно-линейная аппроксимация	44	-27

Анализ результатов сравнения показал, что наибольшая ширина синтезированной ДН наблюдается при аппроксимации атомарными функциями, а наименьший УБЛ – при аппроксимации сглаживающим сплайном.

В результате проведенных исследований для синтеза АФР многоэлементного излучателя с секторной ДН разработана и применена методика, использующая кусочно-линейную аппроксимацию целевой ДН и метод интеграла Фурье.

В Главе 3 рассмотрена матрица фрагмента однокаскадной шахматной схемы возбуждения, применяемой для формирования необходимого

амплитудно-фазового распределения в раскрыве многоэлементного излучателя. Предложен анализ однокаскадной шахматной схемы возбуждения с направленными ответвителями, матрицы рассеяния которых содержат в том числе коэффициенты отражения и коэффициенты передачи в развязанное плечо ответвителя. Предложены выражения для вычисления амплитудно-фазового распределения, формируемого однокаскадной шахматной схемой возбуждения с неидеальными направленными ответвителями.

Рассмотрена методика расчета направленных ответвителей с использованием метода декомпозиции, где частичные области характеризуются матрицами рассеяния. Выполнена декомпозиция шахматной схемы возбуждения на отдельные направленные ответвители. Каждый направленный ответвитель характеризуется матрицей рассеяния, получаемой соединением матриц рассеяния отдельных областей передачи (щелей связи) и регулярных участков волновода. Матрица рассеяния регулярной линии передачи получена из соотношений для линии задержки. В результате сформирован набор матриц рассеяния, каждая из которых соответствует определенной длине щели связи. Выполнена композиция многополюсника, представляющего направленный ответвитель с четырьмя одинаковыми (Рис. 3 а) и разными щелями (Рис. 3 б).

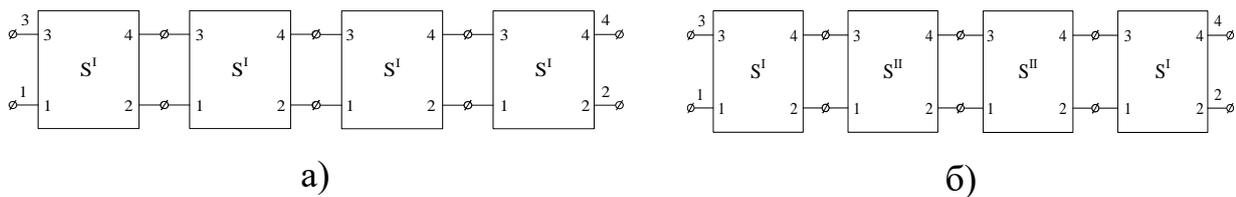


Рис. 3. Многополюсник направленного ответвителя с четырьмя элементами связи: (а) одинаковыми, (б) разными

Для общего случая соединения многополюсников составлена общая матрица соединения многополюсников и решена система линейных алгебраических уравнений (3), в результате чего получено соотношение:

$$[S] = [K_1] \left\{ [S_1] - [S_2] \left([S_4] - [K_2] \right)^{-1} [S_3] \right\} [K_1], \quad (3)$$

где $[S]$ – искомая матрица рассеяния сложного многополюсника; $[K_1]$, $[K_2]$ – матрицы удлинительных линий, подключенных к выходам 1, 2, 3, 4, $[S_1]$, $[S_2]$, $[S_3]$, $[S_4]$ – клеточные матрицы, на которые разделяется совокупная матрица рассеяния соединяемых многополюсников.

Полагая, что все элементы такого направленного ответвителя имеют одинаковые матрицы рассеяния, найдена матрица рассеяния четырехщелевого направленного ответвителя. При этом для упрощения расчетных соотношений введены допущения. При выводе формулы исключены все слагаемые, где степень коэффициента отражения α и степень коэффициента передачи в развязанное плечо направленного ответвителя γ больше 2. Данное предположение допустимо при слабом отражении от элементов ответвителя,

что наблюдается при малых длинах щелей связи. Элемент матрицы S_{14} рассчитан по формуле (4).

$$S_{14} = \beta_1 \left(\delta_1 \left(\beta_2^2 + \delta_2^2 \right) + 2\beta_1 \beta_2 \delta_2 \right) + \delta_1 \left(\beta_1 \left(\beta_2^2 + \delta_2^2 \right) + 2\beta_2 \delta_1 \delta_2 \right), \quad (4)$$

где β – коэффициент прямой передачи, δ – коэффициент перекрестной связи. Матрицы рассеяния элементов связи направленного ответвителя имеют вид (5).

$$S^I = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & \delta_1 \\ \beta_1 & \alpha_1 & \delta_1 & \gamma_1 \\ \gamma_1 & \delta_1 & \alpha_1 & \beta_1 \\ \delta_1 & \gamma_1 & \beta_1 & \alpha_1 \end{bmatrix}, \quad S^{II} = \begin{bmatrix} \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & \delta_2 \\ \beta_2 & \alpha_2 & \delta_2 & \gamma_2 \\ \gamma_2 & \delta_2 & \alpha_2 & \beta_2 \\ \delta_2 & \gamma_2 & \beta_2 & \alpha_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Если принять элементы матриц S^I и S^{II} (5) одинаковыми, то выражение (4) примет вид (6), и коэффициент передачи направленного ответвителя примет вид:

$$S_{14} = 4\beta\delta^3 + 4\beta^3\delta. \quad (6)$$

На Рис. 4 представлены зависимости элементов матрицы рассеяния от частоты четырехщелевого волноводного направленного ответвителя (ВЦНО), вычисленные с помощью выражений (4) и (6). На Рис. 4 б) приведена матрица рассеяния, полученная для рассматриваемого ВЦНО с разными элементами связи.

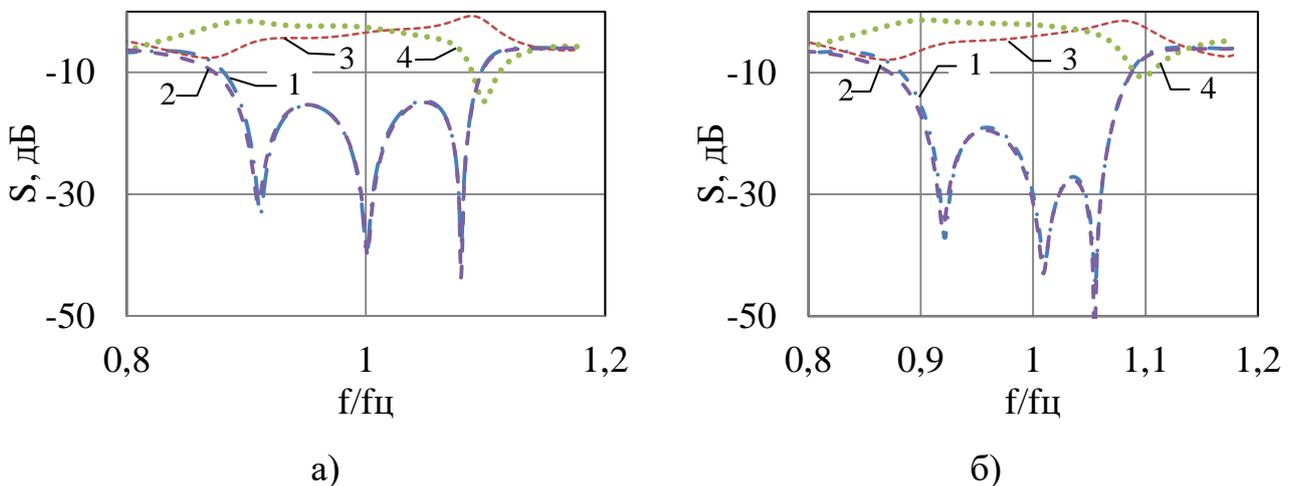


Рис. 4. Зависимости элементов матрицы рассеяния четырехщелевого направленного ответвителя от частоты: с одинаковыми щелями связи (а): 1 – S_{11} , 2 – S_{21} , 3 – S_{31} , 4 – S_{41} , и с разными щелями связи (б): 1 – S_{11} , 2 – S_{31} , 3 – S_{41}

При использовании персонального компьютера с четырехъядерными процессором и тактовой частотой 3,4 ГГц вычисления по предлагаемым формулам занимает в среднем 0,93 с, в то время как электродинамическое моделирование четырехщелевого ВЦНО на одной частоте занимает около 50 с.

Частотные зависимости элементов матрицы рассеяния четырехщелевого направленного ответвителя имеет выраженный резонансный характер. Сравнение результатов расчета по предлагаемым выражениям и расчетов, полученных путем электродинамического моделирования с использованием метода конечных элементов, показывает, что для случая с одинаковыми щелями связи на резонансной частоте отклонение параметра S_{41} составляет 0,1 дБ. Для других элементов матрицы S-параметров в диапазоне частот, за исключением резонансной частоты, расхождение результатов моделирования с расчетными данными составляет 0,1...2 дБ, что позволяет считать получаемые данные достоверными. Путем изменения расстояния между щелями связи можно обеспечить необходимое значение частоты, на которой находятся резонансы коэффициента отражения и коэффициента передачи в развязанное плечо (коэффициента изоляции) для многощелевого ВЦНО. Умножением матрицы рассеяния одной щели на матрицу рассеяния регулярной линии передачи, элементами побочной диагонали которой являются фазовые множители вида $\exp(-i\theta)$, проводится анализ изменения расстояния между щелями связи. Таким образом, получены элементы матрицы рассеяния четырехщелевого направленного ответвителя, выраженные в явном виде через матрицы рассеяния одиночных щелей, что дает возможность быстрого проведения анализа или оптимизации ВЦНО.

Определена матрица рассеяния составной части однокаскадной шахматной схемы возбуждения для симметричных восьмиполюсников, которая позволяет вычислять АФР на выходах многоэлементного излучателя (Рис. 5).

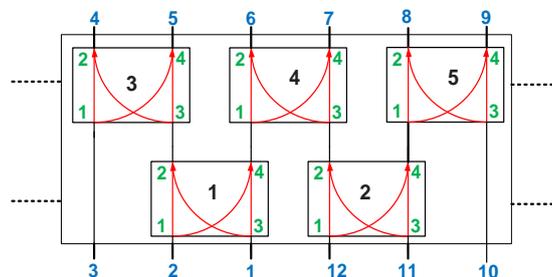


Рис. 5. Составная часть однокаскадной шахматной схемы возбуждения

На Рис. 5 направленные ответвители, обозначенные цифрами 1 и 2, относятся к первому ряду первого каскада, а направленные ответвители, обозначенные цифрами 3 и 4, ко второму ряду первого каскада направленных ответвителей. Направленный ответвитель 5 в расчете не участвует, так как можно считать, что его характеристики будут слабо влиять на значения амплитуд на выходах 4, 5, 6 и 7. Направленные ответвители первого ряда первого каскада имеют матрицы рассеяния с параметрами $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \delta_1$, а направленные ответвители второго ряда первого каскада имеют матрицы рассеяния с параметрами $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2, \delta_2$. После составления клеточных матриц, решения системы уравнений и упрощения полученных выражений амплитуды полей на выходах диаграммообразующей схемы при синфазном возбуждении входов 1 и 12 будут иметь вид:

$$A_4 = -\frac{\delta_2 (\delta_1 - 2\alpha_1 \alpha_2 \delta_1 + \alpha_2 \beta_1 \gamma_1)}{3\alpha_1 \alpha_2 - 1}, A_5 = -\frac{\beta_2 (\delta_1 - 2\alpha_1 \alpha_2 \delta_1 + \alpha_2 \beta_1 \gamma_1)}{3\alpha_1 \alpha_2 - 1}, \quad (7)$$

$$A_6 = -\frac{(\beta_2 + \delta_2) (\beta_1 \alpha_1^2 \alpha_2^2 - \beta_1 \gamma_2 \alpha_1^2 \alpha_2 - 2\beta_1 \alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \gamma_2 \alpha_1 + \delta_1 \gamma_1 \alpha_2 + \beta_1)}{3\alpha_1 \alpha_2 - 1}.$$

Выполнено сравнение ДН многоэлементного излучателя, рассчитанных с учетом формул С.П. Скобелева и с применением найденного по формулам (2) АФР, а также результатов электродинамического моделирования (Рис. 6). С результатом моделирования значительно лучше совпадает ДН, полученная по формулам (7).

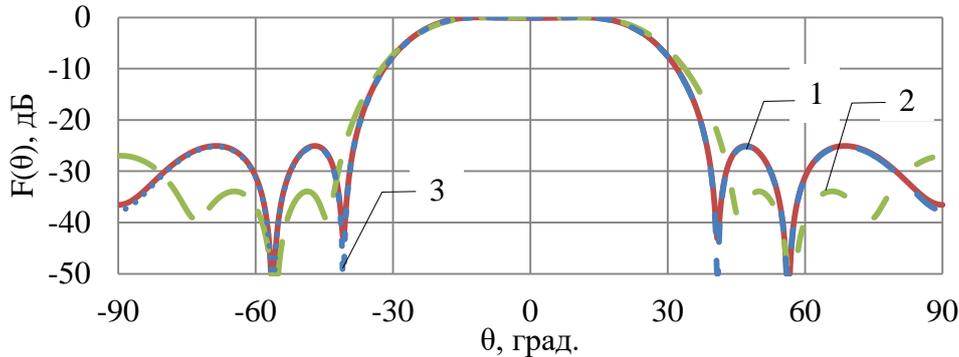


Рис. 6. Диаграммы направленности многоэлементного излучателя: 1 – с учетом рассогласования направленных ответвителей, 2 – без учета рассогласования направленных ответвителей и 3 – моделирование методом конечных элементов

Результат расчетов зависимости УБЛ и ширины главного лепестка ДН по уровню минус 1 дБ для элементов матрицы рассеяния направленного ответвителя занесен в Таблицу 3. Выявлены наиболее чувствительные параметры β_1 , β_2 , δ_2 , которые приводят к существенным изменениям УБЛ и ширины главного лепестка ДН. Проведен анализ чувствительности электрических характеристик ДН к отклонениям элементов матрицы рассеяния направленных ответвителей для однокаскадной шахматной схемы возбуждения. Результаты анализа позволяют задавать допуски на коэффициент отражения на входе направленного ответвителя и на коэффициент передачи в развязанное плечо направленного ответвителя на начальном этапе расчета.

Таблица 3.

Оценка влияния на характеристики ДН отклонений элементов матриц рассеяния направленных ответвителей

Исследуемый параметр	Диапазон отклонения, дБ	Изменение УБЛ, дБ	Изменение $2\theta_{-1}$, град.
α_1	-35... -13	-25...-20	48...49
β_1	-5...-3	-26...-20	40...49
γ_1	-60...-50	-26...-20	47...49
δ_1	-20...-14	-26...-20	48...52

α_2	-40...-16	-25...-20	45...52
β_2	-2,2...-2	-27...-20	48...51
γ_2	-40...-16	-25...-20	46...52
δ_2	-6...-3	-27...-20	48

С использованием полученных выражений проведен расчет параметров и размеров направленных ответвителей схемы возбуждения многоэлементного излучателя.

В Главе 4 выполнен расчет геометрии конструкции излучателя и его электродинамическое моделирование. На Рис. 7 приведена конструкция излучателя.

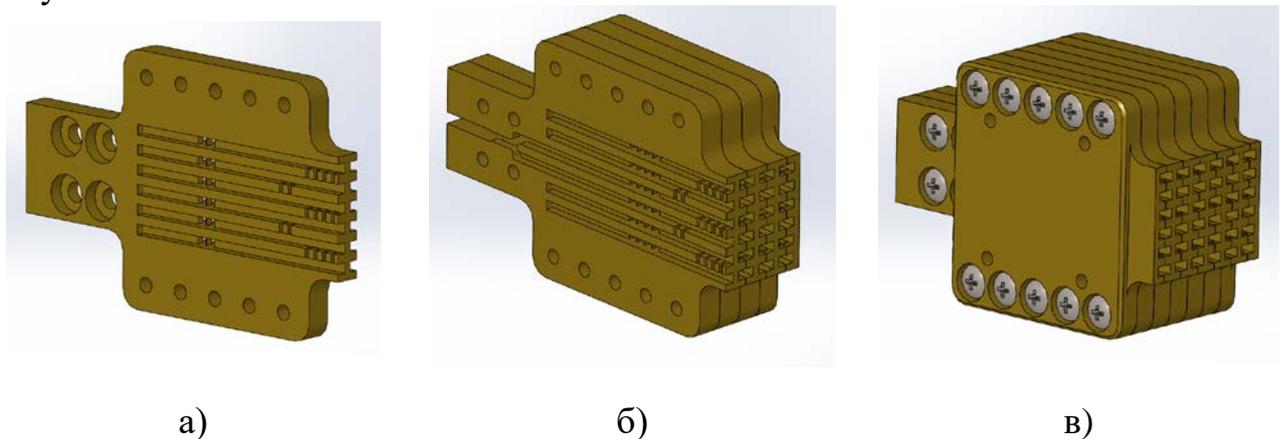


Рис. 7. Конструкция пластины (а), сборка пластин (б) и излучатель (в)

Направленные ответвители схемы возбуждения излучателя изготавливаются в виде плоских деталей (Рис. 7, а), которые объединяются в одну сборочную единицу (Рис. 7, б и Рис. 7, в).

Диаграммы направленности излучателя в Е- и Н-плоскостях, полученные путем электродинамического моделирования, представлены на Рис. 10. В зависимости от амплитуд и фаз возбуждения входов излучателя диаграммообразующая схема позволяет формировать различные наборы ДН, в том числе парциальные и разностные. Примеры различных видов ДН многоэлементного излучателя представлены на Рис. 8, 9.

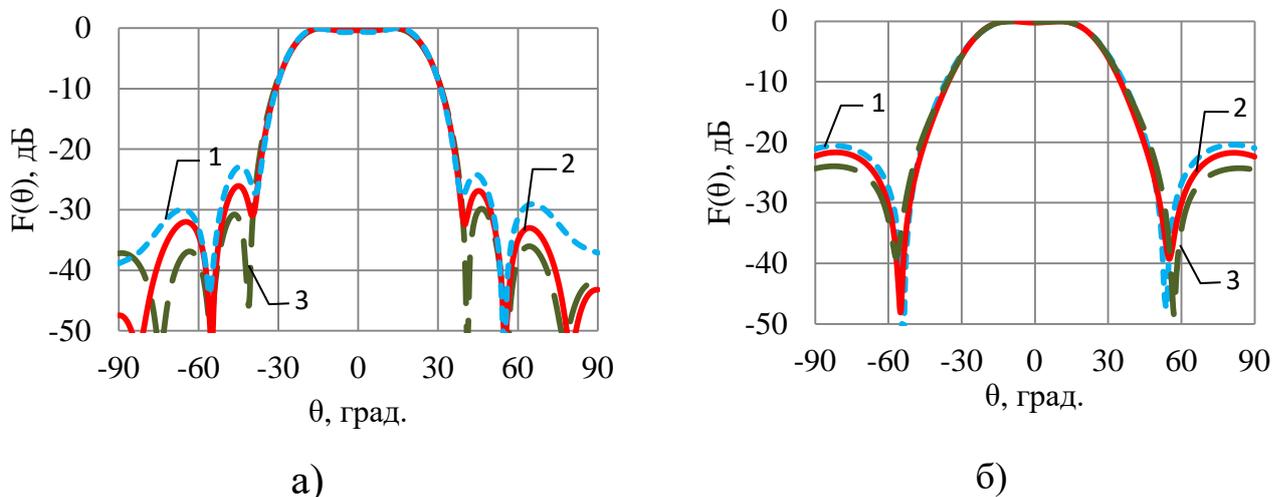
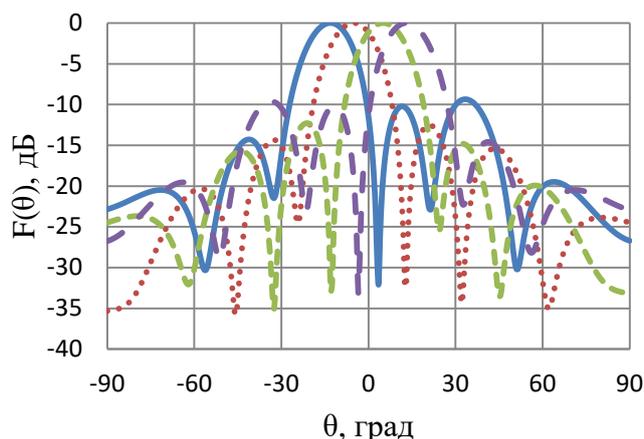
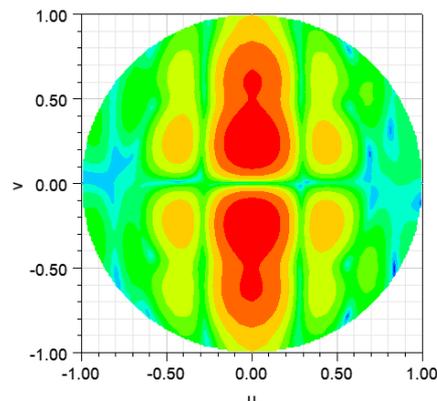


Рис. 8. Секторные ДН излучателя при: 1- f_n ; 2- f_c ; 3- f_b ; (а) - в Н-плоскости;

(б) - в Е-плоскости



а)



б)

Рис. 9. Парциальные ДН излучателя (а) и разностная ДН (б)

Разработан модельный ряд многоэлементных излучателей на различные диапазоны частот, предназначенных для укомплектования измерительных комплексов с зеркальными коллиматорами для антенных измерений. Приводятся практические рекомендации по разработке и изготовлению таких излучателей.

В выводах и заключении приведены основные результаты работы. По результатам исследований, проведенных в диссертационной работе, можно сделать следующие выводы.

1. Проведен анализ существующих конструкций излучателей, которые позволяют формировать секторные ДН. Выявлены основные способы, позволяющие формировать секторные ДН с помощью диаграммообразующего многополюсника, посредством комбинации нескольких типов распространяющихся волн в излучающей структуре, с помощью суперпозиции парциальных ДН элементов излучателя и посредством решетки элементарных излучателей, определенным образом взаимодействующих между собой.

2. Рассмотрены методы синтеза амплитудно-фазового распределения для формирования секторной ДН линейного раскрытия шестиэлементного излучателя. Проведен синтез АФР с помощью метода интеграла Фурье, метода парциальных ДН, метода изменяющихся проекций и метода разложения по нечетным функциям Матье. Для дальнейших исследований выбран метод интеграла Фурье, потому что он наименьшее среднеквадратичное отклонение синтезированной ДН от целевой ДН.

3. Для синтеза АФР методом интеграла Фурье проведен анализ аппроксимаций целевой ДН, у которой имеются точки, где производная функции ДН становится бесконечной. Анализ показал, что наибольшая ширина синтезированной ДН наблюдается при аппроксимации атомарной функцией $ur(x)$, а наименьший УБЛ – при аппроксимации сглаживающим сплайном.

4. С целью получения максимально плоской вершины главного лепестка синтезированной ДН, предложен вариант кусочно-линейной аппроксимации

целевой секторной ДН с отдельными параметрами аппроксимации верхнего и нижнего спадающих участков главного лепестка секторной ДН.

5. Предложена методика расчета однокаскадной шахматной схемы возбуждения с неидеальными направленными ответвителями, матрицы рассеяния которых содержат коэффициенты отражения и коэффициенты передачи в развязанное плечо направленного ответвителя.

6. Получена матрица рассеяния волноводно-щелевого направленного ответвителя с применением декомпозиции ответвителя на области связи и регулярные участки.

7. Разработана методика расчета излучателя с секторной ДН в двух плоскостях.

8. Предложены выражения для вычисления АФР в раскрыве многоэлементного излучателя с однокаскадной шахматной схемой возбуждения, содержащей неидеальные направленные ответвители.

9. Разработана методика расчета допусков на электрические параметры направленного ответвителя для однокаскадной шахматной схемы возбуждения, которая позволяет сохранять электрические характеристики ДН излучателя в заданных пределах.

10. Разработана конструкция излучателя Ка-диапазона волн на базе решетки открытых концов волноводов с однокаскадной шахматной схемой возбуждения, формирующая секторную ДН в Е- и Н-плоскостях с шириной по уровню минус 1 дБ 36 град. и 32 град. соответственно при УБЛ не выше минус 20 дБ.

11. Предложена конструкция излучателя Ка-диапазона волн, с габаритами не более (66×35×138) мм и содержащая семь основных деталей.

12. Показана возможность использования излучателя с секторной ДН в качестве облучателя зеркальной антенны, формирующей перевернутый V-луч с косекансными ДН. Такая антенная система может использоваться в радиолокационных станциях контроля летного поля.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК

Минобрнауки РФ:

1. Митрохин В.Н., Пропастин А.А. Исследование волноводных направленных ответвителей с сильной связью // Антенны. 2017. № 8 (220). С. 67-74. (0,93 п.л. / 0,57 п.л.)

2. Митрохин В.Н., Можаров Э.О., Пропастин А.А. Облучатель Ка-диапазона волн с секторной диаграммой направленности // Антенны. 2015. Вып. 9. С. 3-8. (0,8 п.л. / 0,3 п.л.)

3. Митрохин В.Н., Пропастин А.А. Синтез излучающей системы, формирующей секторную диаграмму направленности с минимизацией эффекта Гиббса // Радиооптика. 2016. № 6. С. 1-13. (1,62 п.л. / 0,8 п.л.)

4. Митрохин В.Н., Пропастин А.А., Русов Ю.С. Исследование влияния бесконечно проводящей разделительной перегородки на взаимную связь между

двумя плоскопараллельными волноводами // Электромагнитные волны и электронные системы, 2018. Вып. 8. С. 18-26. (1,04 п.л. / 0,5 п.л.)

5. Русов Ю.С., Пропастин А.А. Исследование матрицы рассеяния однокаскадной шахматной схемы возбуждения многоэлементного излучателя // Радиостроение. 2021. №4. С. 1-12. (1,51 п.л. / 0,7 п.л.)

6. Русов Ю.С., Пропастин А.А. Применение нечетных функций Матье для синтеза секторной диаграммы направленности многоэлементного излучателя // Радиостроение. 2021. №3. С. 1-12. (1,51 п.л. / 0,75 п.л.)

Статьи, опубликованные в изданиях, цитируемых международными базами Web of Science и Scopus:

7. Mitrokhin V.N., Propastin A.A. Synthesis of the radiating system forming the flat-topped radiation pattern with the most flat top // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). 2017. P. 319-322. (Scopus). (0,46 п.л. / 0,2 п.л.)

Работы, опубликованные в сборниках трудов конференций:

8. Пропастин А.А., Митрохин В.Н. Излучатели с секторными диаграммами направленности в Е- и Н-плоскостях. Метрология в радиоэлектронике // Тезисы докладов X Всероссийской научно-технической конференции. Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений». 2016. С. 269-271. Менделеево. М.О. (0,17 п.л. / 0,08 п.л.)

9. Пропастин А.А. Облучатель на базе решетки одномодовых волноводов с секторной диаграммой направленности Ка-диапазона волн // Молодежный научно-технический вестник. 2015. № 6. С. 36. Москва. (0,11 п.л. / 0,05 п.л.)

10. Митрохин В.Н., Можаров Э.О., Пропастин А.А. Излучатели с секторной диаграммой направленности для фазированных антенных решеток // Сборник докладов 22-й международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». 2016. Т. 2. С. 937-945. Воронеж. (0,56 п.л. / 0,27 п.л.)

11. Пропастин А.А., Русов Ю.С. Анализ характеристик многоэлементного излучателя на основе однокаскадной шахматной схемы возбуждения // Труды 11-й международной научно-технической конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». 2018. С. 63-65. Суздаль. (0,19 п.л. / 0,09 п.л.)

12. Пропастин А.А., Русов Ю.С. Исследование волноводно-щелевых мостовых устройств в области малых коэффициентов связи // Труды 6-й Всероссийской микроволновой конференции. 2018. С. 37-39. Москва. (0,19 п.л. / 0,09 п.л.)

13. Пропастин А.А., Русов Ю.С. Анализ матрицы рассеяния последовательного делителя мощности с учетом характеристик его составных частей // Труды 6-й Всероссийской микроволновой конференции. 2018. С. 34-36. Москва. (0,17 п.л. / 0,08 п.л.)

14. Русов Ю.С., Пропастин А.А. Исследование синтеза секторной диаграммы направленности методом разложения по нечетным функциям Матье // СВЧ-

техника и телекоммуникационные технологии. 2020. №1-2. С. 176-177. Крым. (0,11 п.л. / 0,05 п.л.)

15. Русов Ю.С., Пропастин А.А. Анализ матрицы рассеяния четырехщелевого волноводного направленного ответвителя // Сборник трудов XXVIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». 2022. Т. 4. С. 364-372. Воронеж. (1,51 п.л. / 0,7 п.л.)

16. Русов Ю.С., Пропастин А.А. Формирование разностной диаграммы направленности многоэлементного излучателя с помощью однокаскадной шахматной схемы возбуждения // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: Сборник трудов XX Международной научно-практической конференции. 2023. С. 394-397. Махачкала. (0,46 п.л. / 0,2 п.л.)