

На правах рукописи



Люлюкин Константин Викторович

**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ НИЗКОПРОФИЛЬНЫЕ ПЕЧАТНЫЕ
ИЗЛУЧАТЕЛИ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК
С ШИРОКОУГОЛЬНЫМ СЕКТОРОМ СКАНИРОВАНИЯ ЛУЧА**

Специальность 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискания ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

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

Научный руководитель: **Чернышев Сергей Леонидович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем и устройств МГТУ им. Н.Э. Баумана

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: **ПАО «Радиофизика»**

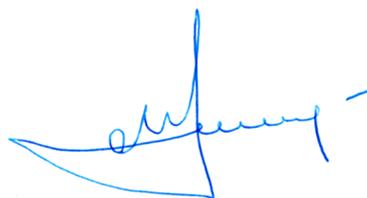
Защита диссертации состоится 1 июня 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.331.03 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <https://www.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 «___» _____ 2023 г.

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



М.В. Родин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в системах связи и радиолокации преобладают направления, связанные с увеличением скорости передачи данных, миниатюризации аппаратуры, а также высокой скорости перестройки и адаптации. В свою очередь, это ведет к развитию и модернизации антенных систем, направленных на расширение полосы рабочих частот и достижение минимальных потерь в антенной системе, а также обеспечению наилучшего согласования антенны с питающим трактом, в том числе и при широкоугольном электрическом сканировании луча в случае применения фазированных антенных решеток (ФАР).

Одним из наиболее привлекательных вариантов с точки зрения простоты производства, массогабаритных характеристик, низкого профиля (высота менее $0,1$ длины волны в свободном пространстве), а также невысокой стоимости является применение печатных излучателей. Однако низкопрофильные печатные излучатели наиболее простых форм обладают недостатками, среди которых одним из важнейших является узкая полоса рабочих частот. Однако имеются способы расширения полосы рабочих частот. Наиболее простой из них – это применение более толстых диэлектрических подложек. Однако указанный способ имеет значительные ограничения к применению при проектировании элементов ФАР. Во многом это обусловлено тем, что с увеличением электрической толщины подложки усиливаются эффекты, связанные с возбуждением поверхностных волн экранированной плоскостной структуры, в результате чего значительно возрастают коэффициенты связи между излучателями ФАР. Проявление данного эффекта приводит к рассогласованию излучателей, снижению коэффициента усиления (КУ), а в отдельных случаях – к «ослепению» ФАР при сканировании, то есть к значительному падению КУ по основной поляризации в направлении сканирования луча, которое может быть обусловлено как рассогласованием, так и изменением поляризационной структуры излучаемых волн.

Расширение рабочей полосы частот печатных излучателей также возможно и при помощи различных вариантов модификации топологии излучателя. Однако возможности внесения изменений в топологию ограничиваются технологическими возможностями современных производств, такими как минимально достижимые в процессе травления печатной платы величины зазоров и ширины проводников топологии.

Таким образом, задача исследования и разработки низкопрофильных широкополосных элементов печатных ФАР является актуальной и включает в себя необходимость проведения ряда теоретических исследований и нахождения компромиссных решений, которые одновременно позволят обеспечить широкую рабочую полосу частот и широкий сектор углов электрического сканирования луча.

Наибольший вклад в исследовательские работы в области низкопрофильных излучателей ФАР и их взаимного влияния среди российских

ученых внесли Воскресенский Д.И., Гринев А.Ю., Волков А.П., Овчинникова Е.В. и другие, а среди зарубежных – Kumar G., Ray K.P., Awida M.H., Zavosh F., Rahmat-Samii Y., Caloz C., Itoh T. и другие.

Неотъемлемой частью разработки и исследования характеристик печатных излучателей с конструктивными элементами, отличающимися от классических конструкций и топологий, в последнее время стало применение численных методов расчета. Они с успехом применяются в таких коммерческих продуктах, как Ansys electronics desktop (HFSS), CST Studio Suite, Altair Feko, Keysight EMPro и других. Однако их доступность достаточно ограничена в силу высокой стоимости. Также можно отметить отсутствие альтернативных программных продуктов, разработанных на территории РФ и обеспечивающих аналогичный функционал. Поэтому еще одной актуальной задачей является разработка приближенных методик оценки электрических характеристик печатных излучателей ФАР, результаты которых могут быть применены как самостоятельно, так и в качестве первичных приближений для построения сложных электродинамических моделей.

Объектом исследования работы являются низкопрофильные широкополосные печатные излучатели ФАР с широкоугольным сектором сканирования луча.

Предмет исследования – геометрические и электрические параметры, а также конструктивная реализация низкопрофильных печатных излучателей ФАР, определяющие характеристики согласования и излучения в требуемой полосе частот и в заданном секторе углов сканирования луча, методы электродинамического анализа излучателей.

Цель работы – исследование и разработка широкополосных низкопрофильных печатных излучателей ФАР с широкоугольным сектором сканирования луча.

В работе поставлены и решаются следующие **задачи**.

1. Создание конструктивно простого и технологичного низкопрофильного печатного широкополосного излучающего элемента ФАР, позволяющего работать в широком секторе углов сканирования луча.

2. Исследование возможности дальнейшего уменьшения взаимной связи излучателей и улучшение электрических характеристик при сканировании луча за счет введения резонансных структур, обладающих запрещенной зоной в полосе рабочих частот, в ячейку решетки.

3. Разработка методики проектирования печатных микрополосковых излучателей ФАР и расчета их электрических характеристик при введении резонансных структур, обладающих запрещенной зоной в полосе рабочих частот, в ячейку решетки.

4. Внедрение разработанных конструкций при создании ФАР с низкопрофильными печатными излучателями.

Методы исследования. При электродинамическом моделировании широкополосных печатных микрополосковых излучателей, предназначенных для использования в составе ФАР, применяется принцип декомпозиции. Решается задача о собственных волнах поперечного сечения элементарной

ячейки в канале Флоке. Производится процедура сшивания полей в указанном сечении элементарной ячейки с учетом периодических граничных условий. Также проводится полноволновое электродинамическое моделирование в частотной области методом конечных элементов, что позволяет наиболее точно определить электрические характеристики и учесть большинство факторов, влияющих на них, таких как потери в материалах и возможная анизотропия диэлектрической подложки.

Научная новизна диссертационной работы определяется следующими полученными в ней оригинальными результатами.

1. Предложена методика проектирования печатных микрополосковых излучателей ФАР при введении малоэлементной резонансной структуры в состав элементарной ячейки для снижения взаимных связей излучателей в Е-плоскости, расположенных на модифицированном проводящем основании.

2. Впервые проведены теоретические и экспериментальные исследования низкопрофильных широкополосных печатных излучателей, расположенных над полостью в основании в составе ФАР при введении в межэлементное пространство малоэлементной резонансной структуры, обладающей запрещенной зоной и расположенной в одном слое с излучателями, в плоскости наибольшей связи между излучателями.

3. Проведено исследование пространственно-частотных характеристик коэффициентов связи элементов ФАР и обоснован выбор числа колец окружающих элементов, требуемых для экспериментальных исследований элемента ФАР.

Теоретическая значимость исследования заключается в получении новых научных результатов в части решения задачи о собственных волнах поперечного сечения элементарной ячейки излучателя с введенной резонансной структурой в канале Флоке и последующей процедуры сшивания полей в сечении элементарной ячейки ФАР.

Практическая значимость полученных результатов исследования определяется следующими пунктами:

1. На основе решения задачи о собственных волнах поперечного сечения элементарной ячейки излучателя разработана программа для расчета электрических характеристик заданной геометрии излучателя в составе ФАР.

2. С использованием результатов решения задачи о собственных волнах поперечного сечения элементарной ячейки излучателя предложена методика разработки печатного микрополоскового элемента ФАР, содержащего печатный излучатель над полостью в проводящем основании и малоэлементную резонансную структуру в плоскости наибольшей связи между излучателями.

3. Предложена новая конструкция низкопрофильных печатных микрополосковых излучателей, обеспечивающих работу широкополосной ФАР с широкоугольным сектором сканирования луча.

4. Разработаны и экспериментально исследованы макеты печатных микрополосковых излучателей, обеспечивающих относительную ширину

полосы рабочих частот не менее 12% в коническом секторе углов сканирования луча $\pm 45^\circ$ по критерию потерь на отражение не превышающих минус 1 дБ.

5. Развита методика по измерению макетных образцов, позволяющая учесть наличие краевых эффектов в малоэлементной макете и минимизировать их влияние для подтверждения электрических характеристик печатного микрополоскового излучателя, соответствующего расположению в многоэлементной решетке.

6. Разработанные излучатели вошли в состав модульных активных фазированных антенных решеток (АФАР), разработанных в ходе проведения ряда СЧ НИР и СЧ ОКР в Научно-исследовательском институте радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждено актом о внедрении.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов анализа характеристик печатных микрополосковых излучателей ФАР подтверждается:

– исследованием сходимости численного решения в зависимости от числа базисных функций;

– сравнением с результатами решения тестовых задач, результаты которых приведены в открытых источниках;

– сравнением с результатами решения тестовых задач, результаты которых получены путем полноволнового электродинамического моделирования методом конечных элементов в частотной области;

– сравнением результатов моделирования печатных микрополосковых излучателей ФАР с результатами экспериментальных исследований;

– сравнением рассчитанных и экспериментально измеренных характеристик ФАР в составе изделий, разработанных в ходе выполнения СЧ НИР и СЧ ОКР в Научно-исследовательском институте радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность результатов, полученных при экспериментальных исследованиях макетов фрагментов раскрытия антенного полотна (АП) и рабочих изделий, обеспечивается использованием аттестованных измерительных приборов и стендов, проведением измерений диаграмм направленности фрагмента раскрытия АП в безэховой камере и всего раскрытия модульных АФАР в коллиматоре и в условиях полигонов.

Апробация результатов работы. Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на XI Всероссийской научно-технической конференции, организованной МГТУ им. Н.Э. Баумана, с. Небуг, 2015 г.; 25-й и 26-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2014 и 2015 гг.; Всероссийской научно-технической конференции «Антенны и распространение радиоволн», Санкт-Петербург, 2018 г.; Международных конференциях Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2017 и 2019 гг.

Публикации. Содержание диссертации отражено в 9 научных работах, из них 2 работы опубликованы в рецензируемых журналах и изданиях,

рекомендованных ВАК РФ, и 3 работы в изданиях, индексируемых базой Scopus.

Внедрение результатов диссертационной работы. Результаты теоретических исследований, разработанные электродинамические модели, методики и результаты расчетов, разработанные новые конструкции печатных микрополосковых излучателей ФАР, макеты фрагментов раскрывов антенных полотен ФАР, полученные при выполнении диссертационной работы, реализованы в Научно-исследовательском институте радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Разработанные излучатели применены в модульных АФАР с распределенным твердотельным приемо-передатчиком, разработанных в ходе выполнения ряда СЧ НИР и СЧ ОКР. Изделиям МРЛО-1 ВЦ и МРЛО-2 ВЦ в 2018 г. присвоена литера О₁. В 2021 г. принято решение о постановке МРЛО-1 ВЦ и МРЛО-2 ВЦ в составе изделия 9С932М на снабжение Вооруженных Сил РФ. По результатам работы Люлюкину К.В. согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 01.11.2021 г. №3104-р присуждена премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых и присвоено почетное звание лауреата премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых.

Личный вклад автора. В процессе работы над диссертацией автором лично и при непосредственном участии:

– разработана программа для расчета электрических характеристик заданной геометрии печатного микрополоскового излучателя в составе ФАР и при наличии резонансной структуры в межэлементном пространстве на основе решения задачи о собственных волнах сечения элементарной ячейки в канале Флоке и последующей процедуры сшивания полей в указанном сечении элементарной ячейки;

– предложена методика разработки печатного микрополоскового излучателя ФАР над полостью в проводящем основании и при наличии резонансной структуры в плоскости наибольшей связи между излучателями с применением разработанной программы;

– предложена и исследована новая низкопрофильная конструкция печатных микрополосковых излучателей, обеспечивающих работу широкополосной ФАР в коническом секторе углов сканирования луча не менее 90° и относительной полосой рабочих частот не менее 12% по критерию потерь на отражение не превышающих минус 1 дБ;

– развит подход по измерению макетных образцов, позволяющий учесть наличие краевых эффектов в малоэлементном макете и минимизировать их влияние для подтверждения электрических характеристик разработанного элемента ФАР;

– проведены экспериментальные исследования макетов фрагментов раскрыва ФАР и проведено сравнение экспериментальных и расчетных электрических характеристик в диапазоне рабочих частот и углов сканирования луча;

– проведено внедрение разработанных элементов раскрывов ФАР в ряде макетных образцов, разработанных в Научно-исследовательском институте радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках проведения СЧ НИР и СЧ ОКР.

На защиту выносятся следующие основные положения.

1. Использование печатных излучателей с модифицированной топологией и полостями в проводящем основании под излучателями позволяет создавать ФАР, работающие в широкой полосе частот и широком секторе углов сканирования луча, при этом обеспечивая малые массогабаритные характеристики, а также простоту и технологичность конструкции.

2. Введение резонансной структуры, обладающей запрещенной зоной в рабочей полосе частот, в свободное пространство между широкополосными печатными излучателями ФАР приводит к снижению взаимного влияния между элементами, что позволяет улучшить согласование излучателей с питающей линией и работать в более широком секторе углов сканирования луча при сохранении уровня коэффициента отражения.

3. Применение предложенной методики разработки печатного микрополоскового элемента ФАР позволяет последовательно разрабатывать и исследовать характеристики микрополоскового излучателя и малоэлементной резонансной структуры, расположенной в плоскости наибольшей связи между излучателями, а также проводить быструю оценку электрических характеристик в сечении элементарной ячейки и использовать полученные данные как первичное приближение в процессе разработки печатных излучателей с более сложной топологией.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует специальности 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии. Полученные в ней результаты соответствуют паспорту специальности по следующим пунктам: п. 1 «Решение внешних и внутренних дифракционных задач электродинамики для анализа и синтеза высокоэффективных антенн и микроволновых устройств, определения их предельно-достижимых характеристик, возможных путей построения и т. д.»; п. 2 «Исследование характеристик антенн и микроволновых устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т. д.»; п.3 «Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных микроволновых устройств, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами».

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы включает в себя введение, четыре главы, выводы по проведенной работе, заключение и список источников. Работа состоит из 147 страниц машинописного текста и содержит 96 рисунков и 4 таблицы. Список источников насчитывает 80 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель работы, а также задачи исследования, которые необходимо решить для разработки широкополосных низкопрофильных печатных излучателей ФАР с широкоугольным сканированием луча. Показана научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Приведены сведения об апробации основных результатов диссертационной работы, её структуре и внедрении результатов. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведены аналитический обзор и постановка задачи исследования широкополосных низкопрофильных печатных излучателей ФАР. В частности, проведен обзор и анализ современных решений построения низкопрофильных широкополосных ФАР с широким сектором углов электрического сканирования луча. Рассмотрены преимущества и недостатки низкопрофильных печатных излучателей.

Отмечено, что для расширения рабочей полосы частот низкопрофильных излучателей возможно применение более толстых диэлектрических оснований и модификации топологии, а также проводящего основания. Однако с увеличением электрической толщины подложки усиливаются эффекты, связанные с возбуждением поверхностных волн экранированной плоскостойкой структуры, в результате чего значительно возрастают коэффициенты связи между излучателями ФАР. Проявление данного эффекта приводит к рассогласованию излучателей, снижению коэффициента усиления (КУ), а в отдельных случаях – к «ослепленю» ФАР при сканировании, то есть к значительному падению КУ по основной поляризации в направлении сканирования луча, которое может быть обусловлено как рассогласованием, так и изменением поляризационной структуры излучаемых волн.

Для снижения эффектов, связанных с возбуждением поверхностных волн, проведен обзор и выбор методов снижения взаимного влияния элементов низкопрофильных малогабаритных печатных излучателей ФАР с широким угловым сектором электрического сканирования луча.

Отмечено, что решение задачи требует глубоких теоретических и экспериментальных исследований различных методов и приемов проектирования печатных излучателей для обеспечения их работы в составе ФАР с широким сектором углов сканирования луча и в широкой полосе частот. Кроме того, её решение должно сводиться к поиску компромиссу по совокупности таких критериев, как обеспечение наилучшего согласования излучателя с линией питания во всём секторе углов электрического сканирования луча в рабочей полосе частот, простоты конструкции, технологии производства и сборки антенного полотна, минимизации массогабаритных характеристик, а также, по возможности, стоимости конечного изделия. Совокупность всех перечисленных критериев делает поставленную задачу сложной и требующей комплексного исследования.

Сформулирована цель проводимой работы – добиться наилучших электрических характеристик низкопрофильных печатных излучателей в составе ФАР С-диапазона частот при обеспечении относительной ширины полосы рабочих частот не менее 10% и конического сектора углов сканирования луча не менее 80° по критерию потерь на отражение не более 1 дБ, при этом обеспечив технологичность и простоту конструкции. Рассмотреть и исследовать возможность обеспечения работы ФАР в коническом секторе углов сканирования луча до 90° при сохранении сетки расположения излучателей.

Во второй главе разработана методика оценки электрических характеристик низкопрофильного печатного излучателя над полостью в основании с расположенной в межэлементном пространстве малоэлементной резонансной структурой. Предложено применение двухрезонансного печатного излучателя над полостью в основании и малоэлементной резонансной структуры в плоскости топологии излучателя (рис. 1, а). Упрощенная методика определения электрических характеристик рассматриваемого печатного излучателя сводится к решению задачи в поперечном сечении элементарной ячейки (Рис. 1, б).

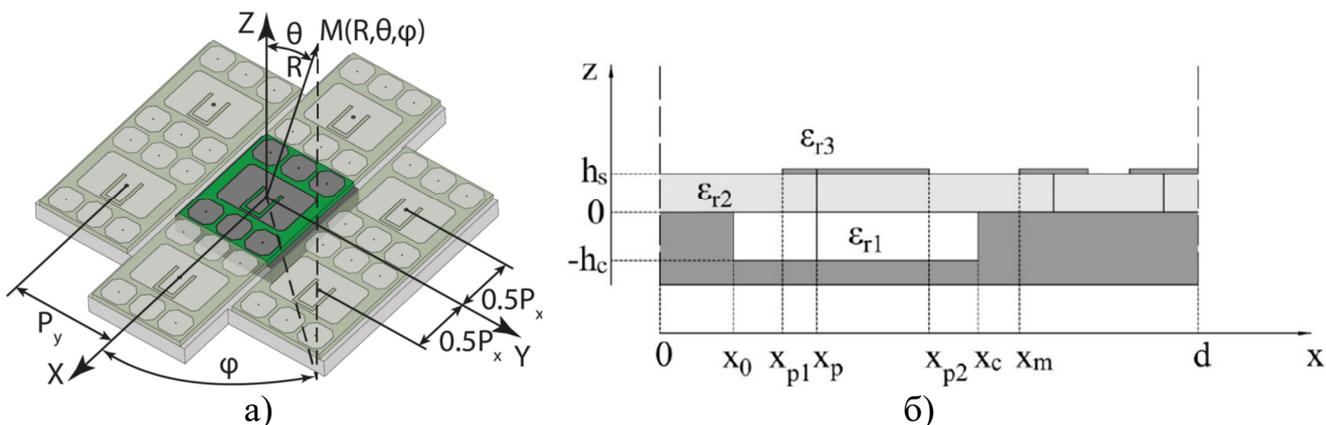


Рис. 1. Элементарная ячейка в решетке излучателей

Разработанная методика оценки электрических характеристик печатного микрополоскового излучателя включает в себя два этапа:

1. Решение задачи распределения токов вдоль элементарной ячейки (построение цепной модели, показанной на Рис. 2).

2. Определение полей в элементарной ячейке с применением рассчитанного распределения токов.

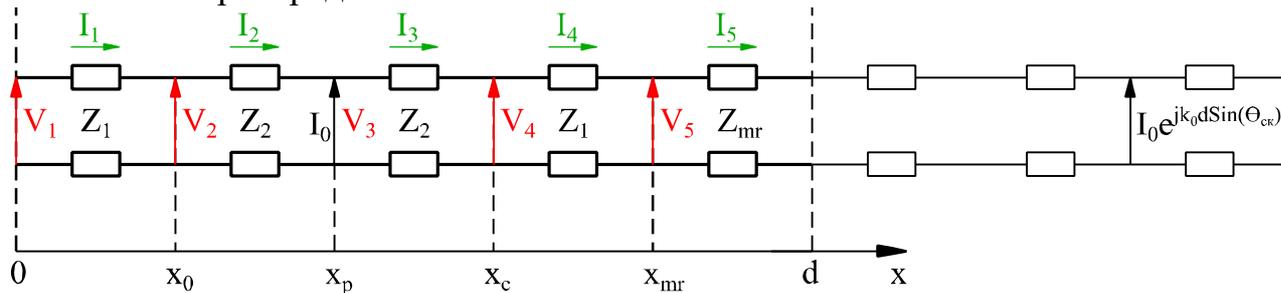


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема элементарной ячейки

В соответствии со схемой (Рис. 2) записываются и решаются выражения для напряжений и токов с учетом наличия периодических граничных условий. В результате, найдя неизвестные амплитуды падающих и отраженных волн V_i^+ и V_i^- , можно найти распределение тока вдоль оси x , подставив найденные значения соответствующих амплитуд в (1).

$$I(x) = \begin{cases} \frac{V_1^+}{Z_1} e^{-jk_1 x} - \frac{V_1^-}{Z_1} e^{jk_1 x}, & 0 \leq x < x_0, \\ \frac{V_2^+}{Z_2} e^{-jk_2(x-x_0)} - \frac{V_2^-}{Z_2} e^{jk_2(x-x_0)}, & x_0 \leq x < x_p, \\ \frac{V_3^+}{Z_2} e^{-jk_2(x-x_p)} - \frac{V_3^-}{Z_2} e^{jk_2(x-x_p)}, & x_p \leq x < x_c, \\ \frac{V_4^+}{Z_1} e^{-jk_1(x-x_c)} - \frac{V_4^-}{Z_1} e^{jk_1(x-x_c)}, & x_c \leq x < x_{mr}, \\ \frac{V_5^+}{Z_{mr}} e^{-jk_{mr}(x-x_{mr})} - \frac{V_5^-}{Z_{mr}} e^{jk_{mr}(x-x_{mr})}, & x_{mr} \leq x \leq d. \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, показан способ расчета распределения токов вдоль элементарной ячейки излучателя.

Проблема нахождения электромагнитных полей печатного излучателя над полостью в основании сводится к задаче определения собственных волн в каждой из трех областей (Рис. 3) и сшиванию полей на стыках областей с учетом распределения токов вдоль элементарной ячейки, найденных ранее с учетом периодических граничных условий.



Рис. 3. Элементарная ячейка для решения проблемы излучения печатного излучателя над полостью в основании

Для области I записываются выражения для E и H составляющих поля, как собственные волны прямоугольного волновода:

$$E_x^I(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n \Phi_n(x) \sin(\beta_n(z + h_c)), \quad (2)$$

$$H_y^I(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} jv_n y_n \Phi_n(x) \cos(\beta_n(z + h_c)). \quad (3)$$

Для области II компоненты поля E и H записываются путем разложения их в базис Флоке в виде следующих выражений:

$$E_x^{II}(x, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left(V_m^+ e^{-j\xi_m z} + V_m^- e^{j\xi_m z} \right) \Psi_m(x), \quad (4)$$

$$H_y^{II}(x, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left(V_m^+ e^{-j\xi_m z} - V_m^- e^{j\xi_m z} \right) Y_m \Psi_m(x). \quad (5)$$

Для области III также записываются компоненты поля E и H, используя разложение по базису Флоке, в виде следующих выражений:

$$E_x^{III}(x, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} U_m e^{-j\gamma_m z} \Psi_m(x), \quad (6)$$

$$H_x^{III}(x, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} U_m e^{-j\gamma_m z} Y_m \Psi_m(x). \quad (7)$$

Далее проводится процедура сшивания полей по сечениям $z = 0$ (апертура 1) и $z = h_s$ (апертура 2), с учетом того, что структура элементарной ячейки не симметрична. В результате рассчитываются неизвестные коэффициенты связи, а затем и составляющие поля с учетом найденного ранее распределения токов вдоль элементарной ячейки излучателя.

Активное сопротивление печатного излучателя, расположенного над полостью в основании рассчитывается с помощью следующего выражения:

$$Z_a = -\frac{V_3^+ + V_3^-}{I_0} + \frac{1}{I_0} \left[\sum_{n=0}^{\infty} c_{g_n} v_n + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left(c_{fl_m} V_m^+ - c_{fl_m} V_m^- \right) \right], \quad (8)$$

где

$$c_{g_n} = \sqrt{\frac{2}{W_c}} \frac{n\pi}{W_c \beta_n^2} \sin\left(\frac{n\pi}{W_c}(x_p - x_0)\right), \quad (9)$$

$$c_{fl_m} = \frac{2}{\sqrt{d}} \frac{K_{xm}}{\xi_m^2} e^{-jK_{xm}x_p} \sin\left(\frac{\xi_m h_s}{2}\right) e^{-j\frac{\xi_m h_s}{2}}, \quad (10)$$

$$c_{fl_m} = \frac{2}{\sqrt{d}} \frac{K_{xm}}{\xi_m^2} e^{-jK_{xm}x_p} \sin\left(\frac{\xi_m h_s}{2}\right) e^{j\frac{\xi_m h_s}{2}}. \quad (11)$$

В выражении (8) первый член соответствует интегралу электрического поля, рассчитанного распределения токов вдоль элементарной ячейки излучателя, для падающей (V_3^+) и отраженной (V_3^-) составляющих в сечении $x = x_p$. Второй член соответствует интегралу электрического поля в области волноводных мод I (Рис. 3). Третье слагаемое представляет собой интеграл электрического поля в области II (Рис. 3), соответствующей области диэлектрической подложки печатной платы. Количество слагаемых ограничивается путем выбора числа волноводных мод в области I (Рис. 3) и числа мод Флоке в областях II и III (Рис. 3).

Модуль коэффициента отражения при отклонении луча на угол $\theta_{ск}$ вычисляется согласно выражению (12):

$$|\Gamma| = \left| \frac{Z_{in}(\theta_{ск}) - Z_{in}(0)}{Z_{in}(\theta_{ск}) + Z_{in}^*(0)} \right|. \quad (12)$$

Для проведения численного моделирования по описанной выше методике написана программа для персонального компьютера (ПК). Сравнение результатов численного моделирования, полученных с помощью разработанной методики, проведено с теоретическими данными частных случаев, приведенных в открытых источниках, а также с тестовыми моделями, рассчитанными методом конечных элементов в частотной области в Ansys electronics desktop (HFSS) (Рис. 4).

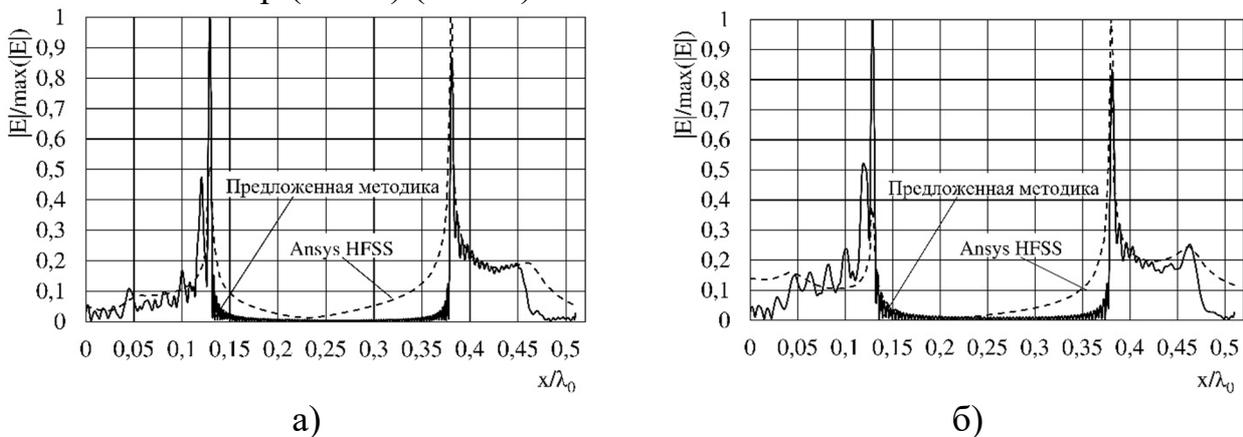


Рис. 4. Зависимости нормированного модуля напряженности электрического поля вдоль элементарной ячейки при $\theta_{ск} = 0^\circ$ (а) и $\theta_{ск} = 50^\circ$ (б)

Проверка на сходимость решения предложенной методики выполнена путем расчета модуля коэффициента отражения при не отклонённом луче в зависимости от количества базисных функций в полости под излучателем N_{wg} и количества базисных функций в канале Флоке N_{Fl} (Рис. 5). Она показала, что для расчетов минимальные значения следует выбирать не менее, чем $N_{wg} = 3$ и $N_{Fl} = 15$ соответственно.

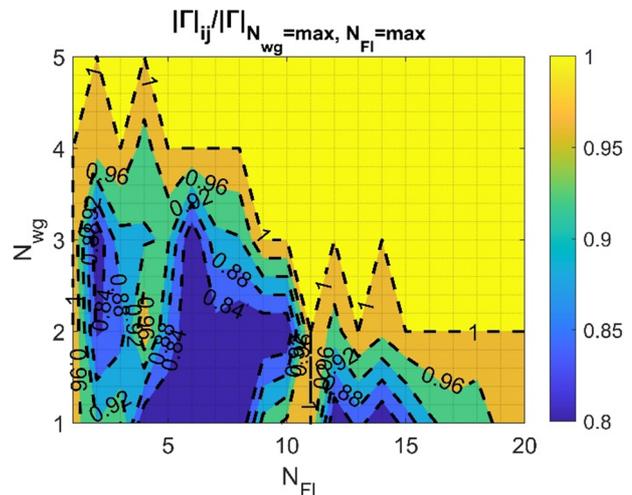


Рис. 5. Зависимость изменения модуля коэффициента отражения от количества базисных функций

В результате сделан вывод о том, что рассчитанные электрические характеристики, получаемые при применении показанной методики, а также при решении тестовых задач, как показанных в открытых источниках, так и в

системах автоматизированного проектирования (САПР), хорошо сходятся между собой.

Используя показанную методику, проведено исследование влияния (Рис. 6) наличия резонансной структуры, настроенной на резонансную частоту, соответствующую рабочей частоте f_0 , при широкоугольном сканировании луча. Показано снижение модуля коэффициента отражения на входе исследуемого излучателя элементарной ячейки ФАР при широкоугольном сканировании луча.

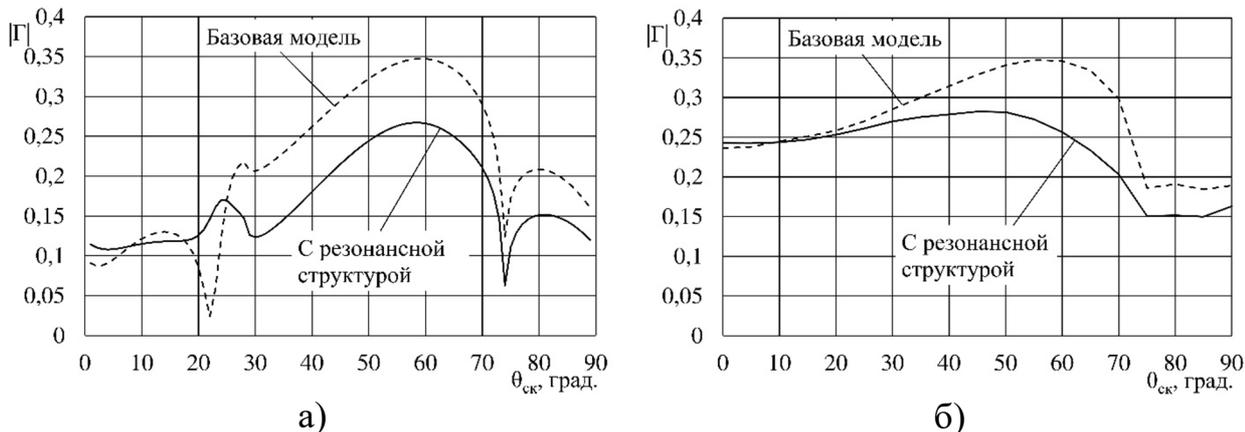


Рис. 6. Модуль коэффициента отражения при отклонении луча на угол $\theta_{ск}$, рассчитанный с использованием предложенной методики (а) и с использованием Ansys electronics desktop (HFSS) (б)

В заключении второй главы показаны варианты применения показанной методики для расчета электрических характеристик низкопрофильных печатных излучателей ФАР над полостью в проводящем основании и решение проблемы определения геометрических размеров исследуемых моделей, таких как определение ширины излучателя и положения линии запитки при заданных параметрах полости под излучателем и положения линии запитки.

В третьей главе показано развитие методики разработки антенного полотна на базе широкополосных печатных излучателей и резонансных структур с использованием полноволнового метода электродинамического моделирования. В качестве первичных приближений геометрических размеров (Рис. 7) выбраны размеры, полученные с использованием методики из главы 2.

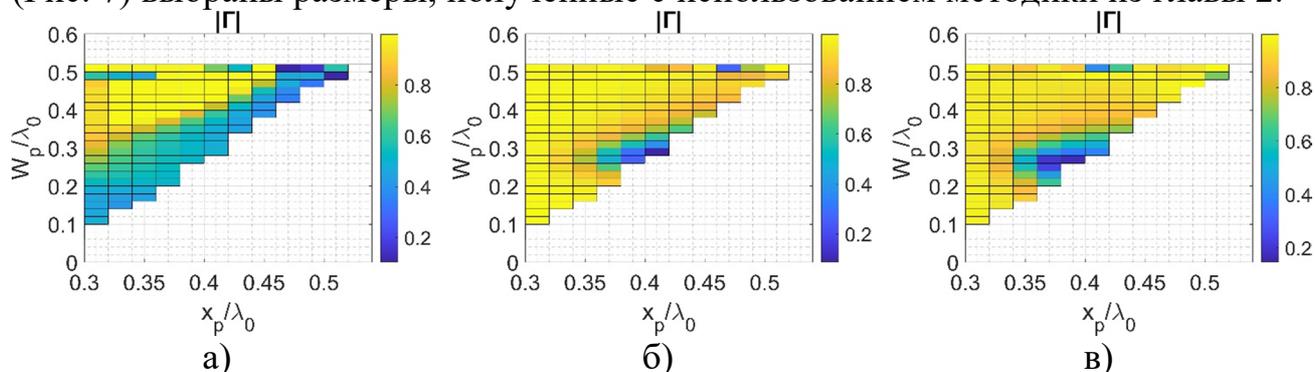


Рис. 7. Зависимости $|\Gamma|$ от ширины топологии W_p и положения линии запитки x_p при различных углах сканирования луча: $\theta_{ск} = 10^\circ$ (а), 30° (б), 50° (в)

Предложена конструкция и проведено исследование широкополосного низкопрофильного печатного излучателя ФАР с широким сектором углов сканирования луча с воздушной полостью в проводящем экране под излучателем.

Используя предложенную методику, в межэлементное пространство между излучателями введена малоэлементная резонансная структура (Рис. 8).

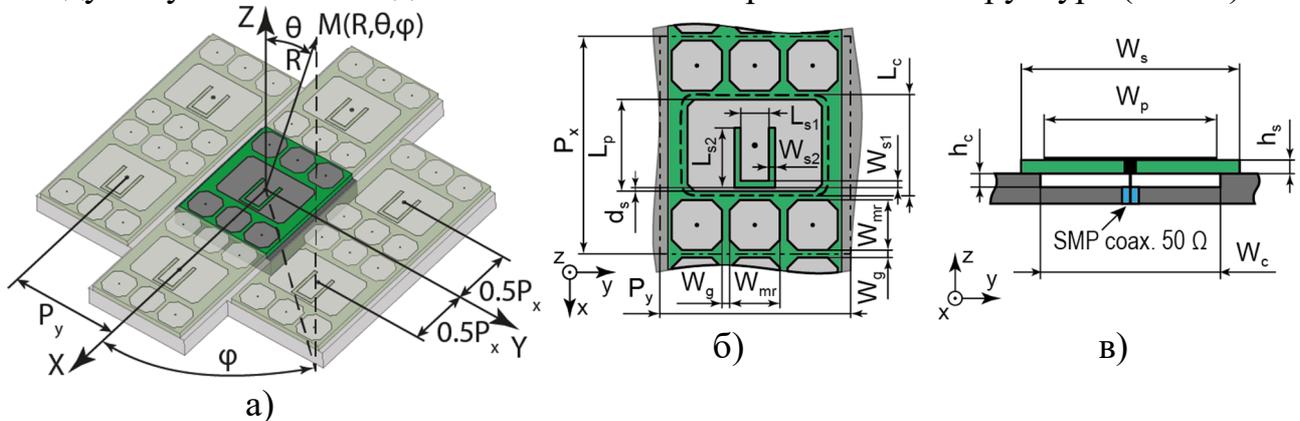


Рис. 8. Графическое представление излучающего элемента ФАР в составе периодической структуры (а), вид сверху (б), поперечное сечение (в)

Исследование характеристик взаимного влияния показало снижение коэффициентов передачи между излучателями в относительной полосе частот, составляющей 10%, не менее, чем на 5 дБ (Рис. 9).

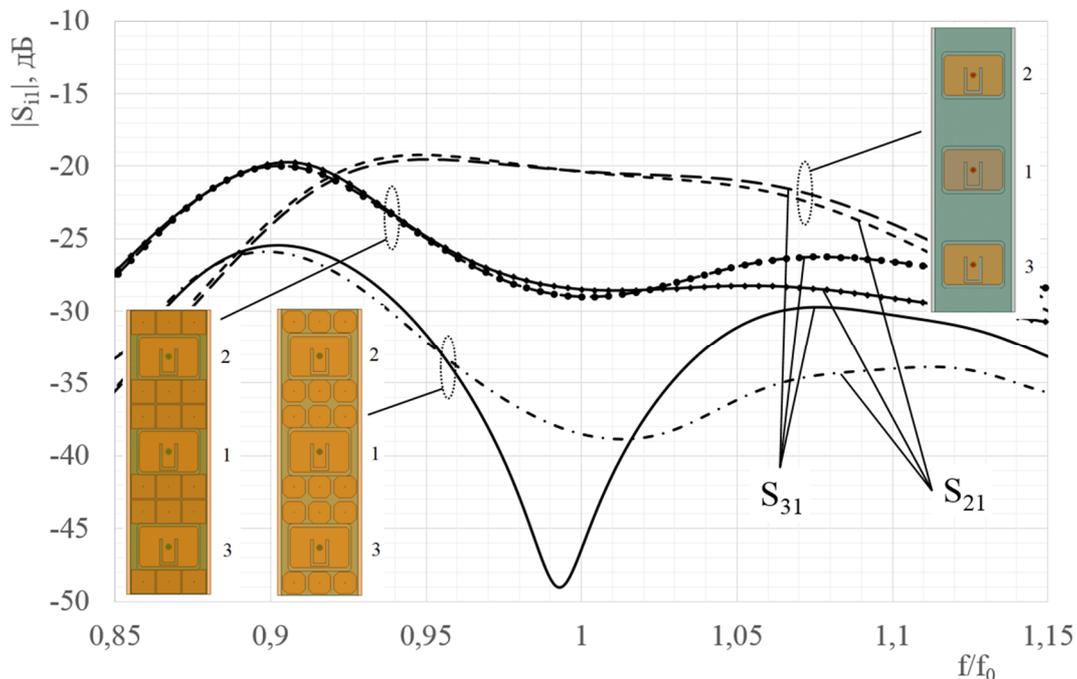


Рис. 9. Рассчитанные модули коэффициентов передачи систем из трех элементов ФАР

Оптимизация структуры излучателя ФАР в канале Флокке при введении в элементарную ячейку резонансной структуры позволила снизить значения модуля коэффициента отражения в коническом секторе углов сканирования

луча с раскрывом 80° и относительной ширине полосы рабочих частот 12% (Рис. 10).

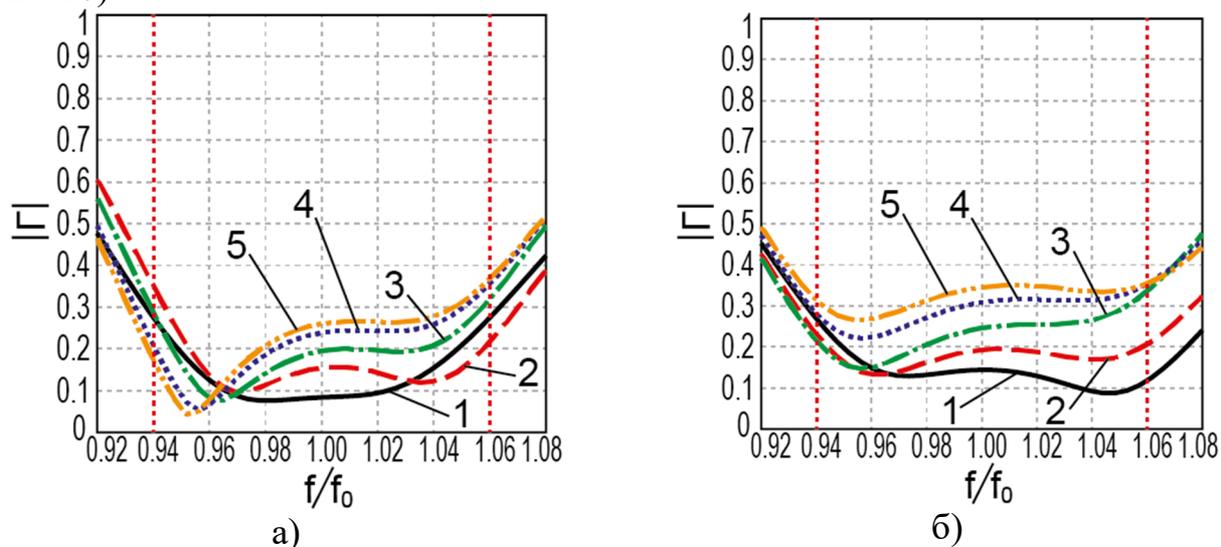


Рис. 10. Расчетный $|\Gamma|$ для ячейки с резонансной структурой (а), без резонансной структуры (б): 1 – $\theta_{\text{СК}} = 0^\circ$; 2 – $\theta_{\text{СК}} = 40^\circ$, $\varphi_{\text{СК}} = 0^\circ$; 3 – $\theta_{\text{СК}} = 40^\circ$, $\varphi_{\text{СК}} = 30^\circ$; 4 – $\theta_{\text{СК}} = 40^\circ$, $\varphi_{\text{СК}} = 60^\circ$; 5 – $\theta_{\text{СК}} = 40^\circ$, $\varphi_{\text{СК}} = 90^\circ$

В заключительной **четвертой** главе приведено обоснование выбора размеров макетного образца и разработка фрагментов ФАР широкополосных низкопрофильных печатных излучателей с широкоугольным сектором сканирования луча (Рис. 11).

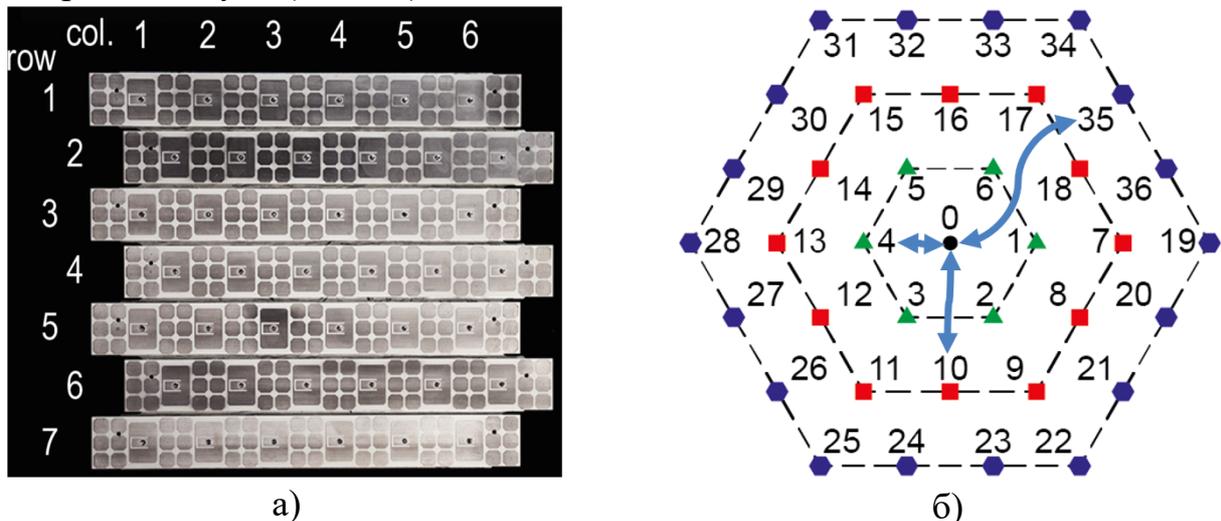


Рис. 11. Изготовленный макет фрагмента ФАР с резонансными элементами (а) и использованная нумерация элементов колец окружения (б)

Разработан измерительный стенд для экспериментальных исследований широкополосных печатных излучателей ФАР и предложена методика минимизации влияния краевых эффектов, наблюдаемых в фрагменте ФАР конечного размера в связи с дифракцией электромагнитных волн периодической структуры на его границах.

Показано высокое сходство как пространственных, так и частотных результатов теоретических и экспериментальных исследований (Рис. 12 и 13).

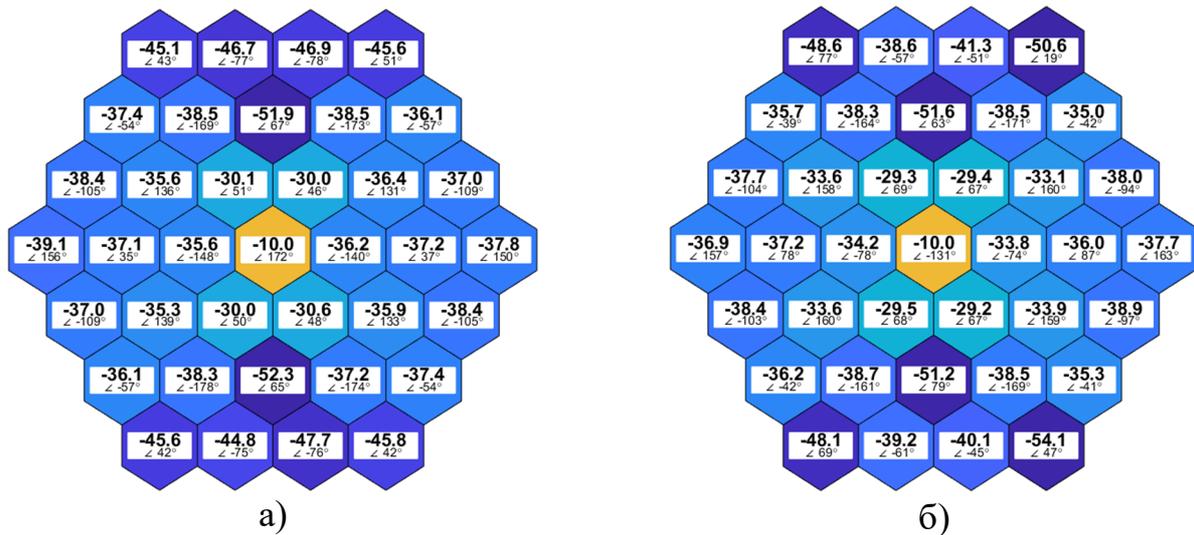


Рис. 12. Измеренные (а) и смоделированные с использованием FA-DDM (б) значения S-параметров (в дБ) и фазы (в градусах) для конфигурации 3 окружающих колец на частоте $1,05f_0$

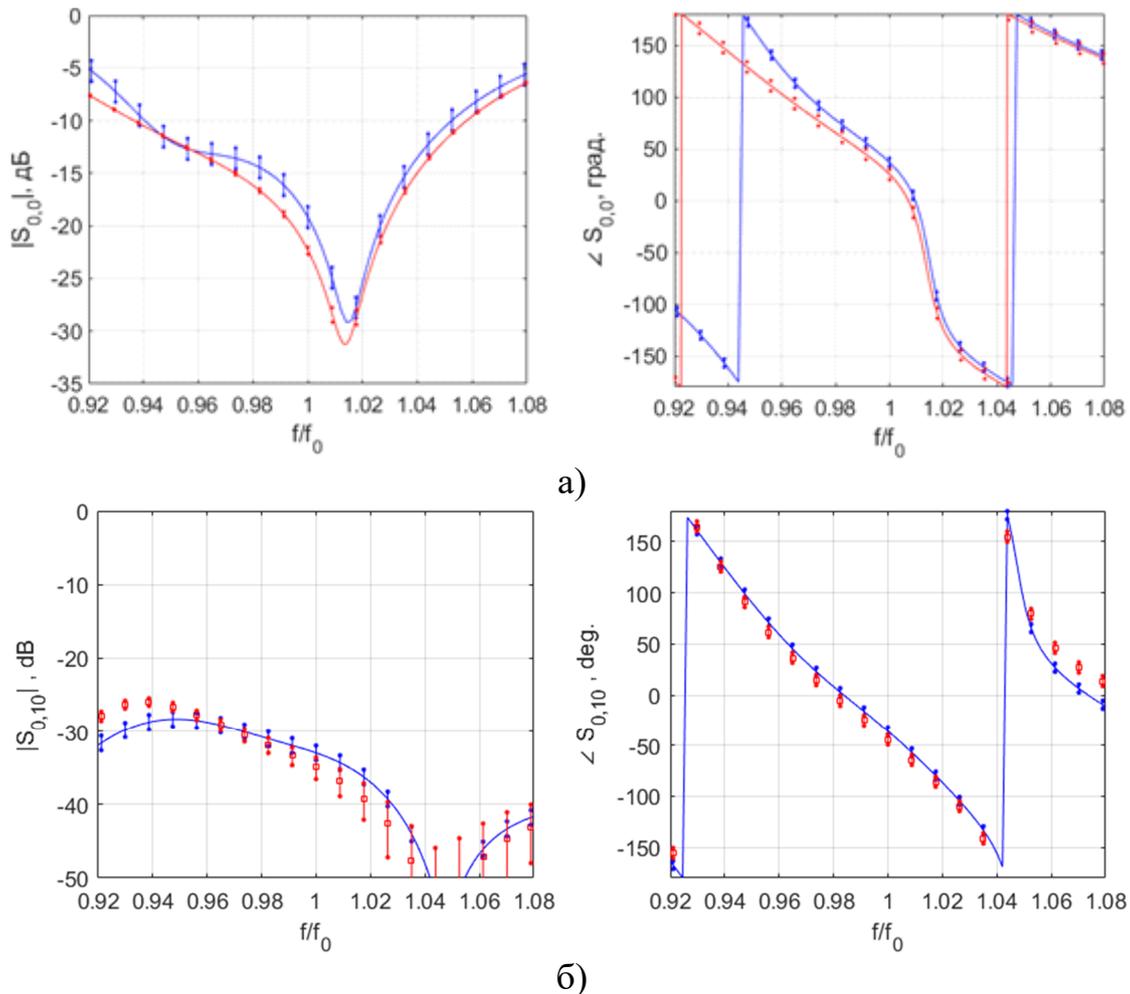


Рис. 13. Графики амплитуды (слева, дБ) и фазы (справа, град.) для: (а) $S(0,0)$, (б) $S(0,10)$, синий – данные измерений; красный – результаты моделирования

Показаны зависимости вычисленных на основе измерений и обработанных данных для максимального $|\Gamma|$ в зависимости от углов

сканирования луча (Рис. 14). Сделан вывод, что применение резонансной структуры позволяет снизить максимальный $|\Gamma|$ на углах сканирования $\theta_{ск}$ свыше 35° .

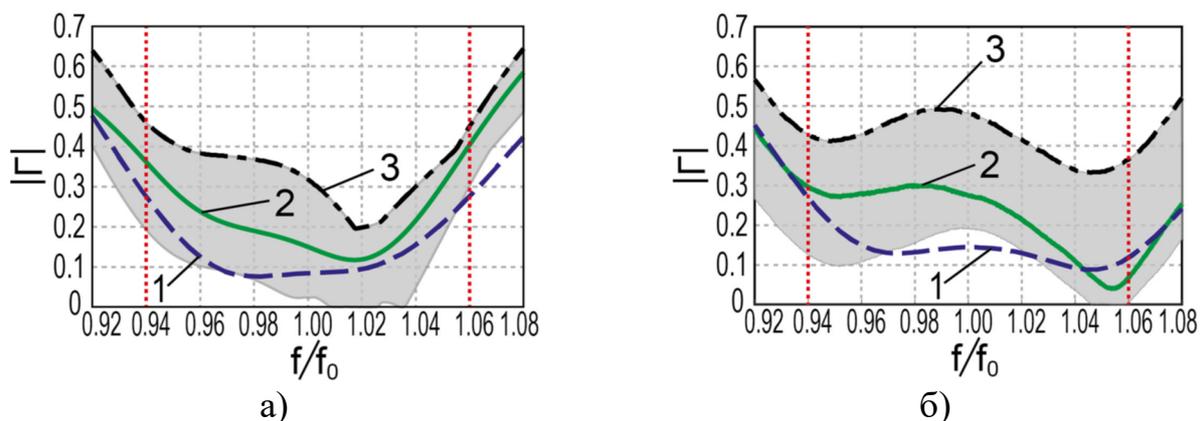


Рис. 14. Вычисленный на основе измерений $|\Gamma|$ для конического сектора сканирования лучом $\pm 40^\circ$ (серая зона) для макета с резонансной структурой (а) и без неё (б)

Отмечается, что применение резонансной структуры позволило удовлетворить критерию, по которому возвратные потери на отражение не превышают 1 дБ (КСВН не более 2,63) в относительной полосе частот 12% и коническом секторе углов сканирования луча $\pm 45^\circ$ и обеспечить простоту и технологичность конструкции.

В общих выводах и заключении приведены следующие основные результаты работы.

1. Выполненный в главе 1 обзор существующих решений и конструкций широкополосных печатных излучателей для применения в составе ФАР с широкоугольным сканированием луча подтвердил актуальность проблемы исследования и разработки новых конструктивных решений и методик разработки низкопрофильных печатных излучателей ФАР с широкоугольным сканированием луча.

2. В соответствии с поставленными задачами разработана методика, позволяющая проектировать широкополосные печатные излучатели ФАР, и предложена конструкция печатного излучателя, которая обеспечивает работу в относительной полосе частот не менее 10% и коническом секторе сканирования луча с углом раскрыва 80° по критерию возвратных потерь на отражение, не превышающих 1 дБ.

3. Развитие методики позволило вводить малоэлементную резонансную структуру в свободное пространство между излучателями в плоскости наибольшей взаимной связи между излучателями, что способствовало в относительной полосе частот не менее 12% возможности добиться расширения конического сектора сканирования лучом с 80° до 90° при сохранении критерия возвратных потерь на отражение, не превышающих 1 дБ (КСВН не более 2,63) при минимальном изменении конструктива раскрыва полотна антенной решетки. При этом имеется запас расширения конического

сектора сканирования лучом до 100° , обусловленный теоретическим пределом, связанным с геометрией расположения излучателей.

4. Разработана методика измерений фрагментов раскрыва антенного полотна, позволившая минимизировать эффекты, связанные с конечностью размеров макетных образцов, и подтвердить на практике полученные в главе 3 теоретические данные.

5. Разработанные печатные излучатели обладают простотой конструкции и сборки, а применение воздушной полости под излучателем позволяет создавать раскрывы ФАР с толщиной $0,06\lambda_0$ без учета несущих конструкций, где λ_0 – длина волны в свободном пространстве на частоте f_0 , что подтверждается экспериментальными исследованиями.

В качестве дальнейшего пути развития обозначено усовершенствование математического аппарата, применяемого в диссертации в главе 2, который позволит проводить многопараметрическую оптимизацию по заданным критериям, а также переход от расчетов в сечении ячейки Флоке к полноценному трехмерному электродинамическому моделированию с учетом особенностей топологии излучателя.

Результаты теоретических исследований, разработанные электродинамические модели, методики и результаты расчетов, разработанные новые конструкции печатных микрополосковых излучателей ФАР, макеты фрагментов раскрывов антенных полотен ФАР, полученные при выполнении диссертационной работы, реализованы в Научно-исследовательском институте радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Изделиям МРЛО-1 ВЦ и МРЛО-2 ВЦ в 2018 г. присвоена литера О₁. В 2021 г. принято решение о постановке МРЛО-1 ВЦ и МРЛО-2 ВЦ в составе изделия 9С932М на снабжение Вооруженных Сил РФ. По результатам работы Люлюкину К.В. присуждена премия Правительства Российской Федерации 2021 г. в области науки и техники для молодых ученых и присвоено почетное звание лауреата премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых.

Основные публикации по теме диссертации

1. Lyulyukin K.V., Vilenskiy A.R., Litun V.I. Wideband Beam Steering Antenna Array of Printed Cavity-backed Elements with Integrated EBG Structure // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2019. № 2. P. 245-249. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2888487. (1,4 п.л./0,65 п.л.)

2. Широкополосный печатный элемент антенной решетки с воздушной полостью в экране / К.В. Люлюкин [и др.] // Антенны. 2017. № 9. С. 13-25. (2,91 п.л./1,35 п.л.)

3. Низкопрофильный широкополосный излучатель фазированной антенной решетки с широкоугольным сканированием луча / К.В. Люлюкин [и др.] // Антенны. 2022. № 6. С. 45-54. (2,21 п.л./1,8 п.л.)

4. Beam steering performance of wideband cavity-backed patch antenna array element / K.V. Lyulyukin [et al.] // 2017 Progress in Electromagnetics Research

Symposium-Spring (PIERS). 2017. P. 3340-3346. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262334. (0,7 п.л./0,3 п.л.)

5. Experimental Study of a Low-profile Wideband Antenna Array Unit Cell with Integrated EBG Structure / K.V. Lyulyukin [et al.] // 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS-Spring). 2019. P. 1378-1382. DOI: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017437. (0,58 п.л./0,2 п.л.)

6. Низкопрофильный излучатель широкополосной антенной решётки с пониженными межэлементными связями / К.В. Люлюкин [и др.] // Антенны и распространение радиоволн. 2018. С. 22-25. (0,47 п.л./0,25 п.л.)

7. Уменьшение взаимного влияния широкополосных излучателей фазированной антенной решетки введением резонансной структуры / К.В. Люлюкин [и др.] // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016). 2016. С. 995-1001. (0,81 п.л./0,25 п.л.)

8. Люлюкин К.В., Литун В.И., Рогозин А.А. Широкополосный печатный излучатель фазированной антенной решетки с полостью в металлическом основании // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015). 2015. С. 457-458. (0,23 п.л./0,12 п.л.)

9. Люлюкин К.В., Литун В.И., Рогозин А.А. Широкополосный печатный излучатель фазированной антенной решетки с полостью в металлическом основании // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015). 2015. С. 457-458. (1,16 п.л./0,7 п.л.)