

УДК 621.396.677

На правах рукописи

Русов Юрий Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИЗЛУЧАЮЩИХ СИСТЕМ
ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ВОЛНОВОДНО-
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ И
МОНОИМПУЛЬСНЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ
ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Крехтунов Владимир Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
начальник НИО
ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей»
Кашин Валерий Акимович

кандидат технических наук, доцент,
член совета директоров
группы компаний «Мультинет»
Авдеев Сергей Михайлович

Ведущая организация: ОАО «Завод Магнетон»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 7 февраля 2013 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.11 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому сек диссертационного совета Д 212.141.11.

Автореферат разослан «25» декабря 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.11
доктор технических наук, профессор



И.Б. Б.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2015665

Русов Ю.С. Исследование и

Актуальность темы. Фазированные антенные решетки (ФАР) в настоящее время являются основным типом антенн с электрическим сканированием луча и широко используются в современных радиотехнических системах. Анализ тенденций развития ФАР показывает, что и в настоящее время актуальна задача разработки элементной базы, в том числе излучателей, интегрированных элементов и облучателей. В интегрированных элементах волноводных ФАР диапазонов сантиметровых и миллиметровых волн широко используются волноводно-диэлектрические излучатели (ВДИ). На согласование ВДИ со свободным пространством влияют не только материал и размеры диэлектрических стержней, но также и расположение проводящего экрана относительно раскрыва антенной решетки (АР). В известных рассмотренных в главе 1 источниках уделено недостаточно внимания исследованию влияния проводящего экрана на согласование решетки ВДИ. Поэтому в настоящее время актуальна задача расчета характеристик решеток ВДИ с учетом расположения общего проводящего экрана, а также актуальны экспериментальные исследования характеристик ВДИ в АР, позволяющие учитывать все конструктивные особенности элементов ФАР.

Для возбуждения проходных и отражательных ФАР, обеспечивающих формирование суммарных и разностных диаграмм направленности (ДН), необходимы моноимпульсные облучатели (МИО). Представленные в литературе и рассмотренные в главе 1 диссертации схемы построения и конструкции МИО не обеспечивают одновременного выполнения ряда требований, необходимых для создания современных излучающих систем ФАР: обеспечения работы в режимах приема и передачи волн с круговой поляризацией поля, высокой технологичности в изготовлении, простоты сборки и настройки, малых габаритов. Актуальны задачи разработки новых конструкций моноимпульсных облучателей, обладающих малыми габаритами и массой, высокой технологичностью и простотой сборки.

Объектом исследования диссертационной работы являются излучающие системы моноимпульсных фазированных антенных решеток диапазонов сантиметровых и миллиметровых волн с широкоугольным электрическим сканированием луча, раскрывы которых состоят из волноводно-диэлектрических излучателей и возбуждаются моноимпульсными облучателями.

Предмет исследования — параметры и конструктивное выполнение волноводно-диэлектрических излучателей, моноимпульсных облучателей, излучающей системы ФАР, определяющие коэффициент усиления ФАР в широком секторе электрического сканирования луча.

Целью работы является создание излучающих систем моноимпульсных ФАР с волноводно-диэлектрическими излучателями и пространственным возбуждением, обеспечивающих работу в режимах приема и передачи

электромагнитных волн с круговой поляризацией поля и широкоугольное электрическое сканирование луча.

В работе поставлены и решены следующие задачи.

– Постановка и решение задачи дифракции электромагнитных волн на двумерно-периодической решетке волноводно-диэлектрических излучателей. Полученное решение должно позволить провести электродинамическое моделирование излучателя с учетом расположения общего проводящего экрана относительно раскрыва антенной решетки.

– Исследование влияния расположения проводящего экрана в раскрыве ФАР на характеристики излучателя в антенной решетке. Выработка рекомендаций по выбору положения проводящего экрана, обеспечивающего хорошее согласование АР.

– Исследование влияния проводящего экрана в раскрыве ФАР на ДН излучателей в антенной решетке и на относительную долю мощности электромагнитной волны, теряемой в промежутках между элементами АР при отсутствии экрана.

– Исследование влияния размеров, формы и материала диэлектрического стержня на ДН излучателя с учетом взаимного влияния элементов в АР.

– Исследование зависимости коэффициента усиления (КУ) ВДИ в антенной решетке от длины диэлектрического стержня.

– Разработка волноводно-диэлектрических излучателей для интегрированных элементов, предназначенных для проходных и отражательных ФАР с широкоугольным электрическим сканированием луча.

– Оптимизация возбуждения излучающей системы ФАР моноимпульсным облучателем. Определение оптимальных расстояний между осями рупоров моноимпульсного облучателя.

– Анализ влияния погрешностей фазирования каналов моноимпульсного облучателя на характеристики облучаемой им ФАР. Определение допустимых погрешностей фазирования каналов МИО для обеспечения разностных ДН ФАР с заданными характеристиками.

– Разработка схем построения и новых высокотехнологичных конструкций моноимпульсных облучателей для ФАР, обеспечивающих работу в режимах приема и передачи электромагнитных волн с круговой поляризацией поля, обладающих малыми габаритами, обеспечивающих повторяемость в производстве, простоту сборки, не требующих индивидуальной настройки каждого экземпляра.

– Экспериментальное подтверждение работоспособности излучающих систем ФАР, построенных на базе разработанных устройств.

Методы исследования. Для электродинамического моделирования ВДИ в антенной решетке с учетом расположения проводящего экрана используются метод декомпозиции и метод проекционного сшивания полей. При нахождении полей собственных волн поперечно-неоднородного канала Флоке применяется метод Галеркина. Применяется также пакет прикладных программ электродинамического моделирования, использующий метод конечных

элементов. Экспериментальное исследование ДН излучателей в антенной решетке проводится с использованием фрагментов антенных решеток, содержащих от нескольких десятков до нескольких сотен элементов.

Научная новизна исследований заключается в следующем.

1. В строгой электродинамической постановке решена задача дифракции электромагнитных волн на двумерно-периодической решетке волноводно-диэлектрических излучателей, где моделирование влияния расположения проводящего экрана на характеристики решетки излучателей производится путем введения закороченных на одном конце коаксиальных волноводов, соосных с круглыми волноводами излучателей. При этом длина коаксиального волновода определяет положение проводящего экрана.

2. Исследовано влияние проводящего экрана в раскрыве АР на ДН излучателя в АР. Исследована зависимость коэффициента отражения волны в решетке ВДИ от расстояния между плоскостями проводящего экрана и раскрывов волноводов.

3. Разработана новая высокотехнологичная конструкция четырехрупорного моноимпульсного облучателя на основе деталей с высокой степенью интеграции волноводных элементов. Новизна подтверждена патентом на изобретение.

4. Разработана новая высокотехнологичная конструкция двенадцатирупорного моноимпульсного облучателя на основе деталей с высокой степенью интеграции волноводных элементов. Новизна подтверждена патентом на изобретение.

Практическая значимость результатов работы.

1. Разработана методика расчета коэффициентов отражения волн на входах волноводно-диэлектрических излучателей в антенной решетке, учитывающая расположение проводящего экрана в раскрыве ФАР и позволяющая определить положение экрана, обеспечивающее наилучшее согласование антенной решетки, что позволит улучшить характеристики излучающей системы ФАР.

2. Разработаны волноводно-диэлектрические излучатели для элементов проходных и отражательных ФАР, обеспечивающие сканирование луча в секторе углов до $2\theta_{\text{ск}} = 90^\circ \dots 120^\circ$.

3. Предложенные волноводно-диэлектрические излучатели применены в интегрированных элементах ФАР проходного типа Ку- и Ка-диапазонов волн и в элементах отражательной ФАР Ка-диапазона волн.

4. Предложенная новая конструкция четырехрупорного моноимпульсного облучателя обеспечивает работу на волнах с круговой поляризацией поля в режимах приема и передачи, проста при сборке, не требует настройки и пригодна для серийного производства.

5. Предложенная новая конструкция двенадцатирупорного моноимпульсного облучателя обеспечивает работу на волнах с круговой поляризацией поля в режимах приема и передачи, проста при сборке, не требует настройки и пригодна для серийного производства.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций.

Достоверность полученного решения задачи дифракции электромагнитных волн на решетке ВДИ следует из сравнения результатов решения тестовых задач, полученных с использованием предлагаемого решения, с результатами, полученными другими методами и приведенными в литературе, а также подтверждается результатами исследования сходимости решения и выполнением условия энергетического баланса. Достоверность решения задачи о собственных волнах поперечно-неоднородного канала Флоке также подтверждается результатами исследования сходимости и сравнением с результатами, приведенными в литературе. Достоверность результатов численного исследования влияния расположения проводящего экрана подтверждена экспериментально для фрагмента АР. Достоверность экспериментальных данных при проведении измерений диаграмм направленности ВДИ и ФАР обеспечивается соблюдением условий дальней зоны, отсутствием переотражений электромагнитных волн, использованием аттестованных измерительных стендов.

Внедрение результатов диссертационной работы. Приведенные в диссертации результаты исследований и разработок использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в НИИ Радиоэлектронной техники и НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Разработанные волноводно-диэлектрические излучатели для элементов ФАР и моноимпульсные облучатели внедрены в производство в ОАО «Завод Магнетон» и ГУП «Конструкторское бюро приборостроения», что подтверждено соответствующими актами.

Решение задачи дифракции электромагнитных волн на решетке ВДИ, а также методика расчета характеристик ВДИ с учетом расположения проводящего экрана внедрены в учебный процесс в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Радиоэлектронные системы и устройства».

На предложенные новые конструкции МИО получены патенты на изобретения №2370863 и №2380804. На элемент проходной ФАР, обеспечивающий электрическое сканирование луча в секторе углов до $2\theta_{\text{ск}} = 120^\circ$, а также на модуль проходной ФАР, в котором предполагается применение данного элемента ФАР, получены патенты на изобретения №2461931 и №2461930.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 13-й, 16-й, 17-й и 18-й Международных Крымских конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2003, 2006, 2007 и 2008 гг. соответственно; Юбилейной научно-технической конференции «Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях», Москва, 2006 г.; XIX научно-технической конференции, Жуковский, ОАО «НИИ Приборостроения им. В.В. Тихомирова», 2008 г.; Молодежных научно-технических конференциях «Радиолокация и связь – перспективные

технологии», Москва, 2003 и 2005 гг.; XV Международной конференции «Радиолокация и радиосвязь», Москва-Фирсановка, 2007 г.; XV координационном семинаре по СВЧ технике, Нижегородская обл., п. Хахалы, 2007 г.; XVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2010 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в статьях [1, 2, 3], патентах на изобретения [4, 5, 6, 7], работах [8...21], из них 2 статьи опубликованы в рекомендованных ВАК РФ изданиях.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 163 страницах машинописного текста и содержит 63 рисунка и одну таблицу. Список литературы насчитывает 105 наименований.

Личный вклад автора состоит в нахождении решения задачи дифракции электромагнитных волн на двумерно-периодической решетке волноводно-диэлектрических излучателей с введенными коаксиальными волноводами, в получении выражений для коэффициентов связи собственных волн областей, в решении задачи о собственных волнах поперечно-неоднородного канала Флоке с применением векторных гармоник Флоке; в разработке компьютерных алгоритмов, позволяющих реализовать найденные решения; в разработке фрагментов антенных решеток ВДИ и проведении экспериментальных исследований характеристик ВДИ с использованием данных фрагментов АР; в разработке излучателей для интегрированных элементов ФАР; в разработке новых конструкций четырехрупорного и двенадцатирупорного МИО; в участии в экспериментальных исследованиях характеристик ФАР, созданных на базе разработанных ВДИ и МИО.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Решение в строгой электродинамической постановке задачи дифракции электромагнитных волн на двумерно-периодической решетке волноводно-диэлектрических излучателей, позволяющее моделировать влияние расположения проводящего экрана путем введения соосных с круглыми волноводами и закороченных на одном конце коаксиальных волноводов.

2. Результаты исследования влияния расположения проводящего экрана на ДН и КУ волноводно-диэлектрических излучателей в АР.

3. Рекомендации по выбору расположения проводящего экрана, обеспечивающего наименьший коэффициент отражения электромагнитной волны в решетке волноводно-диэлектрических излучателей с широкоугольным сканированием луча.

4. Новая высокотехнологичная конструкция четырехрупорного МИО.

5. Новая высокотехнологичная конструкция двенадцатирупорного МИО.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы; сформулированы цель и задачи работы; отмечаются научная новизна и практическая значимость;

перечислены методы исследования; приведены сведения об апробации работы, структуре диссертации и внедрении результатов; формулируются основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации приведены схемы построения излучающих систем проходной и отражательной ФАР. Рассмотрено влияние на коэффициент усиления ФАР геометрии излучающей системы и ее основных элементов: апертурных ВДИ, определяющих изменение коэффициента усиления ФАР в секторе сканирования луча, приемных ВДИ, формирующих амплитудное распределение поля в раскрыве ФАР, и моноимпульсного облучателя. Коэффициент усиления ФАР с пространственным возбуждением в направлении максимума главного лепестка ДН приближенно определяется формулой

$$G_0(\theta_{\text{отк}}, \psi_{\text{отк}}, \lambda) = D_A \prod_n k_n. \quad (1)$$

В формулу (1) входят: $D_A(\theta_{\text{отк}}, \psi_{\text{отк}}, \lambda)$ – коэффициент направленного действия равномерно возбужденной апертуры, сфазированной в направлении, определяемом углами $\theta_{\text{отк}}, \psi_{\text{отк}}$ сферической системы координат; $k_1(\lambda)$ – коэффициент использования площади раскрыва ФАР; $k_2(\lambda)$ – коэффициент, учитывающий потери за счет неполного перехвата апертурой ФАР волны облучателя; $k_3(\theta_{\text{отк}}, \psi_{\text{отк}}, \lambda)$, $k_4(\theta_{\text{отк}}, \psi_{\text{отк}}, \lambda)$ – коэффициенты, учитывающие потери на отражение электромагнитных волн от решеток приемных и апертурных излучателей соответственно; $k_5(\lambda) \dots k_7(\lambda)$ – коэффициенты, учитывающие активные потери в приемных и апертурных излучателях и потери в облучателе соответственно; λ – рабочая длина волны. В формулу (1) не включены коэффициенты, учитывающие не рассматриваемые в диссертации факторы.

Представлен обзор наиболее часто применяемых ВДИ, по результатам которого для дальнейшего исследования с целью создания излучателей для элементов ФАР с широкоугольным сканированием луча выбраны ВДИ со ступенчатыми или коническими диэлектрическими стержнями. Приведен обзор схем построения МИО, применяемых в ФАР с пространственным возбуждением для формирования суммарных и разностных ДН. Известные схемы построения и конструктивные реализации четырехрупорного и двенадцатирупорного МИО не обеспечивают одновременного выполнения ряда требований, необходимых для создания современных излучающих систем ФАР: обеспечения работы в режимах приема и передачи волн с круговой поляризацией поля, возможности изготовления с использованием современных технологических процессов, простоты сборки и настройки, малых габаритов. Четырехрупорный и двенадцатирупорный МИО выбраны для высокотехнологичной конструктивной реализации. Приведен обзор методов и результатов теоретического и экспериментального исследования волноводно-диэлектрических излучателей для ФАР. В рассмотренных источниках уделено недостаточно внимания исследованию влияния расположения проводящего экрана на характеристики АР. Сделан вывод о необходимости проведения

исследований влияния экрана на согласование излучателей, для чего необходимо решить задачу дифракции электромагнитных волн на решетке ВДИ с учетом расположения экрана.

Вторая глава диссертационной работы посвящена электродинамическому моделированию антенной решетки волноводно-диэлектрических излучателей. Важнейшей характеристикой АР является зависимость коэффициента отражения волны от угла отклонения луча от нормали к плоскости раскрыва АР, определяющая изменение коэффициента усиления ФАР в секторе сканирования луча. Решена задача дифракции электромагнитных волн на двумерно-периодической решетке ВДИ, где учитывается зависимость коэффициента отражения от расположения проводящего экрана относительно раскрыва АР.

Рассматривается бесконечная двумерно-периодическая решетка волноводно-диэлектрических излучателей (рис. 1), ячейки которой расположены в узлах неортогональной в общем случае сетки координат X_1 и Y_1 с периодами d_1 и d_2 вдоль координатных осей с углом α между ними. Вследствие периодичности исследуемой структуры и квазипериодичности поля возбуждения решение задачи ищется в пределах одной элементарной ячейки. К ячейке структуры применяется принцип декомпозиции, при этом излучатель представляется в виде последовательно соединенных продольно однородных участков (рис. 2): полубесконечного круглого волновода, N_c поперечно-неоднородных каналов Флоке, однородного канала Флоке. Для исследования влияния расположения проводящего экрана на коэффициент отражения в ячейку вводится соосный с круглым волноводом коаксиальный волновод, плоскость короткого замыкания которого соответствует проводящему экрану и расположена на расстоянии L_K от плоскости раскрыва волновода.

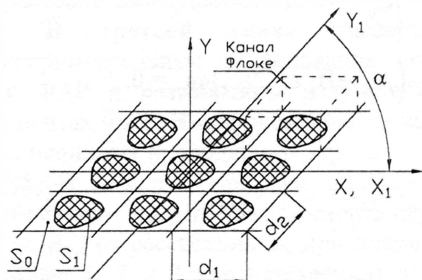


Рис. 1. Поперечное сечение двумерно-периодической диэлектрической структуры

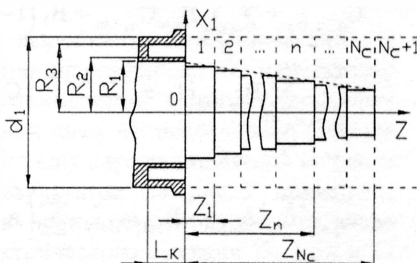


Рис. 2. Продольное сечение ячейки бесконечной АР

Коэффициент отражения волны основного типа при возбуждении излучателя со стороны волновода находится путем решения задачи дифракции волн на стыках продольно-однородных участков. Для этого применяется метод проекционного сшивания полей, при котором для каждого стыка продольно-

однородных областей записываются условия непрерывности поперечных составляющих векторов напряженностей электрического и магнитного полей в однородно-заполненном круглом ($\vec{E}_0, \vec{H}_0$) и коаксиальном ($\vec{E}_K, \vec{H}_K$) волноводах, поперечно-неоднородных ($n = 1 \dots N_c$) и однородном ($n = N_c + 1$) каналах Флоке ($\vec{E}_n(x_1, y_1), \vec{H}_n(x_1, y_1)$): при $z = 0$

$$\vec{E}_1(x_1, y_1) = \begin{cases} \vec{E}_0(x_1, y_1), & (x_1, y_1) \in S_1 \\ \vec{E}_K(x_1, y_1), & (x_1, y_1) \in S_2 \\ 0, & (x_1, y_1) \in (S_0 - S_1 - S_2) \end{cases} \quad \vec{H}_1(x_1, y_1) = \begin{cases} \vec{H}_0(x_1, y_1), & (x_1, y_1) \in S_1 \\ \vec{H}_K(x_1, y_1), & (x_1, y_1) \in S_2 \end{cases}$$

и при $z = z_n$ ($n = 1, 2, \dots, N_c$)

$$\left. \begin{aligned} \vec{E}_{n+1}(x_1, y_1) &= \vec{E}_n(x_1, y_1) \\ \vec{H}_{n+1}(x_1, y_1) &= \vec{H}_n(x_1, y_1) \end{aligned} \right\} (x_1, y_1) \in S_0, \quad (2)$$

где S_0, S_1, S_2 – области поперечных сечений ячейки структуры, волновода и коаксиального волновода соответственно. Поле в каждой из продольно-однородных областей представляется в виде разложения в ряд по собственным волнам области. Решение задачи о собственных волнах поперечно-неоднородных каналов Флоке приведено в приложении. Условиям непрерывности (2) сопоставляются их проекционные аналоги. После тождественных преобразований уравнения (2) сведены к системе неоднородных линейных алгебраических уравнений относительно комплексных амплитуд падающих и отраженных волн $A_{q_n}, B_{q_n}, B_T, B_{t_m}, B_{t_K m_K}$ в $N_c + 3$ областях.

$$C_{q_1 t_0 m_0} + \sum_{t=1}^2 \sum_{m=1}^M B_{t m} C_{q_1 t m} + B_T (1 - e^{-i\beta_T 2L_K}) C_{q_1 T} +$$

$$+ \sum_{t_K=1}^2 \sum_{m_K=1}^{M_K} B_{t_K m_K} (1 - e^{-i\beta_{t_K m_K} 2L_K}) C_{q_1 t_K m_K} - (A_{q_1} + B_{q_1} e^{-i\beta_{q_1} z_1}) \omega_{q_1} = 0,$$

$$q_1 = 1, 2, \dots, Q_1.$$

$$\omega_{t_0 m_0}^* \delta_{t_0 t} \delta_{m_0 m} - B_{t m} \omega_{t m}^* - \sum_{q_1=1}^{Q_1} (A_{q_1} - B_{q_1} e^{-i\beta_{q_1} z_1}) C_{t m q_1}^* = 0,$$

$$t = 1, 2, \quad m = 1, 2, \dots, M.$$

$$B_T (1 + e^{-i\beta_T 2L_K}) \omega_T^* + \sum_{q_1=1}^{Q_1} (A_{q_1} - B_{q_1} e^{-i\beta_{q_1} z_1}) C_{T q_1}^* = 0,$$

$$B_{t_K m_K} (1 + e^{-i\beta_{t_K m_K} 2L_K}) \omega_{t_K m_K}^* + \sum_{q_1=1}^{Q_1} (A_{q_1} - B_{q_1} e^{-i\beta_{q_1} z_1}) C_{t_K m_K q_1}^* = 0,$$

$$t_K = 1, 2, \quad m_K = 1, 2, \dots, M_K.$$

$$\sum_{q_{n-1}=1}^{Q_{n-1}} \left(A_{q_{n-1}} e^{-i\beta_{q_{n-1}}(z_{n-1}-z_{n-2})} + B_{q_{n-1}} \right) C_{q_n q_{n-1}} - \left(A_{q_n} + B_{q_n} e^{-i\beta_{q_n}(z_n-z_{n-1})} \right) \omega_{q_n} = 0,$$

$$q_n = 1, 2, \dots, Q_n, \quad n = 2, 3, \dots, (N+1).$$

$$\left(A_{q_{n-1}} e^{-i\beta_{q_{n-1}}(z_{n-1}-z_{n-2})} - B_{q_{n-1}} \right) \omega_{q_{n-1}}^* - \sum_{q_n=1}^{Q_n} \left(A_{q_n} - B_{q_n} e^{-i\beta_{q_n}(z_n-z_{n-1})} \right) C_{q_{n-1} q_n}^* = 0,$$

$$q_{n-1} = 1, 2, \dots, Q_{q_{n-1}}, \quad n = 2, 3, \dots, (N+1).$$

(3)

В уравнениях (3) β_t , β_{tm} , β_{qn} – продольные волновые числа собственных волн областей, а коэффициенты ω_t , ω_{tm} , ω_{qn} определяются как отношение характеристического сопротивления собственной волны к его модулю. Индекс t показывает принадлежность волны к семейству Н-волн ($t = 1$) или Е-волн ($t = 2$). t_0 , m_0 – индексы падающей волны. В уравнения (2.10) входят коэффициенты связи собственных волн, определяемые, например, для волн двух каналов Флоке общими формулами

$$C_{q_n q_{n-1}} = \iint_{S_0} \vec{e}_{q_{n-1}} [\vec{h}_{q_n}^*, \vec{z}_0] dS, \quad C_{q_{n-1} q_n}^* = \iint_{S_0} \vec{h}_{q_n} [\vec{z}_0, \vec{e}_{q_{n-1}}^*] dS. \quad (4)$$

Коэффициенты связи собственных волн остальных областей записываются аналогично формулам (4).

Полученное решение позволяет моделировать ВДИ с диэлектрическими стержнями произвольной формы при аппроксимации их набором продольно-однородных цилиндрических участков длиной $\Delta z_n = z_n - z_{n-1}$ и может применяться при моделировании влияния расположения проводящего экрана на характеристики решетки ВДИ.

В третьей главе диссертации выполнены теоретические и экспериментальные исследования волноводно-диэлектрических излучателей для ФАР и разработаны излучатели для применения в интегрированных элементах ФАР. В широком диапазоне значений шага АР исследовано влияние расположения проводящего экрана на коэффициент отражения волны на входе ВДИ. В качестве примера полученных результатов на рис. 3 приведены зависимости модуля коэффициента отражения волны основного типа на входе ВДИ $|B_{11}|$ от расстояния L_K при длине диэлектрического стержня 1λ , $1,5\lambda$ и 2λ (кривые 1, 2 и 3 соответственно) для ВДИ, расположенных в АР с шагом $d_\Delta = 0,68\lambda$. На рис. 4 сопоставлены расчетные (кривые 1 и 2) и экспериментальные (точки 3) значения коэффициента $(1-|B_{11}|)^2$, определяющего потери энергии электромагнитной волны на отражение. Результаты экспериментов хорошо согласуются с результатами расчетов и подтверждают полученные зависимости с резонансными пиками коэффициента отражения в излучателе от расстояния L_K между плоскостями раскрытов волноводов и проводящего экрана.

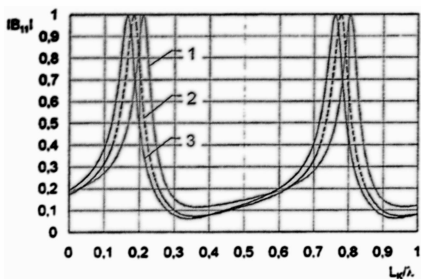


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от расстояния до проводящего экрана

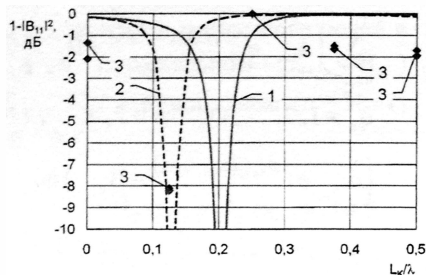


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные зависимости прошедшей мощности от расстояния L_K

На основе результатов исследований с целью обеспечения эффективного согласования антенной решетки даны рекомендации по выбору расположения экрана для АР с гексагональным размещением излучателей при различных значениях шага АР. Исследовано влияние проводящего экрана на диаграммы направленности волноводно-диэлектрических излучателей. Исследовано влияние размеров и формы диэлектрического стержня на ДН и коэффициент усиления излучателей для ФАР с широкоугольным сканированием луча. Выработаны рекомендации по выбору размеров ВДИ в зависимости от условий применения. Разработаны ВДИ для ряда интегрированных элементов ФАР с широкоугольным сканированием луча. На рис. 5 показан элемент отражательной ФАР с ВДИ из материала с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 2,3$, а на рис. 6 – его ДН: кривая 1 – одиночный ВДИ, кривые 2, 3 – ВДИ в АР. На рис. 7 приведены экспериментальные ДН апертурного ВДИ с диэлектрическим стержнем с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 4$ длиной 2λ в АР с проводящим экраном (кривая 1) и без экрана (кривая 2). На рис. 8 показаны апертурный и приемный ВДИ в элементе проходной ФАР Ку-диапазона волн, предназначенном для использования в АР с шагом $d_\Delta = 0,68\lambda$. На рис. 9 приведены апертурный и приемный ВДИ в элементе проходной ФАР Ка-диапазона волн, предназначенном для установки в АР с шагом $d_\Delta = 0,57\lambda$. Апертурный ВДИ обеспечивает сканирование луча в секторе до $2\theta_{\text{сх}} = 120^\circ$. На рис. 10 приведена экспериментальная зависимость нормированного коэффициента усиления ФАР из таких элементов от угла отклонения луча (кривая 1), а также суммарные ДН при различных углах отклонения луча (кривые 2, 3, 4). В приемном ВДИ этого элемента ФАР введен цилиндрический трансформатор, установленный на конце конического диэлектрического стержня и позволяющий улучшить согласование излучателя со свободным пространством.

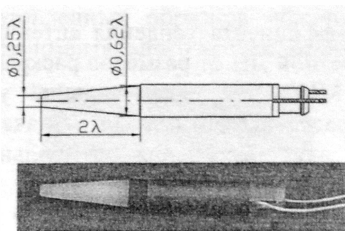


Рис. 5. Элемент отражательной ФАР Ка-диапазона волн с ВДИ

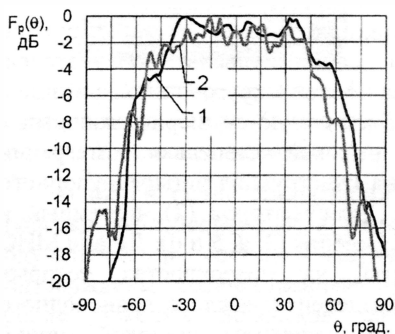


Рис. 7. ДН апертурного ВДИ в АР с экраном (1) и без экрана (2)

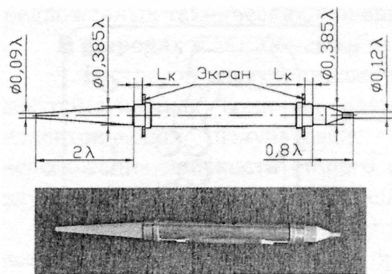


Рис. 9. Элемент ФАР Ка-диапазона волн для антенной решетки со сканированием в секторе $2\theta_{\text{ск}} = 120^\circ$

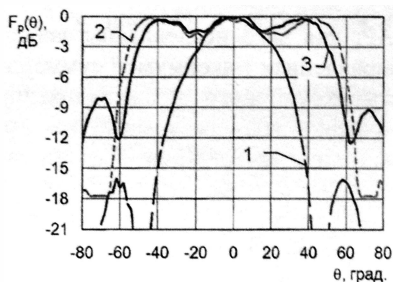


Рис. 6. ДН ВДИ с диэлектрическим стержнем из материала с $\epsilon_r = 2,3$

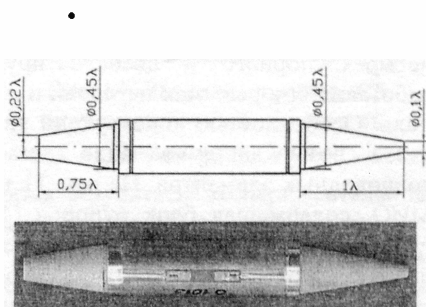


Рис. 8. Элемент проходной ФАР Ку-диапазона волн с ВДИ

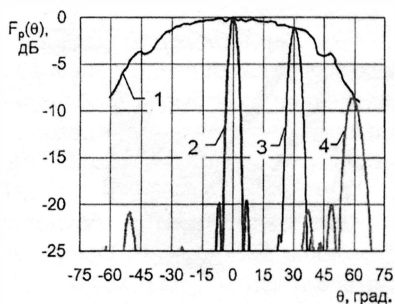


Рис. 10. Зависимость КУ от угла отклонения луча (1) и суммарные ДН ФАР при различных углах отклонения луча (2, 3, 4)

В четвертой главе диссертации выполнены исследования и оптимизация излучающих систем ФАР с пространственным возбуждением моноимпульсными облучателями. Решена задача оптимизации возбуждения

ФАР, для чего исследованы зависимости коэффициента усиления антенны в направлениях максимумов суммарной и разностной ДН от размеров раскрывов четырехрупорного и двенадцатирупорного МИО для ряда значений угла облучения края раскрыва антенны $\alpha_{\text{обл}}$. Определены оптимальные значения расстояния между осями рупоров МИО d_p для обеспечения оптимального возбуждения ФАР. В частности, для ФАР с диаметром раскрыва 16λ при значениях $\alpha_{\text{обл}} = 20^\circ, 24^\circ$ и 28° оптимальное значение d_p для суммарной ДН составляет соответственно $0,9\lambda, 1,0\lambda$ и $1,2\lambda$. Исследовано влияние погрешностей фазирования каналов МИО на характеристики облучаемой им ФАР. Приведены допустимые погрешности фазирования и отклонения длин волноводных каналов облучателей, при которых обеспечивается формирование разностных ДН ФАР с заданной глубиной минимума.

Разработаны новые высокотехнологичные конструкции четырехрупорного и двенадцатирупорного моноимпульсных облучателей, работающих в режимах передачи и приема на волнах с круговой поляризацией поля. Особенностью конструкций является выполнение суммарно-разностных узлов возбуждения в виде деталей с высокой степенью интеграции волноводных элементов. На рис. 11 приведена конструкция четырехрупорного МИО, содержащая блок рупоров (1), блок поляризаторов (2), приемный и передающий суммарно-разностные узлы возбуждения (3, 4, 5 и 6). Детали МИО представляют собой металлические плиты, на поверхностях которых выполнены волноводные каналы (рис. 12). Разделение каждого волноводного канала на две детали производится вдоль середины широкой стенки прямоугольного волновода, что позволяет исключить влияние щели на характеристики МИО.

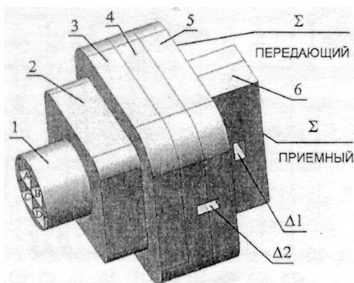


Рис. 11. Конструкция МИО

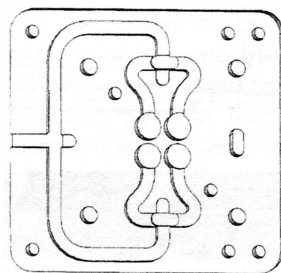


Рис. 12. Выполнение узлов МИО

Приемный и передающий суммарно-разностные узлы выполнены в виде пяти основных деталей в четырехрупорном МИО и десяти деталей в двенадцатирупорном МИО. Показаны преимущества в габаритах разработанной конструкции четырехрупорного облучателя Ка-диапазона волн по сравнению с известной традиционной конструкцией в виде отдельных волноводных узлов, соединенных волноводами. Приводятся фотографии

изготовленных образцов облучателей (рис 1 и рис 14) и результаты их экспериментального исследования

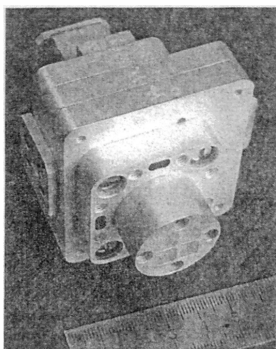


Рис 13. Четырехрупорный моноимпульсный облучатель Ка-диапазона волн

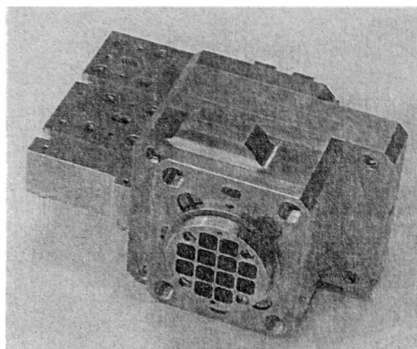


Рис 14. Двенадцатирупорный моноимпульсный облучатель Ка-диапазона волн

В пятой главе диссертации приводятся результаты экспериментальной проверки работоспособности разработанных излучателей и моноимпульсных облучателей в составе излучающих систем ФАР. Экспериментально подтверждены количественные преимущества в коэффициенте усиления и уровне боковых лепестков разностных ДН ФАР при использовании двенадцатирупорного облучателя по сравнению с четырехрупорным. Представлены экспериментальные характеристики ФАР Ку- и Ка-диапазонов волн подтверждающие работоспособность и высокую эффективность предложенных технических решений.

В выводах и заключении приведены основные результаты работы

1 В строгой электродинамической постановке решена задача дифракции электромагнитных волн на двумерно-периодической решетке волноводно-диэлектрических излучателей. Решение позволяет учитывать влияние расположения плоскости общего проводящего экрана относительно раскрыва излучателей на характеристики решетки ВДИ.

2 Исследована зависимость коэффициента отражения волны от расстояния между плоскостями проводящего экрана и раскрывов волноводов для решеток ВДИ в диапазоне шага AP $0,57\lambda$ $0,68\lambda$. Полученная расчетным путем зависимость подтверждена результатами экспериментов. Даны рекомендации по выбору расположения экрана, обеспечивающего минимизацию коэффициента отражения электромагнитной волны в решетке излучателей.

3 Проведены экспериментальные исследования ВДИ для AP с широкоугольным электрическим сканированием луча в широком диапазоне изменения шага AP длины и параметров материала диэлектрического стержня. Исследована зависимость коэффициента усиления ВДИ от длины

диэлектрического стержня. Результаты исследований позволяют выбрать размеры апертурных излучателей с учетом требуемого сектора сканирования луча, а также провести выбор приемных излучателей с учетом заданного угла облучения краев раскрыва антенны.

4. Разработан ВДИ для элемента отражательной ФАР Ка-диапазона волн, обеспечивающий сектор сканирования луча $2\theta_{\text{ск}} = 90^\circ$ при неравномерности коэффициента усиления не более 2 дБ в его пределах.

5. Разработаны апертурные и приемные излучатели для элементов проходных ФАР Ка- и Ку-диапазонов волн, устанавливаемых в АР с шагом $d_\Delta = 0,68\lambda \dots 0,57\lambda$. Апертурные излучатели обеспечивают сканирование луча в секторе $2\theta_{\text{ск}} = 90^\circ \dots 120^\circ$. Приемные излучатели могут использоваться в излучающих системах с углом облучения края раскрыва до $\alpha_{\text{обл}} = 30^\circ$.

6. Предложены новые технологичные конструкции четырехрупорного и двенадцатирупорного МИО, выполненные с применением деталей с высокой степенью интеграции волноводных элементов, обеспечивающие простоту сборки и повторяемость в производстве. Облучатели Ку- и Ка-диапазонов волн обеспечивают следующие характеристики: развязка передающего входа и разностных приемных выходов в полосе рабочих частот не хуже -32 дБ, сквозные потери в облучателе от передающего входа до суммарного приемного выхода на средней частоте рабочей полосы не превышают -0,5 дБ для четырехрупорного и -1,1 дБ для двенадцатирупорного МИО, ширина суммарных диаграмм направленности МИО по уровню -10 дБ до 56° ; глубина минимума разностных диаграмм направленности не хуже -30 дБ. Облучатели могут использоваться в излучающих системах моноимпульсных ФАР с углом облучения края раскрыва $\alpha_{\text{обл}}$ до 30° .

7. Результаты исследования зависимости коэффициента усиления ФАР с четырехрупорным и двенадцатирупорным облучателями от параметров излучающей системы позволяют выбрать оптимальное расстояние между осями рупоров МИО при заданном значении угла облучения края раскрыва антенны.

8. Исследовано влияние на разностные ДН ФАР погрешностей фазирования каналов четырехрупорного и двенадцатирупорного МИО. Результаты исследований позволяют определить предельно допустимые величины этих погрешностей при глубине минимума разностных ДН ФАР не выше заданного значения.

9. При использовании двенадцатирупорного облучателя получено путем расчета и экспериментально подтверждено увеличение коэффициента усиления в направлениях максимумов главных лепестков разностных диаграмм направленности ФАР на 2,5...3 дБ и снижение уровня боковых лепестков разностных ДН на 7...12 дБ по сравнению с ФАР с четырехрупорным МИО.

10. Разработанные ВДИ и МИО испытаны в излучающих системах фазированных антенных решеток Ку- и Ка-диапазонов. Экспериментально подтверждена работоспособность предлагаемых технических решений.

В приложении методом Галеркина решена задача нахождения системы собственных волн поперечно-неоднородного канала Флоке. В качестве базиса

использована система векторных пространственных гармоник Флоке. Получены формулы для решетки стержней круглого поперечного сечения. Приводятся также формулы для вычисления коэффициентов связи собственных волн областей (4), применяемые при решении задачи дифракции электромагнитных волн на решетке ВДИ в главе 2.

Результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Русов Ю.С. Дифракция электромагнитных волн на периодической решетке волноводно-диэлектрических излучателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2009. Спец. вып. Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов. С. 156-163.

2. Разработка элементов проходной и отражательной фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона волн с ферритовыми фазовращателями / В.М. Крехтунов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2009. Спец. вып. Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов. С. 105-117.

3. Особенности построения фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона волн для РЛС зенитно-ракетного комплекса малой дальности / О.Ю. Шевцов [и др.] // Известия РАН. 2010. № 3. С. 61-69.

4. Элемент проходной фазированной антенной решетки: пат. 2461931 РФ / М.Е. Голубцов, Ю.С. Русов, В.М. Крехтунов, С.И. Нефедов, А.И. Фирсенков. Заявл. 30.12.2010; опубл. 20.09.2012. Бюл. №26. // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень федеральной службы по интел. собств.

5. Модуль проходной фазированной антенной решетки: пат. 2461930 РФ / Ю.С. Русов, М.Е. Голубцов, В.М. Крехтунов, С.И. Нефедов. Заявл. 30.12.2010; опубл. 20.09.2012. Бюл. №26. // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень федеральной службы по интел. собств.

6. Моноимпульсная антенна: пат. 2370863 РФ / В.И. Образумов, В.М. Крехтунов, О.Ю. Шевцов, Ю.С. Русов, М.Е. Голубцов. Заявл. 04.08.2009; опубл. 20.10.2009. Бюл. №29. // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень федеральной службы по интел. собств.

7. Моноимпульсный облучатель: пат. 2380804 РФ / В.И. Образумов, В.М. Крехтунов, О.Ю. Шевцов, Ю.С. Русов, М.Е. Голубцов. Заявл. 04.08.2008; опубл. 27.01.2010. Бюл. №3. // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень федеральной службы по интел. собств.

8. Хандамиров В.Л., Крехтунов В.М., Русов Ю.С. Диэлектрические стержневые излучатели ФАР // Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д.И. Воскресенского. М., 2012. С. 345-349.

9. Русов Ю.С. Разработка излучающей системы проходной ФАР Кадиапазона // Радиолокация и связь – перспективные технологии. Тезисы докл. IV Молодеж. региональной науч.-техн. конф. Москва, 2005. С. 97-99.

10. Русов Ю.С., Костина Н.Ю., Крехтунов В.М. Волноводно-диэлектрические излучатели для ФАР. Вопросы оптимизации // Сб. докладов XIX региональной науч.-техн. конф. Жуковский, 2008. С. 439-446.

11. Русов Ю.С., Костина Н.Ю., Крехтунов В.М. Методы разработки и исследования волноводно-диэлектрических излучателей для фазированных антенных решеток // 18-я Междунар. конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы конф.; В 2 т. Севастополь, 2008. Т. 2. С. 411-412.

12. Русов Ю.С., Крехтунов В.М. Исследование влияния амплитудных и фазовых погрешностей в каналах моноимпульсного облучателя на характеристики апертурной антенны // 17-я Междунар. конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы конф.; В 2 т. Севастополь, 2007. Т. 1. С. 421-422.

13. Русов Ю.С., Крехтунов В.М. Моноимпульсный облучатель для кругополяризованных волн // 16-я Междунар. конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы конф.; В 2 т. Севастополь, 2006. Т. 2. С. 473-474.

14. Русов Ю.С., Овечкин В.С., Крехтунов В.М. Оптимизация моноимпульсных облучателей для апертурных антенн // Сб. докладов XIX региональной науч.-техн. конф. Жуковский, 2008. С. 446-452.

15. Русов Ю.С., Овечкин В.С., Крехтунов В.М. Разработка двенадцатирупорного моноимпульсного облучателя для апертурной антенны // 17-я Междунар. конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы конф.; В 2 т. Севастополь, 2007. Т. 1. С. 423-424.

16. Крехтунов В.М., Русов Ю.С. Исследование диэлектрических излучателей для фазированных антенных решеток // 13-я Междунар. конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы конф. Севастополь, 2003. С. 382-384.

17. Разработка элементной базы пассивных ФАР СВЧ и КВЧ диапазонов с ферритовыми фазовращателями / В.М. Крехтунов [и др.] // Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях: Сб. докладов юбил. региональной науч.-техн. конф.; В 2-х ч. Москва, 2006. Ч. 2. С. 236-247.

18. Разработка элементной базы для ФАР КВЧ диапазона / Ю.С. Русов [и др.] // Сб. докладов XIX региональной науч.-техн. конф. Жуковский, 2008. С. 430-438.

19. Разработка фазированных антенных решеток для РЛС малой дальности / В.М. Крехтунов [и др.] // XV Междунар. конф. Радиолокация и радиосвязь. Москва-Фирсановка, 2007. С. 411-421.

20. Разработка элемента проходной ФАР Ка-диапазона / В.М. Крехтунов [и др.] // Материалы XV всерос. координационного семинара по СВЧ технике. Хахалы (Нижегородская обл.), 2007. С. 97-99.

21. Крехтунов В.М., Русов Ю.С., Голубцов М.Е. Высокотехнологичные моноимпульсные облучатели миллиметрового диапазона волн // XVI Междунар. науч.-техн. конф. Радиолокация, навигация, связь. Воронеж, 2010. Т. 3. С. 1677-1685.