

На правах рукописи



КУЗНЕЦОВ Анатолий Васильевич

**МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УНИФИЦИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ
АНТЕНН ДЛЯ АППАРАТУРЫ СПЕЦТЕХНИКИ И СВЯЗИ
ДИАПАЗОНА КРАЙНЕ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Воронеж – 2019

Работа выполнена в АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж

Научный руководитель: Климов Александр Иванович
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Усков Григорий Константинович
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет», доцент кафедры электроники

Авдюшин Артем Сергеевич
кандидат технических наук, АО «ИРКОС»,
заместитель директора обособленного структур-
ного подразделения по управлению заказами

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Уральский федеральный универ-
ситет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина»

Защита состоится «6» июня 2019 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертацион-
ного совета Д 212.037.12, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государ-
ственный технический университет», по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский
просп., 14, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на
официальном сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет» <http://cchgeu.ru/>.

Автореферат разослан «10» апреля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук



Федоров Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Значительная ширина, наличие частотных полос малого и повышенного ослабления радиоволн в атмосфере, возможность построения малогабаритных антенн с фиксированными и управляемыми характеристиками делают диапазон КВЧ весьма привлекательным для реализации как традиционных, так и новых радиотехнических устройств и систем общего и специального назначения. В их числе – перспективные устройства управления, контроля и измерений, распределительные телевизионные и компьютерные сети. Особый интерес вызывают многофункциональные высокоскоростные аналоги современных сетей мобильной связи в виде гетерогенных беспроводных сетей передачи информации (ГБСПИ) с малыми ячейками, включающих мобильные и стационарные терминалы, базовые станции и ретрансляторы. Так, в ряде масштабных зарубежных проектов подобных сетей для малых ячеек с точками доступа абонентов предполагается использовать полосу частот 57–66 ГГц, а для связи базовых станций и ретрансляторов – полосу 71–86 ГГц. В аппаратной части названных выше систем и сетей, несомненно, важную роль играют антенны КВЧ. На данный момент в аппаратуре разных уровней распределительной телевизионной сети или гетерогенной сети связи предложено использовать комплекс из нескольких разнотипных антенн с фиксированными и управляемыми диаграммами направленности. Однако в силу специфики конструкций и технологий производства антенн КВЧ воплощение в жизнь подобных проектов в части разработки антенной техники требует участия множества предприятий и организаций, как правило, специализирующихся на разработках и производстве определенных типов антенн.

В этой связи вполне логичной и актуальной представляется задача унификации комплексов антенн, позволяющей существенно сузить круг соисполнителей, сократить сроки проектирования и избежать при этом неоправданных финансовых и иных затрат. Такие комплексы могут быть реализованы в виде наборов антенных решеток с различными характеристиками и функциональными возможностями – например, с круговой, секторной, многолучевой или сканирующей диаграммой направленности (ДН), включая остронаправленные антенны с высоким коэффициентом усиления.

Очевидно, что наибольший экономический эффект может быть достигнут в случае использования в антенных решетках минимального числа базовых элементов. В их качестве весьма перспективными представляются хорошо известные, конструктивно простые и технологичные плоские антенны вытекающей волны (АВВ) на основе диэлектрических волноводов с полосковыми дифракционными решетками и микрополосковые коллинеарные антенны (МКА) КВЧ с круговой ДН нормального и наклонного излучения.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в теорию и практику построения линейных и плоских АВВ (включая антенны с управляемой ДН) на основе структур, содержащих ДВ с полосковыми ДР, внесли известные зарубежные (А.А. Oliner, D.R. Jackson, T. Teshirogi, T. Kawamura, A. Yamamoto, J.A. Encinar, F. Frezza, P. Baccarelli, P. Burghignoli, M.

Ettorre, M. Ghomi, H. Baudrand, J.L. Gomez-Tornero, M. Matsumoto и др.) и отечественные (представители научной школы академика В.П. Шестопалова, Е.И. Нефедов, С.Е. Банков, В.И. Юдин, Ю.Б. Нечаев, Ю.Г. Пастернак, А.В. Останов, А.И. Климов и др.) ученые и специалисты. Обширные и глубокие исследования в области теории практики построения микрополосковых антенн и решеток выполнили зарубежные (J.R. James, P.S. Hall, R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, R. Bancroft, B. Bateman, K. Solbach, H. Iizuka и др.) и российские (Б.А. Панченко, Е.И. Нефедов, Ю.Б. Нечаев, В.А. Обуховец, А.О. Касьянов и др.) ученые и специалисты. Однако довольно много вопросов в отношении выбора базового типа АВВ, методик проектирования АВВ с низким уровнем бокового излучения, выбора конструктивных параметров, рабочих типов волн и частот АВВ с фазовым сканированием ДН, а также в части создания комплекса микрополосковых антенных решеток с требуемыми функциональными возможностями и характеристиками остаются открытыми. Поэтому построение многофункциональных унифицированных комплексов антенн (УКА) КВЧ требует решения ряда задач по разработке эффективных методик их проектирования и рекомендаций по практической реализации.

Целью диссертационной работы является разработка многофункциональных унифицированных комплексов антенн с фиксированными и сканирующими диаграммами направленности различной формы для аппаратуры спецтехники и связи диапазона крайне высоких частот (КВЧ), построенных на основе антенн вытекающей волны и микрополосковых коллинеарных антенн.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Выбор единых базовых элементов и разработка рекомендаций, обеспечивающих построение многофункциональных унифицированных комплексов антенн КВЧ с фиксированной или сканирующей диаграммой направленности различной формы.

2. Разработка и апробация методики проектирования излучающего раскрыва и устройств возбуждения плоских антенн вытекающей волны нормального излучения с Н-поляризацией, обеспечивающей реализацию антенн с пониженным уровнем боковых лепестков диаграммы направленности.

3. Разработка и апробация методики проектирования излучающего раскрыва многовходовых полосковых антенн вытекающей волны с Н-поляризацией с последовательным и параллельно-последовательным возбуждением, обеспечивающей реализацию антенн с фазовым сканированием диаграммы направленности с минимальным снижением коэффициента направленного действия в заданной плоскости.

4. Разработка и апробация компонент унифицированных комплексов антенн КВЧ на основе полосковой антенны вытекающей волны в виде структуры с диэлектрическим волноводом и полосковой дифракционной решеткой и микрополосковой коллинеарной антенны с круговой диаграммой направленности.

Научная новизна. В работе получены следующие новые результаты:

1. Рекомендации по составу и реализации компонент двух многофункциональных унифицированных комплексов антенн КВЧ, обеспечивающих

формирование фиксированной или сканирующей ДН различной формы, отличающихся использованием единых базовых элементов в виде плоской антенны вытекающей волны с одномерной полосковой дифракционной решеткой и микрополосковой коллинеарной антенны с круговой диаграммой направленности.

2. Методика проектирования плоской антенны вытекающей волны нормального излучения с пониженным уровнем боковых лепестков диаграммы направленности в Е- и Н-плоскости с Н-поляризацией, содержащей экранированный диэлектрический волновод с полосковой дифракционной решеткой и устройство возбуждения в виде переменного-фазной гребенчатой полосковой линии, основанная на методе вытекающих волн, отличающаяся использованием имитационного моделирования выделяемых в антенне трехпортовых полосковых структур с варьируемыми геометрическими параметрами и определения коэффициентов ослабления с учетом конечных размеров антенны и взаимного влияния ее элементов.

3. Рекомендации по построению и использованию устройств возбуждения диэлектрического волновода, выполненных в виде переменного-фазной гребенчатой полосковой линии и переменного-фазного волноводно-щелевого делителя мощности, обеспечивающие реализацию плоской антенны вытекающей волны нормального излучения с Н-поляризацией с пониженным уровнем боковых лепестков диаграммы направленности в Н-плоскости.

4. Методика проектирования излучающего раскрыва многовходовой плоской антенны вытекающей волны с Н-поляризацией, содержащей одномерную полосковую дифракционную решетку, обеспечивающей фазовое сканирование диаграммы направленности в заданной плоскости при минимальном снижении коэффициента направленного действия, отличающаяся рекомендациями по выбору конструктивных параметров раскрыва антенны в режиме синфазного возбуждения входов в рабочей полосе частот.

5. Результаты имитационного моделирования компонент двух многофункциональных унифицированных комплексов антенн КВЧ с фиксированной и сканирующей диаграммой направленности на основе единых базовых элементов – плоской полосковой антенны вытекающей волны, а также микрополосковой коллинеарной антенны с круговой диаграммой направленности.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методик проектирования и рекомендаций по практической реализации компонент многофункциональных унифицированных комплексов антенн КВЧ на основе конструктивно простых и высокотехнологичных базовых антенных элементов:

- комплекса плоских полосковых антенн вытекающей волны, включающего антенны нормального излучения, антенны с пониженным уровнем боковых лепестков диаграммы направленности и антенны с однокоординатным фазовым сканированием диаграммы направленности;

- комплекса микрополосковых линейных, цилиндрических и плоских антенных решеток, включающего решетки с круговой, фиксированной, сканирующей в ограниченном угловом секторе или в пределах 360 градусов в азимутальной плоскости диаграммы направленности.

Практическая значимость работы состоит в том, что внедрение предложенных в работе унифицированных комплексов антенн обеспечивает сокращение сроков и уменьшение затрат материальных ресурсов на проектирование и внедрение аппаратуры спецтехники, систем и сетей связи диапазона КВЧ.

Методология и методы исследования. В диссертации использованы методы технической электродинамики, теории устройств СВЧ и антенн, а также имитационное моделирование антенн с помощью компьютерных программ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Антенна вытекающей волны в виде структуры с экранированным диэлектрическим волноводом и одномерной полосковой дифракционной решеткой, а также микрополосковая коллинеарная антенна с круговой диаграммой направленности, выбранные в качестве базовых элементов, обеспечивают экономичную реализацию компонент двух многофункциональных унифицированных комплексов антенн КВЧ с фиксированными или сканирующими ДН различной формы.

2. Методика проектирования плоской антенны вытекающей волны, нормального излучения с Н-поляризацией и содержащей экранированный диэлектрический волновод, дифракционную решетку с варьiruемой шириной полосок и гребенчатую полосковую линию с варьiruемой длиной боковых выступов, использующая имитационное моделирование двух выделяемых в антенне трехпортовых структур и определение коэффициентов ослабления с учетом конечных размеров антенны и взаимного влияния ее элементов, позволяет реализовать антенну с уровнем боковых лепестков диаграммы направленности в Е- и Н-плоскости не выше -20 дБ.

3. Плоские антенны вытекающей волны, построенные на основе одномерно-периодических полосковых структур нормального излучения с Н-поляризацией с устройствами возбуждения в виде переменного-фазной гребенчатой полосковой линии или переменного-фазного волноводно-щелевого делителя мощности с постоянными конструктивными параметрами и короткими замыканиями на расстоянии половины длины волны от центров крайних элементов, обеспечивают формирование диаграммы направленности в Н-плоскости с уровнем боковых лепестков не более -25 дБ.

4. Методика проектирования многовходовой плоской антенны вытекающей волны с Н-поляризацией на основе симметричной структуры с двумя одномерно-периодическими полосковыми подрешетками и параллельно-последовательным возбуждением раскрыва с конструктивными параметрами, обеспечивающими при синфазном возбуждении входов в рабочей полосе частот наклонное излучение подрешеток в направлениях краев раскрыва в Е-плоскости под углом, не превышающим половину ширины диаграммы направленности подрешетки, позволяет реализовать антенну с однокоординатным фазовым сканированием диаграммы направленности в Н-плоскости с минимальным снижением КНД в угловом секторе шириной не менее 40° .

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы в виде рекомендаций по составу и практической реализации унифици-

рованных комплексов антенн КВЧ, методик проектирования и рекомендаций по реализации плоских антенн вытекающей волны КВЧ с пониженным уровнем бокового излучения, результатов разработки и компьютерного моделирования полосковых антенных решеток КВЧ внедрены в АО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж) применительно к технической основе системы связи и управления при выполнении плановых НИОКР, а также ряда важнейших работ, заданных Решениями Президента и Правительства РФ, в частности, работ по темам «Кассиопея», «Москва», «Созвездие-М», «Созвездие-М2» и других для определения направлений и путей совершенствования систем связи и пунктов управления специального назначения.

Достоверность и обоснованность основных положений и выводов, содержащихся в диссертационной работе, базируется на корректном использовании теории и численных методов электродинамики и антенн, подтверждается результатами имитационного моделирования с использованием апробированного программного обеспечения, а также в частных случаях согласованием с результатами, опубликованными в научной литературе.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на XVIII Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (Казань, 2017), XVI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Миасс, 2017), XXIV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в числе которых семь работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит в анализе известных технических решений по построению компактных антенн КВЧ с фиксированной и сканирующей диаграммой направленности [1–4, 7, 8, 10, 11–14], разработке предложений по составу и рекомендаций по практической реализации унифицированных комплексов антенн на основе плоских антенн вытекающей волны и микрополосковой коллинеарной антенны с круговой диаграммой направленности [1, 2, 5, 7, 9, 10, 14–16], разработке и апробации методики проектирования излучающего раскрыва и устройств возбуждения плоских антенн вытекающей волны с пониженным уровнем бокового излучения [5–7, 10], разработке и апробации методики проектирования плоских антенн вытекающей волны с фазовым сканированием диаграммы направленности [1, 9, 14].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 113 наименований и одного приложения. Основная часть работы изложена на 154 страницах, содержит 133 рисунка и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы, приведены сведения об апробации основных положений и выводов диссертации, ее структуре и внедрении результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор специальной техники, систем и сетей передачи информации диапазона КВЧ. Рассмотрены примеры перспективных гетерогенных беспроводных систем передачи информации (ГБСПИ) КВЧ, проанализированы известные технические решения в части построения антенн для аппаратуры ГБСПИ. Сформулировано предположение о необходимости разработки многофункциональных унифицированных комплексов антенн (УКА) КВЧ, внедрение которых позволило бы уменьшить затраты времени и ресурсов на проектирование и внедрение аппаратуры спецтехники, систем и сетей связи диапазона КВЧ. С учетом требований по электромагнитной совместимости, помехозащищенности и экологичности радиосредств, в работе исследованы антенны для устройств и систем не лицензируемого и пока еще слабо загруженного интервала частот в окрестности 60 ГГц, для которого характерно значительное ослабление радиоволн в силу резонансного поглощения молекулами кислорода.

Во второй главе обобщены требования к антеннам УКА для аппаратуры спецтехники и связи КВЧ, проанализированы достоинства и недостатки известных плоских микрополосковых и щелевых антенных решеток, а также АВВ КВЧ. С учетом высокой эффективности излучения, возможности формирования ДН различной формы, простоты и технологичности конструкции, предложены следующие варианты базовых антенн для построения УКА – полосковые АВВ и микрополосковые коллинеарные антенны (МКА) с круговой азимутальной ДН:

1) для аппаратуры спецтехники и ГБСПИ – линейные и плоские АВВ линейной поляризации с последовательным (торцевым) или параллельно-последовательным (центральный) возбуждением, построенные на основе структуры с экранированным ДВ и полосковой ДР, рис. 1, на котором обозначено: 1 – ДВ; 2 – экран; 3 – полосковая ДР; 4 – щель связи с источником возбуждения (находится под центральной лентой и вытянута вдоль оси OY).

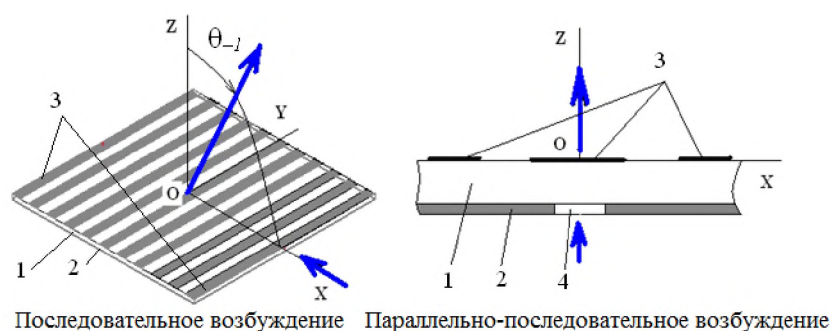


Рисунок 1 – Структуры АВВ

При последовательном возбуждении антенны со стороны торца ДВ направление излучения на -1 -й пространственной гармонике (ПГ) располагается в плоскости XOZ и определяется углом θ_{-1} относительно нормали (оси OZ) к продольной оси структуры OX : $\theta_{-1} = \arcsin(p(\lambda) - \lambda/d)$, где $p(\lambda) = c/v_{\phi}(\lambda)$ – замедление фазовой скорости поверхностной волны ДВ; λ_0 – рабочая длина волны; d – период ДР в направлении OX ; $v_{\phi}(\lambda)$ – фазовая скорость поверхностной волны ДВ.

2) для аппаратуры ГБСПИ – МКА с круговой азимутальной ДН (в плоскости XOY) в виде линейной переменного-фазной антенной решетки излучателей с последовательным (или параллельно-последовательным) возбуждением, рис. 2, на котором обозначено: 1 – устройство возбуждения; 2 – подложка; 3 – полосковые элементы; 4 – короткозамыкающая перемычка (в антенне стоячей волны).

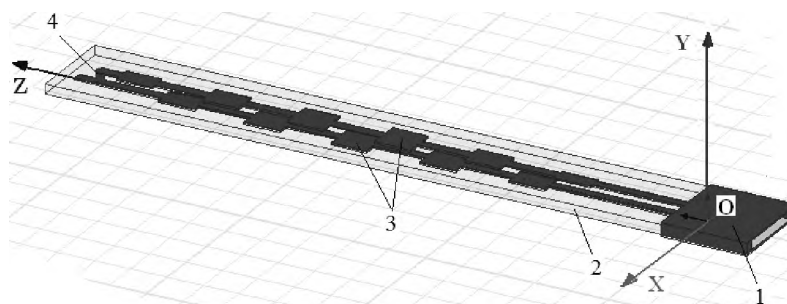


Рисунок 2 – МКА с круговой ДН в Н-плоскости (XOY)

В третьей главе предложен состав УКА КВЧ на основе полосковых АВВ, исследованы дисперсионные характеристики структур вытекающей волны с Н-поляризацией, разработаны методики проектирования АВВ с пониженным уровнем боковых лепестков (УБЛ) ДН и варианта многовходовой АВВ с фазовым сканированием ДН с параллельно-последовательным возбуждением. В качестве примера разработан и апробирован путем имитационного моделирования с помощью специализированной компьютерной программы Ansoft HFSS вариант УКА КВЧ на основе полосковых АВВ для полосы частот 60,5–61,5 ГГц, содержащий:

1) известные плоские АВВ нормального излучения с параллельно-последовательным возбуждением, с ДН шириной до $4^\circ \times 4^\circ$, коэффициентом усиления (КУ) до 31 дБ и УБЛ ДН в пределах $-17 \dots -12$ дБ;

2) новые плоские АВВ нормального излучения с одномерно-периодическими ДР и параллельно-последовательным возбуждением, с пониженным (до уровней не более -20 дБ) в Е- и Н-плоскостях УБЛ ДН и КУ до 27,5 дБ (рис. 3, а, б);

3) новую плоскую АВВ с параллельно-последовательным возбуждением и однокоординатным фазовым сканированием ДН в угловом секторе шириной 40° с КУ 25–28 дБ (рис. 6, а).

На рис. 3 показаны известные (базовые) модели АВВ нормального излучения, использованные для разработки антенн с пониженным УБЛ ДН.

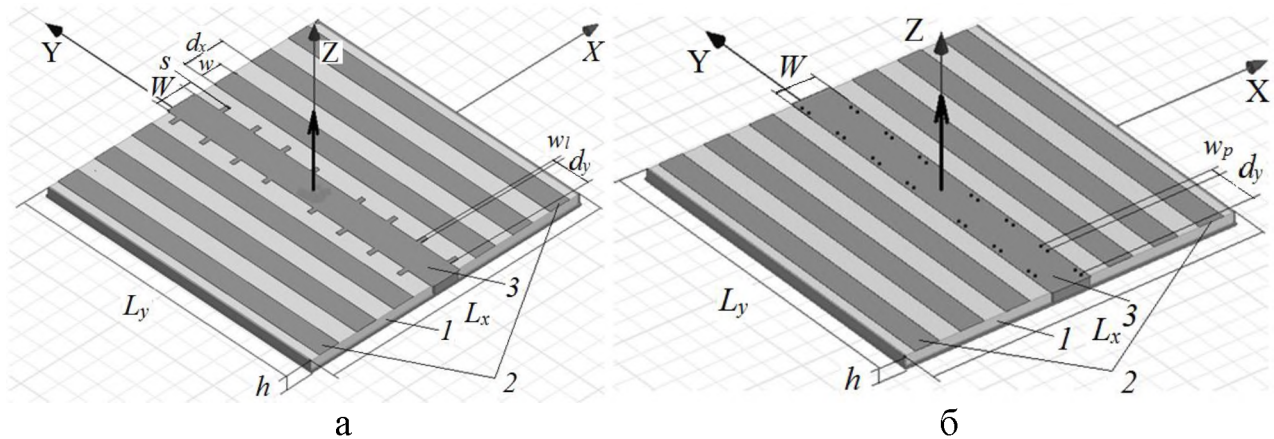


Рисунок 3 – базовые АВВ с ГПЛ (а) и АВВ с ВЩДМ (б)

Особенность новых АВВ (2) с пониженным УБЛ ДН состоит в том, что для упрощения и ускорения проектирования выбраны конструкции с фиксированными значениями шага элементов ДР излучающего раскрыва и устройств возбуждения. С одной стороны, это должно вести к снижению КНД при вариациях размеров элементов, с другой – представляет интерес в плане достижимых значений коэффициента использования поверхности (КИП) раскрыва и ответа на вопрос, стоит ли решать ресурсоемкую задачу фазирования всех излучающих элементов (что, вообще говоря, возможно только на одной частоте). На рис. 3 обозначено: 1 – экранированный ДВ с размерами $L_x \times L_y \times h$, из материала с относительной диэлектрической проницаемостью ε , с отражающими металлическими стенками на левом и правом торцах; 2 – две одномерно-периодических подрешетки из параллельных металлических полосок с варьируемой шириной w , расположенных с периодом d_x ; 3 – устройство возбуждения ДВ, в АВВ (а) выполненное в виде гребенчатой полосковой линии (ГПЛ) с шириной полоски W и боковыми выступами с варьируемой длиной s , фиксированной шириной w_l и периодом d_y , в АВВ (б) – в виде волноводно-щелевого делителя мощности (ВЩДМ), изготавливаемого по технологии SIW (Substrate Integrated Waveguide) с шириной полоски W и парами металлических столбиков, замыкающих полоску на экран, расположенных с фиксированным расстоянием между столбиками w_p и периодом d_y , с короткозамыкающими перемычками на концах полоски на расстоянии половины длины волны в ВЩДМ от центров крайних пар столбиков на средней рабочей частоте.

Предложена упрощенная методика проектирования плоской АВВ нормального излучения с Н-поляризацией, с одномерно-периодической ДР из двух симметричных подрешеток и параллельно-последовательным возбуждением с помощью ГПЛ, с пониженным УБЛ ДН, содержащая следующие процедуры:

1. Оценку размеров раскрыва $L_x \times L_y$ по заданному КУ(G) и эффективности ($\mathcal{E} = \eta \nu$) антенны на нижней рабочей частоте; η – коэффициент полезного действия (КПД), ν – КИП.

2. Выбор амплитудных распределений $A(x)$ и $A(y)$, обеспечивающих требуемый УБЛ ДН антенны в Е- и Н-плоскостях и оценку полного КИП антенны.

3. Определение зависимостей коэффициентов ослабления $\alpha(x)$ и $\alpha(y)$, обеспечивающих амплитудные распределения $A(x)$ и $A(y)$, например, для Е-плоскости

$$\alpha(x) = \frac{1}{2} \frac{|A(x)|^2}{\int_x^L (|A(x)|^2) dx + \frac{P_L}{P_0 - P_L} \int_0^L (|A(x)|^2) dx}, \quad (1)$$

где $P_0=1$ – мощность на входе; P_L – мощность на конце антенны длиной L .

4. Выбор материала ДВ (по относительной диэлектрической проницаемости ε и тангенсу угла диэлектрических потерь $\tan \delta$).

5. Определение толщины ДВ h , ширины полосок ДР w и периода их расположения d_x , обеспечивающих нормальное излучение вдоль оси OZ на средней рабочей частоте в симметричной структуре с параллельно-последовательным возбуждением, по результатам расчетов дисперсионных характеристик (ДХ) структуры ДВ+ДР с последовательным возбуждением (рис. 4).

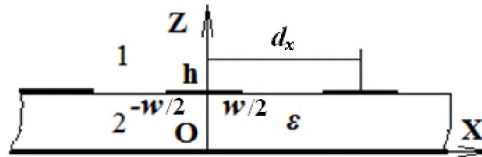


Рисунок 4 – Фрагмент структуры АВВ

ДХ строятся путем решения дисперсионного уравнения для бесконечно-протяженной структуры и определения частотной зависимости постоянной распространения основной ПГ типа TM_0 $\beta = \beta_0 - j\alpha$; β_0 – коэффициент фазы, α – коэффициент ослабления за счет излучения. Дисперсионное уравнение относительно β :

$$\text{Det}[\mathbf{G}] = 0, \quad (2)$$

где $[\mathbf{G}]$ — квадратная матрица размером $M \times M$ (M – число базисных функций $J_{xm}(x)$, например, в виде полиномов Чебышева, для разложения плотности поверхностного тока $J_x(x) = \sum_{m=1}^M \alpha_m J_{xm}(x)$ на полосках ДР), составленная из элементов $G_{ij} = \sum_{n=-N}^N K_n J_{jn} J_{in}^*$, $K_n = -\gamma_n / [j\varepsilon\gamma_n / (\eta_n \tan \eta_n h) - 1]$, ε – относительная диэлектрическая проницаемость, h – толщина ДВ; $\beta_n = \beta + 2\pi n/d_x = \beta_0 - j\alpha + 2\pi n/d_x$ – продольная постоянная распространения n -й ПГ; d_x – период ДР; $\gamma_n = (k_0^2 - \beta_n^2)^{1/2}$ и $\eta_n = (k_0^2 \varepsilon - \beta_n^2)^{1/2}$ – поперечные постоянные распространения n -й ПГ над структурой и в ДВ; $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число свободного про-

странства; λ_0 – длина волны; $J_{xmn} = \frac{1}{d_x} \int_{-w/2}^{w/2} J_{xm}(x) \exp(j\beta_n x) dx$ – n -я компонента разложения плотности тока $J_x(x)$ в ряд Фурье по ПГ.

Направление максимального излучения в пл. XOZ для $-1^{\text{й}}$ ПГ:

$$\theta_n = \arcsin(\operatorname{Re}\{\beta_n/k_0\}) = \theta_{-1} = \arcsin(p(\lambda_0) - \lambda_0/d_x), \quad (3)$$

где $\beta_0/k_0 = c/v_{\phi}(\lambda_0) = p(\lambda_0)$ – замедление фазовой скорости поверхностной волны ДВ. Не смотря на то, что в силу ограниченных размеров реальных ДВ в них возбуждаются гибридные волны типа ЕН, данная модель дает приемлемые результаты при определении частоты резонансной дифракции Брэгга второго порядка уже при размерах структуры порядка 6–7 длин волн.

6. Определение параметров переменного-фазной ГПЛ, обеспечивающих возбуждение в ДВ поверхностных волн, на средней рабочей частоте распространяющихся в направлениях $\pm OX$ при фиксированных значениях периода ГПЛ d_y .

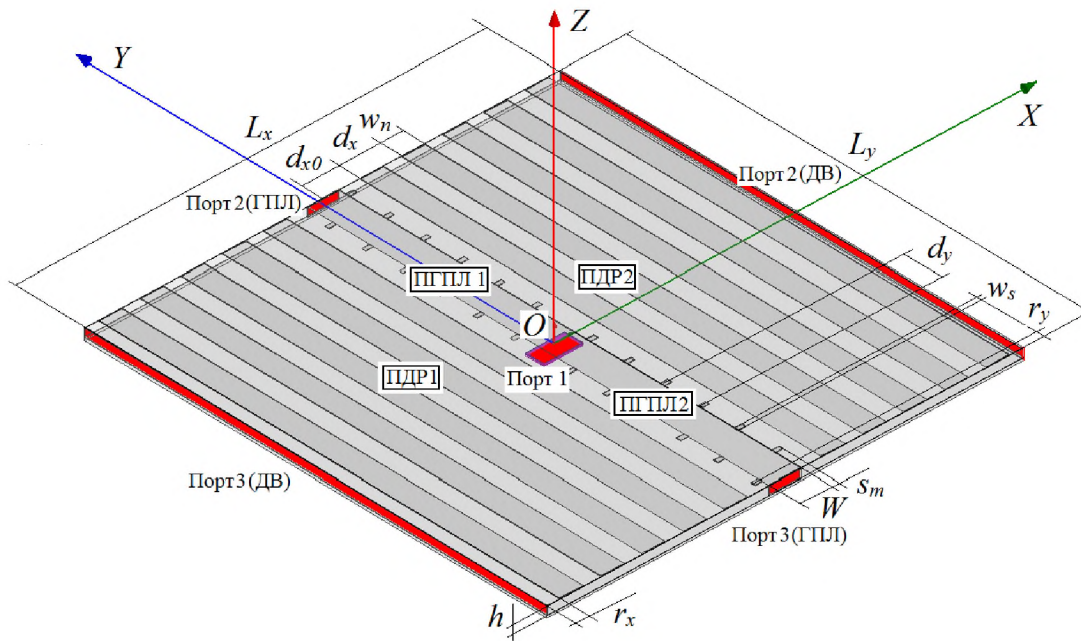


Рисунок 5 – полная модель АВВ для имитационного моделирования

7. Имитационное моделирование АВВ (рис. 5) с поочередным выделением в ее составе одной из двух симметричных трехпортовых структур с полной длиной L_x и L_y и расчета их матриц рассеяния S : 1) вход (порт 1) – торцы ДВ, без ДР и с ДР из двух подрешеток ПДР 1,2 с варьируемой шириной полосок w_n , при возбуждении ДВ с помощью ГПЛ с параметрами из п. 6; 2) вход (порт 1) – концы ГПЛ из двух подрешеток ПГПЛ 1,2, без боковых выступов и с выступами с варьируемой длиной s_m , при наличии полосковой ДР. Получение данных о зависимости коэффициента ослабления $\alpha(w)$ для излучающего раскрытия и за-

висимости $\alpha(s)$ для ГПЛ. Расчет α выполняется по найденным значениям модуля коэффициента передачи s_{21} :

$$\alpha = (2/L_{x,y}) \ln(|s_{21}|). \quad (4)$$

По зависимости $\alpha(w)$ для подрешетки ДР из N полосок выбираются значения w_n ($n=1 \dots N$), реализующие выборки α_{xn} из $\alpha(x)$, а по $\alpha(s)$ для подрешетки ГПЛ из M выступов – значения s_m ($m=1 \dots M$), реализующие выборки α_{ym} из $\alpha(y)$.

8. Имитационное моделирование антенны с новыми значениями конструктивных параметров, расчет ДН и проверка УБЛ, при необходимости принятие мер по согласованию входа антенны и коррекции размеров, включая r_x и r_y .

Результаты имитационного моделирования АВВ
в полосе частот 60,5–61,5 ГГц

Характеристики	АВВ 1 с ГПЛ	АВВ 2 с ГПЛ	АВВ с ВЦДМ
Размеры раскрыва $L_x \times L_y$, мм ²	43,6×43,6	43,6×44,6	43,6×45,0
Заданная форма $A(x)$	$\Delta + (1-\Delta)\cos(\pi x/L_x)$ $\Delta=0,316$	$\Delta + (1-\Delta)\cos(\pi x/L_x)$ $\Delta=0,316$	$\Delta + (1-\Delta)\cos(\pi x/L_x)$ $\Delta=0,316$
Заданная форма $A(y)$	$\Delta + (1-\Delta)\cos(\pi y/L_y)$ $\Delta=0,316$	$1-2 y /L_y$	$1-2 y /L_y$
КНД D_{max}/D_{min} , дБ	27,9/27,68	27,52/27,13	27,77/27,34
КСВ _{max} /КСВ _{min}	1,69/1,18	1,4/1,02	1,84/1,02
КУ G_{max}/G_{min} , дБ	27,8/27,54	27,43/27	27,62/27,25
УБЛ ДН (Е/Н), дБ	–21/–22	–22/(–25,5)	–21/–26
КИП _{теор.} /КИП _{реал.}	0,874/0,625	0,701/0,56	0,61/0,575

Из приведенных в таблице данных следует, что новые антенны имеют ДН с УБЛ в Е- и Н-плоскостях не более –20 дБ и реализованный КИП на средней частоте 61 ГГц более 0,5 (у базовой АВВ УБЛ в среднем –15 дБ и КИП 0,65), хотя и меньше теоретического, рассчитанного для непрерывных синфазно возбужденных раскрывов. Очевидно, что основными причинами этого (помимо погрешностей определения конструктивных параметров) служат отклонения реализованных амплитудных распределений от заданных из-за дискретности структуры АВВ, пространственного разнеса подрешеток ДР и ГПЛ, наличия паразитного излучения устройств возбуждения, а также заранее ожидаемого эффекта нарушения фазирования излучений элементов раскрыва при использовании периодических ДР и устройств возбуждения.

Ниже показаны варианты одномерно-периодических многовходовых АВВ (3) с фазовым сканированием ДН: с последовательным (рис. 6, а) и параллельно-последовательным (рис. 8, а) возбуждением. Фазовое сканирование осуществляется путем создания линейно-нарастающего (убывающего) сдвига фаз колебаний $\Delta\Phi$ на соседних входах. Плоская АВВ с последовательным воз-

буждением (рис. 6, а) выполнена на основе ДВ с $\varepsilon=2,1$, с размерами $A \times B \times H=43 \times 49 \times 1$ мм³; период ДР $d=4,1$ мм, ширина полосок $w=1,8$ мм. Имитационное моделирование показало, что в случае такой АВВ имеет место двухкоординатное сканирование ДН (рис. 6, б и рис. 7), что согласуется с результатами исследований других авторов.

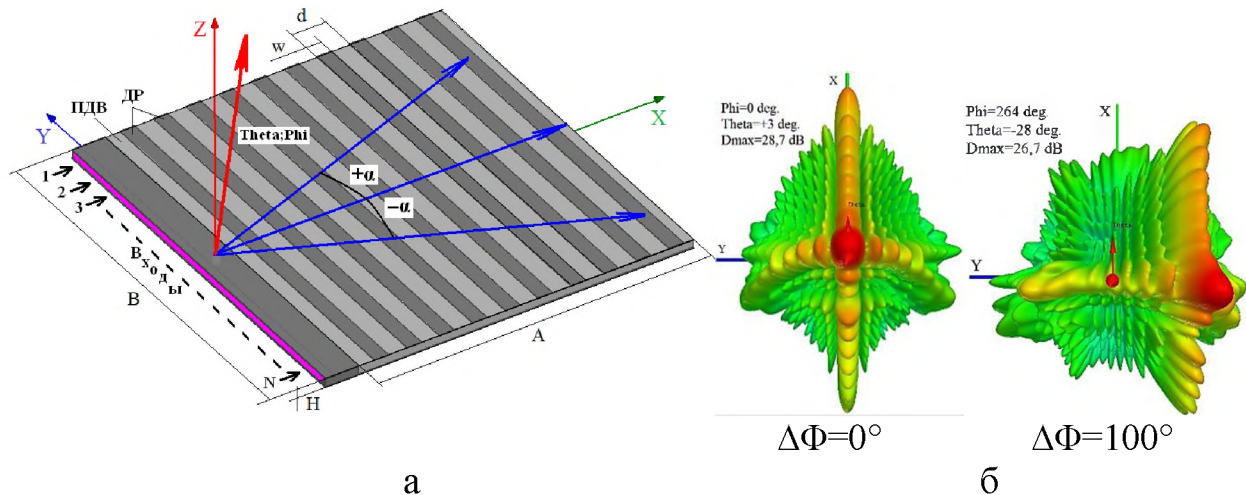


Рисунок 6 – Плоская 16-входовая АВВ с последовательным возбуждением (а) и объемные ДН антенны при фазовом сканировании (б)

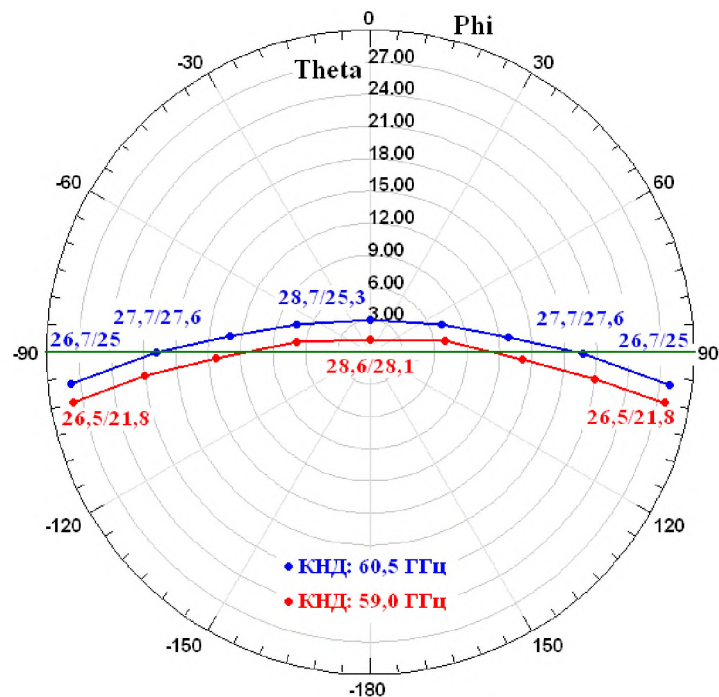


Рисунок 7 – Траектории сканирования ДН на частотах 59 и 60,5 ГГц

Таким образом, при линейном изменении фазы $\Delta\Phi$ возбуждения входов, ДН АВВ с последовательным возбуждением сканирует по дугообразной траектории (рис. 7) с заметным снижением КНД в заданной плоскости, например, YOZ . Кроме того, проявляется известный эффект резкого рассогласования антенны в окрестности частот резонансной дифракции. Поэтому из-за высокого активного КСВ при сканировании (до 10), высокого УБЛ ДН в Е- и Н-

плоскостях (до -10 дБ) имеет место значительное снижение КУ антенны в определенных направлениях. Указанные недостатки могут существенно ограничить практическое использование АВВ с последовательным возбуждением.

В этой связи основное внимание было уделено разработке антенны с фазовым однокоординатным сканированием ДН в Н-плоскости (YOZ). В качестве базовой выбрана АВВ с параллельно-последовательным возбуждением на основе симметричной ДР из двух подрешеток (рис. 8, а). Предложена методика проектирования плоской многовходовой АВВ, содержащая те же процедуры, что и изложенная выше методика проектирования АВВ нормального излучения, но отличающаяся тем, что для минимизации снижения КНД при сканировании конструктивные параметры раскрыва АВВ при синфазном возбуждении входов в рабочей полосе частот должны обеспечивать не нормальное, а наклонное излучение подрешеток в направлениях краев раскрыва в Е-плоскости (XOZ) под углом, не превышающим половину ширины ДН подрешетки. Иначе говоря, рабочая полоса частот должна располагаться выше частоты нормального излучения при синфазном возбуждении входов.

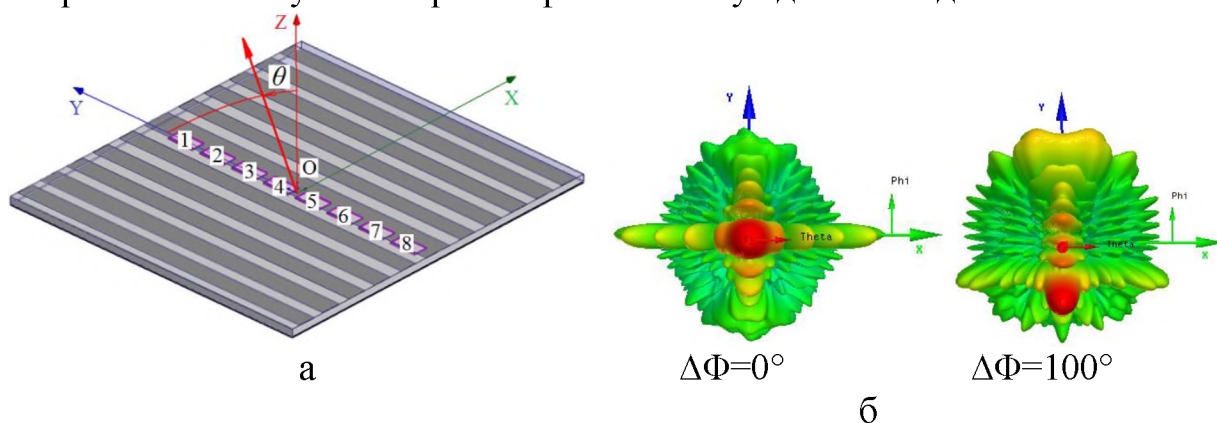


Рисунок 8 – Плоская 8-входовая одномерно-периодическая АВВ с параллельно-последовательным возбуждением (а), объемные ДН антенны при фазовом сканировании в секторе $\pm 18^\circ$ (б)

С использованием описанной методики разработана 8-входовая одномерно-периодическая АВВ на основе ДВ из материала RogersRT/Duroid 5880, $\varepsilon=2,2$, $A \times B \times H = 43,6 \times 40 \times 0,79$ мм³; $d = \text{const} = 3,8$ мм, $w = \text{var}$, расстояние между входами 4,5 мм. Имитационное моделирование антенны показало, что при синфазном возбуждении входов в полосе частот 60–62 ГГц КСВ не более 1,9; на частоте 61 ГГц $D_{\min} = 27,1$ дБ, $G_{\min} = 25,8$ дБ; $D_{\max} = 28,7$, $G_{\max} = 28,7$ дБ, УБЛ ДН в Е-плоскости не более -17 дБ. Антенна отличается простой и технологичной конструкцией и обеспечивает сканирование ДН в угловом секторе до 42° при сдвиге фаз $\Delta\Phi = 120^\circ$. При указанном выше расстоянии между входами при их равноамплитудном возбуждении в полосе частот 60–62 ГГц УБЛ ДН в плоскости сканирования не превышает -10 дБ, а минимальный КНД составляет 25 дБ при активном КСВ не более 3.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о технической реализуемости первого предложенного УКА КВЧ на основе плоских АВВ.

В четвертой главе предложен состав многофункционального УКА КВЧ на основе базовой МКА с круговой ДН (рис. 2), разработан вариант реализации УКА из шести антенн для полосы частот 60–62 ГГц, приведены результаты их имитационного моделирования. Базовая МКА с КУ 6,3 дБ, КСВ $\leq$ 1,5 и УБЛ ДН в Е-плоскости (ширина ДН 17°) не более –19 дБ выполнена на подложке размерами 24×2 мм² из материала Rogers4003С ($\epsilon=3,55$, $tg\delta=0,0027$) толщиной 0,305 мм. Для построения компонент УКА предложен подход, основанный на известном способе увеличения направленности за счет применения рефлектора, позволивший реализовать новый комплекс компактных высокотехнологичных антенн, обеспечивающих формирование:

- круговой ДН (одиночная МКА), а также цилиндрические антенные решетки (ЦАР) из восьми МКА без рефлектора с радиусом 2,3 мм или с призматическим (цилиндрическим) рефлектором с радиусом 3,9 мм (рис. 9, а, б); КУ 8...9 дБ, УБЛ (Е): –13 дБ, активный КСВ по всем входам не более 2,6);
- секторной ДН (МКА с линейным рефлектором с размерами 26×3×0,5 мм³, установленным с зазором 1,3 мм; КУ не менее 10,5 дБ, УБЛ ДН в Н-плоскости не более –13 дБ, ширина ДН в Е- и Н-плоскостях 15° и 170°, уровень заднего излучения не более –23 дБ, КСВ $\leq$ 1,5);
- секторной ДН с круговым фазовым или дискретно-коммутационным сканированием в одной плоскости (ЦАР из восьми МКА без рефлектора или с призматическим (цилиндрическим) рефлектором (рис. 9, а, в); КУ 10...14 дБ, УБЛ ДН (Е/Н): –13/–10 дБ, ширина ДН в Е-плоскости 15°, ширина ДН в Н-плоскости 100° или 50°, активный КСВ по всем входам не более 2,2);
- двунаправленной фиксированной или сканирующей ДН в одной плоскости в ограниченном угловом секторе (плоская решетка из восьми МКА);
- однонаправленной фиксированной или сканирующей ДН в одной плоскости в ограниченном угловом секторе (плоская решетка из восьми МКА с плоским рефлектором (рис. 10, а, б); с размерами 26,5×24×2,1 мм³, КУ 21,7...22,6 дБ, УБЛ ДН (Е/Н): –16,5/–13 дБ, ширина ДН в Е- и Н-плоскостях 15° и 10°, сектор сканирования до $\pm 25^\circ$ при активном КСВ по всем входам не более 2,4).

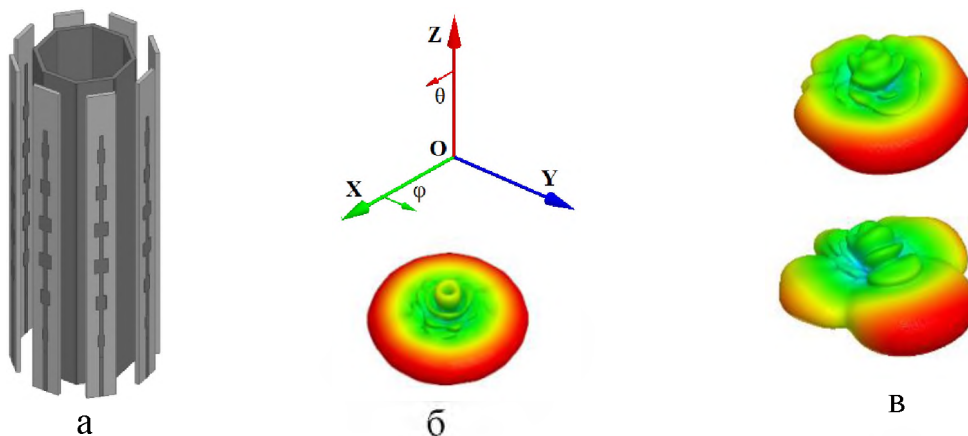


Рисунок 9 – ЦАР с рефлектором (а), круговая ДН (б), примеры ДН при сканировании (в)

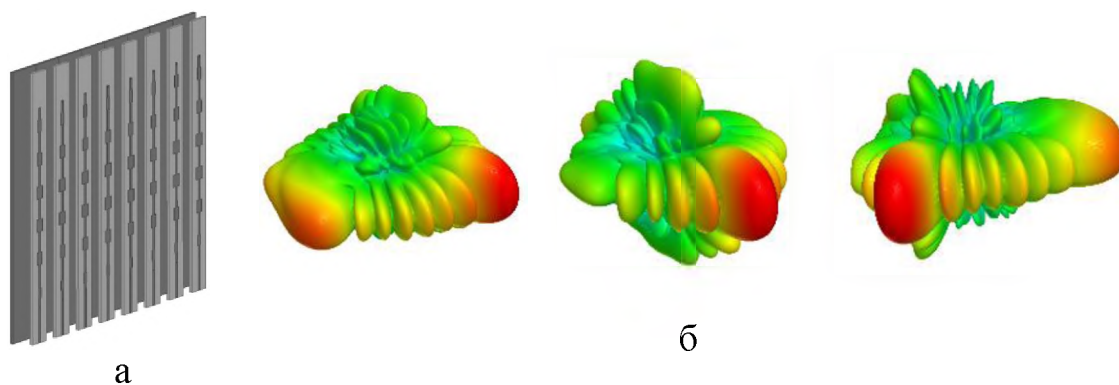


Рисунок 10 – Плоская антенная решетка с рефлектором (а) с однокоординатным фазовым сканированием ДН, примеры ДН (б)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о технической реализуемости второго предложенного УКА КВЧ на основе МКА с круговой диаграммой направленности.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложены два многофункциональных унифицированных комплекса антенн КВЧ с фиксированной или сканирующей диаграммой направленности различной формы, построенных на основе единых базовых элементов – полосковой антенны вытекающей волны в виде структуры с диэлектрическим волноводом и полосковой дифракционной решеткой и микрополосковой коллинеарной антенны с круговой диаграммой направленности.

2. Разработана и апробирована методика проектирования плоской полосковой антенны вытекающей волны нормального излучения с Н-поляризацией с устройством возбуждения диэлектрического волновода в виде переменноразной гребенчатой полосковой линии, использующая имитационное моделирование выделенных в антенне трехпортовых структур и определение коэффициентов ослабления с учетом конечных размеров антенны и взаимного влияния ее элементов, позволяющая реализовать антенну в виде экранированного диэлектрического волновода и одномерно-периодической полосковой дифракционной решетки с варьируемой шириной полосок и гребенчатой полосковой линии с варьируемой длиной боковых выступов, с уровнем боковых лепестков диаграммы направленности в Е- и Н-плоскости не более -20 дБ.

3. Разработаны и апробированы путем имитационного моделирования рекомендации по использованию для возбуждения диэлектрического волновода устройств в виде переменноразной гребенчатой полосковой линии или волноводно-щелевого делителя мощности с постоянными конструктивными параметрами, обеспечивающие реализацию плоской полосковой антенны вытекающей волны нормального излучения с Н-поляризацией с уровнем боковых лепестков диаграммы направленности в Н-плоскости не более -25 дБ.

4. Разработана и апробирована путем имитационного моделирования методика проектирования многовходовой плоской полосковой антенны вытекающей волны с Н-поляризацией на основе структуры с одномерно-периодической полосковой дифракционной решеткой и параллельно-последовательным возбуждением раскрыва с конструктивными параметрами при синфазном возбуждении входов, обеспечивающими в рабочей полосе частот наклонное излучение в Е-плоскости под углом, не превышающим половину ширины ДН, позволяющая реализовать антенну с однокоординатным фазовым сканированием ДН в Н-плоскости с минимальным снижением КНД в угловом секторе шириной не менее 40° .

5. Разработаны и апробированы путем имитационного моделирования два многофункциональных унифицированных комплекса антенн КВЧ с фиксированной или сканирующей диаграммой направленности различной формы, построенных на основе одно- и многовходовой плоской антенны вытекающей волны в виде структуры с диэлектрическим волноводом и одномерно-периодической полосковой дифракционной решеткой и микрополосковой коллинеарной антенны с круговой диаграммой направленности.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Кузнецов, А. В. Характеристики сканирования антенны вытекающей волны / М. А. Галуза, А. И. Климов, А. В. Кузнецов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2018. – № 4. – С. 119–129.

2. Кузнецов, А. В. Унифицированный комплекс антенн для радиосистем диапазона КВЧ / А. И. Климов, А. В. Кузнецов, Ю. Б. Нечаев // Вестник Воронежского института МВД России. – 2018. – № 4. – С. 130–138.

3. Кузнецов, А. В. Антенная решетка терагерцового диапазона / А. И. Климов, А. В. Кузнецов, Ю. Б. Нечаев // Вестник Воронежского института МВД России. – 2018. – № 1. С. 66–72.

4. Кузнецов, А. В. Плоская антенная решетка диапазона КВЧ с высоким коэффициентом усиления / Д. А. Ерошенко, А. И. Климов, А. В. Кузнецов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2017. – № 4. – С. 175–181.

5. Кузнецов, А. В. Оптимизация излучающего раскрыва плоской сканирующей антенны вытекающей волны / Д. А. Ерошенко, А. И. Климов, Ю. Б. Нечаев, А. В. Кузнецов // Радиотехника. – 2016. – № 5. – С. 54–57.

6. Кузнецов, А. В. Анализ дисперсионных характеристик периодических структур вытекающей волны / Д. А. Ерошенко, А. И. Климов, Ю. Б. Нечаев, А. В. Кузнецов // Радиотехника. – 2016. – № 5. – С. 58–66.

7. Кузнецов, А. В. Компактные линейные и плоские антенные решетки для систем радиосвязи диапазона КВЧ / А. И. Климов, А. В. Кузнецов, Ю. Б. Нечаев // Теория и техника радиосвязи. – 2016. – Вып. 2. – С. 70–78.

Работы, опубликованные в сборниках трудов конференций:

8. Кузнецов, А. В. Сравнительный анализ характеристик плоских антенных решеток КВЧ / Охрана, безопасность, связь – 2017: сб-к статей. – Вып. 3. –

Часть 2. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2017. – С. 63–66.

9. Кузнецов, А. В. Плоская сканирующая антенна вытекающей волны / А. В. Кузнецов // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: сборник трудов XVIII Международной научно-технической конференции (20–24 ноября 2017 г.). В 2-х томах. – Казань : 2017. – Т. 2. – С. 150–153.

10. Кузнецов, А. В. Плоские антенны вытекающей волны СВЧ и КВЧ с пониженным уровнем бокового излучения / А. В. Кузнецов // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: сборник трудов XVIII Международной научно-технической конференции (20–24 ноября 2017 г.). В 2-х томах. – Казань : 2017. – Т. 2. – С. 154–157.

11. Кузнецов, А. В. Эффективность излучения плоских антенн вытекающей волны / А. В. Кузнецов // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы XVI Международной научно-технической конференции (10–14 сентября 2018 г.). – Миасс : 2018. – С. 82–84.

12. Кузнецов, А. В. Линейные антенные решетки диапазона миллиметровых волн / А. В. Кузнецов // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы XVI Международной научно-технической конференции (10–14 сентября 2018 г.). – Миасс : 2018. – С. 84–86.

13. Кузнецов, А. В. Антенны вытекающей волны терагерцового диапазона / А. В. Кузнецов, А. И. Климов, Ю. Б. Нечаев // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции (17–19 апреля 2018 г.). В 5-и томах. – Воронеж : 2018. – Т. 4. – С. 13–18.

14. Кузнецов, А. В. Сравнительный анализ сканирующих антенных решеток диапазона КВЧ / А. В. Кузнецов, А. И. Климов, Ю. Б. Нечаев // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции (17-19 апреля 2018 г.). В 5-и томах. – Воронеж : 2018. – Т. 4. – С. 256–266.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

15. Программа расчета углов прихода сигнала плоской АР / А. В. Кузнецов, С. И. Тюленев, Н. А. Семенихин. Номер регистрации (свидетельства) : 2019611219. Дата регистрации: 23.01.2019. Номер и дата поступления заявки: 2019610228 09.01.2019. Дата публикации и номер бюллетеня: 23.01.2019 Бюл. № 2.

16. Программа расчета углов прихода сигнала конформной АР / А. В. Кузнецов, С. И. Тюленев, Н. А. Семенихин. Номер регистрации (свидетельства) : 2019611391. Дата регистрации: 25.01.2019. Номер и дата поступления заявки: 2019610188 09.01.2019. Дата публикации и номер бюллетеня: 25.01.2019 Бюл. № 2.

Подписано в печать 05.04.2019 г. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ № 74.

Отпечатано в типографии ООО ИПЦ «Научная книга»
394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 116