

На правах рукописи



Коноваленко Максим Олегович

**ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК ДЛЯ
МАЛОГАБАРИТНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск, 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) и АО «Научно-производственная фирма «Микран» (АО «НПФ «Микран»)

Научный руководитель: **Буянов Юрий Иннокентьевич**
кандидат физико-математических наук,
доцент

Официальные оппоненты: **Горбачёв Анатолий Петрович**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет» (НГТУ),
г. Новосибирск

Балзовский Евгений Владимирович
кандидат физико-математических наук,
ФГБУН «Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии
наук» (ИСЭ СО РАН), г. Томск

Ведущая организация: АО «Российские космические системы» (РКС),
г. Москва

Защита диссертации состоится «20» декабря 2019 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники и на сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/cjy9ug6a>

Автореферат разослан « ____ » ноября 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.268.01
доктор физ.-мат. наук, профессор



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Основными узлами радиолокационных станций (РЛС) являются приёмо-передающий или приёмный модуль, плата обработки сигналов, антенное устройство. В качестве последнего узла всегда выступают антенные решётки (АР) или апертурные антенны в связи с высокими требованиями на направленные и энергетические характеристики. Для того чтобы повысить дальность действия любой РЛС или её чувствительность на заданном расстоянии необходимо улучшить соотношение сигнал/шум, что можно достичь несколькими способами. Первое – увеличить мощность излучения, второе – уменьшить коэффициент шума. Оба способа имеют свои сложности реализации и ограничения применимости в конкретном случае.

Увеличение мощности излучения в зависимости от диапазона частот, особенно начиная с Ку-диапазона, нередко сопровождается большими потерями на выделение джоулевого тепла по причине малого коэффициента полезного действия (КПД) твердотельных усилителей, которое необходимо отводить во избежание перегрева. Требуется проектирование мощных источников питания с внутренней защитой по току и индикацией выхода из строя, особенно в многоканальных активных фазированных антенных решётках (АФАР), стоимость которых составляет десятки, сотни долларов за один канал. В случае использования магнетронных генераторов удаётся увеличить КПД, но все магнетронные установки имеют существенные габаритные размеры в сравнении с твердотельными полупроводниковыми кристаллами, а также очень дороги в обслуживании, что ограничивает их применение в малогабаритных РЛС и полностью исключает в мобильных радарх. Кроме того максимально допустимая эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) ограничивается нормативными актами государственной комиссии по радиочастотам. Недостаточный уровень развязки между приёмной и передающей антенной в радарх с непрерывным излучением без дополнительных мер компенсации вызывает перегрузку приёмного тракта и, как следствие, снижение чувствительности или полное отсутствие радиолокационного изображения при околонулевом динамическом диапазоне.

Коэффициент шума РЛС определяется двумя составляющими. Первая – приёмный тракт, в состав которого входит активный элемент в виде малошумящего усилителя (МШУ) с собственным коэффициентом шума, и пассивные элементы в виде различных сверхвысокочастотных (СВЧ) узлов, таких как сумматоры, направленные ответвители и т.п., диссипативные потери которых складываются и формируют общий уровень шума на выходе приёмника. Вторая – приёмная антенная решётка. Потери мощности радиоволны после её преобразования в ток высокой частоты и прохождения определённого пути

распространения до приёмника напрямую увеличивают коэффициент шума. В связи с этим, обязательно уменьшение потерь в пассивной антенне, так как её расположение перед приёмным трактом определяет не только его коэффициент шума, но и коэффициент усиления передающей части РЛС.

В итоге минимизация диссипативных потерь в АР с широкими границами диапазонных свойств остаётся важнейшей задачей при разработке РЛС, даже в случае использования АФАР. Наиболее остро данная проблема встаёт в РЛС с пассивными антенными системами апертурой в десятки длин волн. Приходится находить компромиссное решение между энергетическим потенциалом системы, качеством направленных свойств и рабочим диапазоном частот, что, как правило, осложняется высокими требованиями на уровень боковых лепестков (УБЛ), выполнение которых значительно снижает коэффициент усиления АР на $3 \div 6$ дБ, в некоторых случаях и более.

Состояние вопроса. Радиолокационные системы как основные комплексы обнаружения, слежения и определения типа целей на каждом ключевом этапе своего развития всегда используют самые современные достижения в области радиофизики, электроники, материаловедения и физической химии. Начиная с 50-х годов прошлого века до конца столетия, была развита основная теория радиолокации и антенн, включающая в себя статистическую радиофизику, физику волновых процессов, излучения и распространения радиоволн. До сегодняшнего времени прогресс в этой сфере не остановился. Причиной тому служат новые технологии производства сверхвысокоскоростных систем вычисления и обработки данных и усовершенствованные математические системы автоматизированного проектирования электронных узлов, позволяющие получать самые различные характеристики передачи и излучения, в том числе параметры обратного пространственного рассеяния сложнейших многогранных целей, что сверхактуально при разработке РЛС, способных обнаруживать сверхмалоразмерные цели; развитые способы оптимизации электродинамических численных методов, а также формирование целого инженерного направления по расчёту и производству активных / пассивных СВЧ устройств с высочайшим уровнем качества параметров, что ранее было недоступно.

Построение сложных антенных систем, как и любая прикладная техническая задача, сопровождается не только физическими ограничениями, но и уровнем развития конкретных возможностей реализации. За последние два десятка лет большой шаг сделали наукоёмкие производства конструкционных пластиков, всевозможных видов органических и неорганических подложек печатных СВЧ плат от S до V диапазона, а также технологии производства сложных многослойных диэлектрических структур с нанесённой топологией, в том числе SIW структур. Высокоточные обрабатывающие станки с числовым программным

управлением позволяют добиваться размеров с отклонением не более нескольких единиц или десятков микрон в зависимости от метода формообразования поверхности детали и её длины. Это позволило сделать интенсивный шаг в проектировании антенн РЛС следующих поколений, но по факту является лишь потенциальной возможностью нового скачка серийного выпуска таких систем, способных вместить в себя все последние достижения науки и техники.

В настоящее время существуют антенны, имеющие те или иные достоинства в зависимости от способа возбуждения и типа волны. Антенны последовательного питания обычно имеют увеличенный энергетический потенциал в сравнении с антеннами параллельного питания. Это связано со значительно меньшим расстоянием пути прохождения СВЧ сигнала и его затухания до излучателей, что наиболее ярко выражается в узконаправленных решётках. В свою очередь исключительно последовательное питание сильно сужает полосу пропускания в случае требования синфазного раскрытия с лучом ортогональным его плоскости. Использование резонансных антенных решёток на стоячей волне позволяет достичь лучших усиливающих свойств по причине отсутствия рассеяния части мощности в концевых согласованных нагрузках, но такой режим работы антенны уменьшает её полосу согласования в разы по сравнению с нерезонансными антеннами бегущей волны.

Известен способ улучшения энергетического потенциала АР, при котором часть апертуры включает в себя интегрированные усилители мощности или МШУ. Такая антенна не является АФАР, так как не содержит независимые каналы управления амплитудой и фазой, а имеет один общий вход / выход, поэтому направление луча электрически строго задано для единственного углового положения. Распределённый по апертуре набор активных элементов компенсирует диссипативные потери, что позволяет улучшить не только чувствительность радара, но и снизить максимальную выходную мощность каждого усиливающего элемента из набора в несколько раз по сравнению с использованием одного равнозначного усилителя, расположенного на общем входе решётки. Но введение распределённого усиления имеет недостаток касательно обеспечения заданного фазового фронта и его стабильности в температурных режимах.

Цель работы. Разработка гибридной системы питания планарных широкополосных антенных решёток с повышенным уровнем КПД и значением первого бокового лепестка не более -25 дБ, пригодных для использования в малогабаритных РЛС вплоть до К-диапазона частот.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

1. Определение и выбор амплитудного распределения, обеспечивающего практически ожидаемый УБЛ по заданному критерию.

2. Расчёт геометрических размеров антенной решётки, обеспечивающих заданные направленные свойства в каждой плоскости с допуском на возможную неточность получения итогового результата.

3. Разработка антенного элемента решётки, пригодного для печатного исполнения.

4. Разработка печатной платы антенной решётки и расчёт её топологии.

5. Разработка волноводной неравновесной системы деления в H-плоскости с переходом на печатную топологию антенной решётки.

6. Расчёт и моделирование антенной системы, состоящей из передающей и приемной антенных решёток с уровнем развязки не менее -50 дБ, расположенных в общей плоскости.

7. Практическая реализация планарной антенной системы с последующим измерением её S-параметров, диапазонных и направленных характеристик.

Методы исследований

- При расчёте антенной решётки использовался программный пакет MathCAD 14 с применением известных математических соотношений.

- Для максимально точного расчёта антенной решётки в непрерывной полосе частот при проектировании использовался численный метод конечных разностей, реализованный в программном электродинамическом пакете CST Microwave Studio 2016.

- Экспериментальные исследования проводились в полевых условиях открытого полигона НИИ РТС, ТУСУР и в лабораторных условиях безэховой камеры АО «НПФ «Микран».

Научные положения, выносимые на защиту

1. Использование коллинеарных щелевых излучающих структур позволяет упростить систему питания, уменьшить диссипативные потери, а также на величину до 3 дБ увеличить коэффициент усиления двухмерных антенных решёток в сравнении с микрополосковыми структурами.

2. Использование в питающей линии антенной решётки чётного числа точек возбуждения с заданными амплитудами, разнесенных на расстояния, кратные электрической длине волны, позволяет управлять амплитудным распределением с отклонением от заданного не более 1,0 дБ.

3. Применение гибридной системы питания, объединяющей преимущества волноводных устройств, печатных технологий и последовательно-параллельных схем возбуждения, увеличивает эффективность антенных решёток, обеспечивает коэффициент полезного действия не хуже 0,7 и улучшает диапазонные свойства относительно стандартных решений при апертурах до 20 длин волн.

Достоверность результатов. Достоверность первого научного положения доказана результатами расчётов, численного моделирования и экспериментальных исследований.

Второе научное положение подтверждено совпадением заданной реализации амплитудного распределения и рассчитанной путём численного моделирования. Измеренная ДН повторяет форму и свои числовые параметры во всей рабочей полосе частот, обусловленной диапазонными свойствами исследуемой гибридной системы питания решёток.

Третье научное положение подтверждено результатами измерений диапазонных и направленных свойств разработанной антенной системы малогабаритной РЛС X-диапазона.

Все результаты, полученные в ходе работы, объединены рядом теоретических оценок и более строгих расчётов, полученных аналитическими и численными методами соответственно, а также измеренными параметрами в ходе экспериментальных исследований в ближней и дальней зоне.

Научная новизна

- Переход от линейной микрополосковой излучающей структуры к коллинеарной щелевой излучающей структуре позволяет дополнительно увеличить коэффициент усиления такой системы до 3 дБ.

- Использование в распределительной системе волноводного направленного ответвителя с инвертированными прямым и побочным каналами позволяет добиться частотной неравномерности амплитудного взвешивания не более 0,3 дБ и стабильности разности фаз коэффициентов передачи не хуже $\pm 3,0^\circ$ во всей выделенной полосе 300 МГц, занимаемой радаром.

- Гибридная система питания позволяет обеспечить полосу пропускания антенной решётки с КПД не менее 0,7 для малогабаритных радаров, использующих широкополосные зондирующие сигналы.

Практическая значимость работы

- Применение коллинеарной щелевой топологии для реализации печатной двухмерной антенной решётки позволяет использовать прямолинейную возбуждающую структуру без использования разветвлений.

- Применение коллинеарной щелевой топологии упрощает реализацию её возбуждения относительно эквивалентной микрополосковой структуры ввиду отсутствия необходимости введения симметрирующего устройства.

- Предложенная гибридная система питания с совмещением печатной и волноводной реализации позволяет существенно снизить общие энергетические потери, особенно для микрополосковых антенных решёток размером более десяти длин волн, где основной вклад в уменьшение КПД вносит система деления, расположенная на диэлектрической подложке.

- Использование технологии печатных плат и волноводной системы деления позволяет с высокой повторяемостью получать заданные характеристики антенной решётки без необходимости проведения электрических измерений, что в свою очередь снижает себестоимость серийного продукта при условии высокого качества сборки.

- Разработанная для малогабаритной РЛС серийного выпуска планарная антенная система X-диапазона обеспечивает уровень первого бокового лепестка не более -25 дБ в Е-плоскости, коэффициент усиления не менее $28,5$ дБ при ширине луча $(4,0 \times 7,5)^\circ$.

Внедрение результатов работы

- Разработанная планарная антенная решётка X-диапазона с гибридной системой питания входит в состав антенной системы мобильного радара контроля и охраны периметра «Hunter» производства АО «НПФ «Микран».

- Предложенный тип непрерывной щелевой топологии стоячей волны с множественными точками включения последовательного питания использован при проектировании и реализации печатной антенной решётки K-диапазона дорожного радара разработки АО «НПФ «Микран».

Апробация результатов работы. Представленные материалы диссертационной работы докладывались на следующих международных и российских конференциях: 3-я, 5-я и 6-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, Россия, 2010, 2013 и 2015); 7-я Всероссийская научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (Томск, Россия, 2011); XIII IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (Астана, Казахстан, 2017); IEEE Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (Екатеринбург, Россия, 2018); 28-я Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Россия, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них: 5 статей, входящих в журналы из перечня ВАК; 4 доклада в трудах международных и всероссийских конференций, где 1 – индексируется Web of Science Core Collection, 2 – индексируются Scopus; 2 отчёта о НИР; 2 патента РФ на полезную модель.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации, представленные в защищаемых научных положениях, получены лично автором. Проведены все необходимые теоретические, численные расчёты и эксперименты для получения соответствующих эмпирических данных. Обработка и анализ результатов обсуждались с научным руководителем.

При прямом участии автора пройдены все этапы составления конструкторской документации (КД) для производства необходимых деталей, сборочных единиц и завершения реализации законченной антенной системы малогабаритной РЛС серийного выпуска.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и четырёх приложений. Общий объём работы составляет 151 страницу, включая 82 рисунка, четыре таблицы и список литературы из 133 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику диссертационной работы, обосновывается актуальность, определяется тематика и формулируется цель работы, излагаются основные задачи исследования и научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорно-аналитический характер. Вводится понятие малогабаритных РЛС. Рассматриваются известные подходы построения способов питания АР, отличия их диапазонных и направленных свойств. Также в отдельный раздел вынесены зеркальные антенны, так как их энергетический потенциал один из самых высоких при всех остальных схожих параметрах с пассивными решётками. Представлена научно-техническая разработка АО «НПФ «Микран» сверхширокополосного активного облучателя круговой поляризации в трёх исполнениях для соответствующих частотных диапазонов шириной не менее октавы. Некоторые антенны, используемые на гражданском и военном рынке малогабаритных РЛС, сведены в краткую таблицу. В заключение главы сформулирована общая задача в отношении гибридной системы питания.

Во второй главе вводится понятие гибридной системы питания с соответствующими *характерными признаками АР* для обеспечения лучших диапазонных и направленных свойств, а также массогабаритов при высокой повторяемости электрических параметров без дополнительной настройки:

1. Печатная топология излучающей части.
2. Режим стоячей волны.
3. Коллинеарное расположение излучателей.
4. Последовательное питание излучателей с разбиением на параллельно возбуждаемые участки апертуры.
5. Волноводная распределительная система деления мощности параллельных апертур.

Совокупность указанных признаков позволяет получить ряд качественно *новых свойств* при комплексном подходе рассмотрения АР как гибридной

радиоизлучающей системы, объединяющей особенности различных типов антенн и принципов их построения:

1. Планарность конструкции с использованием печатной и металлообрабатывающей технологии.
2. Максимальный отбор подводимой мощности, при заданном законе амплитудного распределения.
3. Повышенный КПД двумерной печатной топологии при прямолинейной системе последовательно-параллельного деления.
4. Расширенная полоса пропускания.
5. Уменьшенные потери распределительной системы деления, задающей амплитудные веса возбуждения.

Реализация всех характерных признаков АР рассмотрена на примере широкополосной антенной системы для малогабаритной РЛС X-диапазона.

Прототипы коллинеарных структур, как правило, основанные на антенне Франклина, возбуждаются волной электрического тока. Это приводит к всенаправленному излучению в плоскости ортогональной плоскости решётки, что может иметь негативные последствия при построении двумерного массива из набора коллинеарных антенн. Новая решётка, содержащая излучатель магнитного типа, возбуждаемого волной эквивалентного магнитного тока (Рисунок 1), обладает обуженной ДН из-за свойств поляризации и соответственно увеличенным значением КУ на $3 \div 4$ дБ без рефлектора и $1,5 \div 2$ дБ с рефлектором (Рисунок 2).

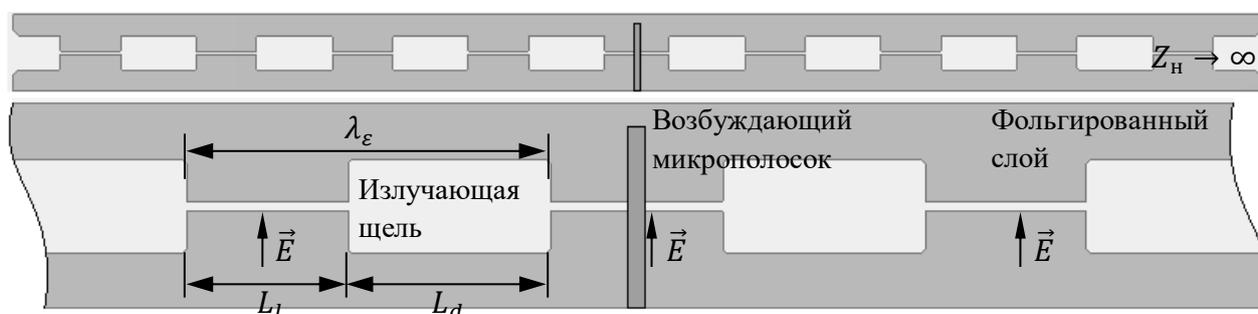


Рисунок 1 – Вид предложенной печатной коллинеарной антенны щелевого типа, возбуждаемой эквивалентным магнитным током, с последовательно-параллельным питанием

Синфазность возбуждения рассматриваемых последовательных щелевых элементов предложенной периодической структуры достигается правильным выбором параметров линии питания длиной L_l с постоянной распространения γ_l и щели L_d , γ_d . Должно выполняться следующее равенство при центральной частоте f_0 и длине волны в подложке λ_ϵ :

$$\gamma_l L_l + \gamma_d L_d = \frac{\lambda_\epsilon}{L_l + L_d} \quad (1)$$

Разомкнутые крайние щели, сопротивление нагрузки которых $Z_H \rightarrow \infty$, образуют режим стоячей волны в соответствии со вторым характерным признаком АР.

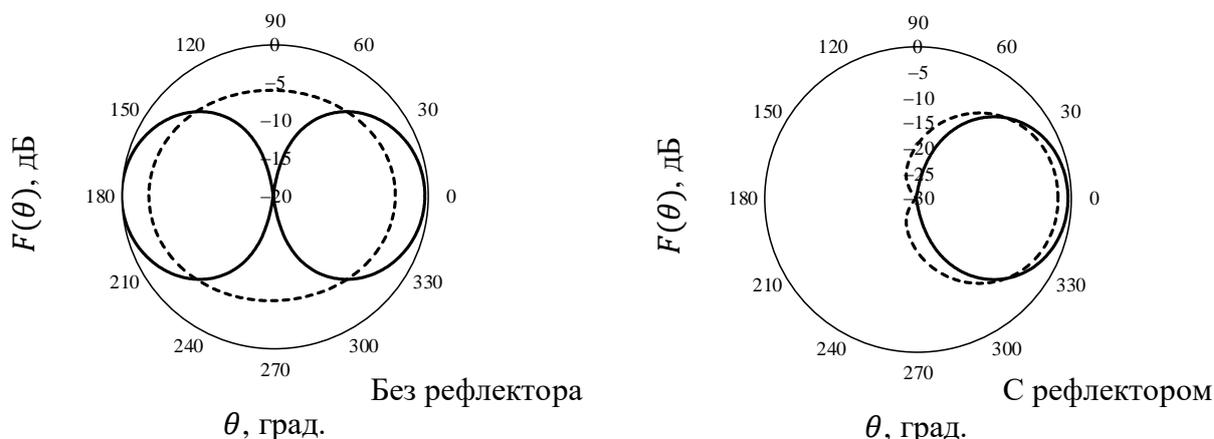


Рисунок 2 – ДН в плоскости ортогональной плоскости решётки для предложенной коллинеарной антенны щелевого типа с волной эквивалентного магнитного тока (сплошная линия) и микрополоскового типа с волной электрического тока (пунктирная линия)

Последовательно-параллельное возбуждение рассматриваемой коллинеарной решётки с включением микрополоска, как указано на Рисунке 1, существенно уменьшает частотную зависимость углового положения максимума ДН. Использование одной точки параллельного возбуждения обусловлено невысокой протяжённостью последовательной апертуры. Критерий выбора максимальной длины последовательного участка, заданный формулой (2), обусловлен природной закономерностью электромагнитных волн наклонять свой фазовый фронт от дискретно расположенных источников при изменении частоты:

$$|\theta_{0f}| = \left| \sin \left(\frac{\gamma - 2\pi d}{k} \right) \right| < \Delta\theta_{\text{пп}}/2 = \frac{51}{2} \frac{\lambda}{N_{\text{пп}} d} d\theta, \quad (2)$$

где θ_{0f} – направление луча апертуры последовательного питания при изменении частоты, $\Delta\theta_{\text{пп}}$ – ширина луча апертуры последовательного питания на центральной частоте, $d\theta$ – коэффициент расширения луча при введении определённого амплитудного взвешивания, $N_{\text{пп}}$ – количество последовательно возбуждаемых элементов, d – шаг решётки.

Соотношение угла наклона, прямо связанное с направлением максимума ДН, и её полуширины, зависящей от длины апертуры, позволяет производить оценку максимально допустимой расстройки частоты, при которой не происходит раздвоение луча. В случае контроля не только формы основного луча, но и УБЛ с ближайших направлений стоит отступить от критической границы дополнительно на 5%. Графическая интерпретация критерия (2) в рассматриваемом варианте АР продемонстрирована Рисунком 3, построенного при двух значениях последовательного числа элементов $N_{\text{пп}1}$, $N_{\text{пп}2}$.

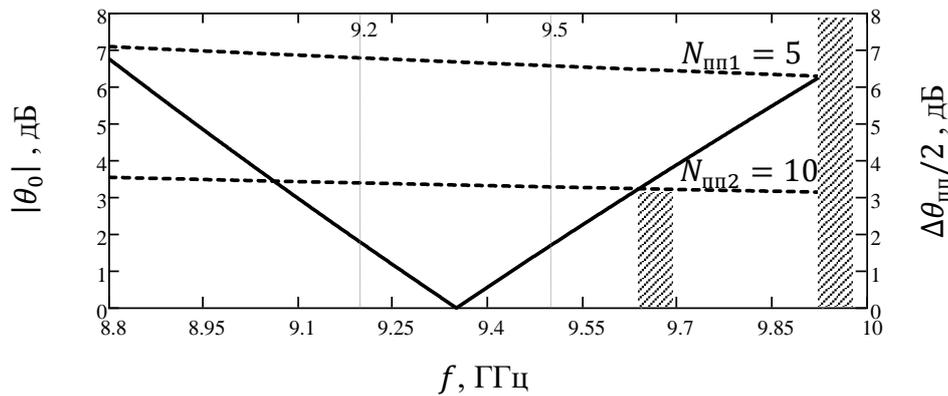


Рисунок 3 – Графическое решение выбора длины последовательной апертуры. (сплошная линия – направление максимума ДН, пунктирная линия – полуширина ДН)

Печатная топология рассматриваемой АР расположена на подложке Ro4003 толщиной 0,813 мм над рефлектором при расстоянии 4,6 мм. Общий вид представлен на Рисунке 4. Верхний и нижний слои показаны одновременно с контуром волноводной распределительной системы.

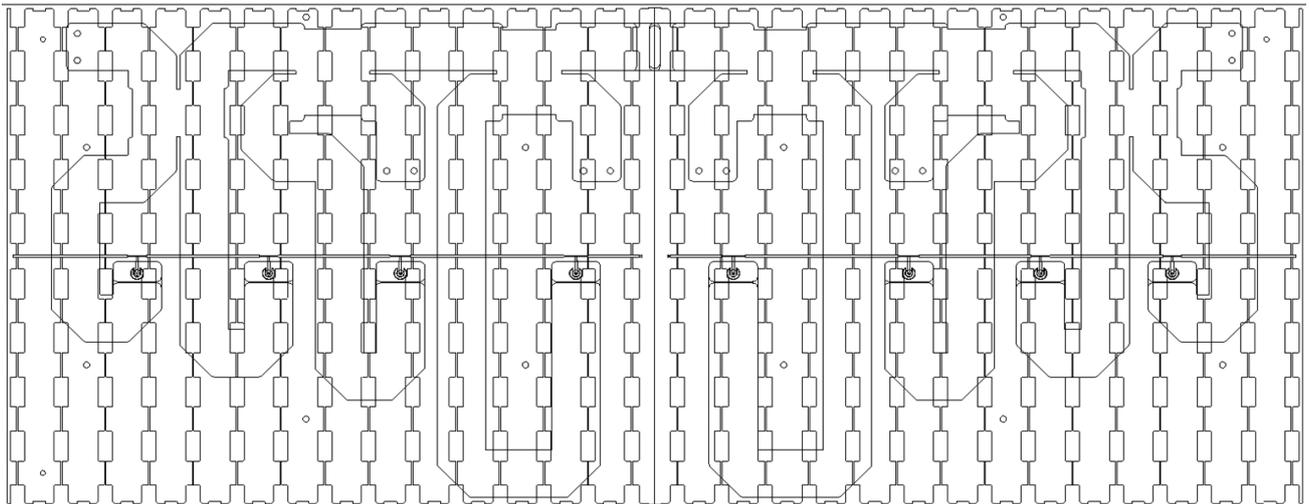


Рисунок 4 – Вид печатной топологии двумерной АР

Верхний слой содержит только два несимметричных микрополоска, каждый из которых является линией возбуждения одной из подрешёток стоячей волны в соответствии со вторым характерным признаком. Подрешётка состоит из 15 коллинеарных антенн длиной 10 элементов в соответствии с третьим характерным признаком. Нижний слой платы содержит указанные коллинеарные антенны с излучателями магнитного типа и аналогичной щелевой линией возбуждения, являющихся частью общей гибридной системы питания, при этом их пространственная ориентация вертикальна для обеспечения горизонтальной линейной поляризации.

Микрополосковая линейная система возбуждения включает в себя четыре точки питания для каждой из двух зеркальных подрешёток в соответствии с четвёртым характерным признаком, при этом подрешётки объединены

параллельной неравновесной волноводной системой в соответствии с пятым характерным признаком.

Каждая точка питания имеет заданный вес возбуждения для реализации дискретного амплитудного распределения в Е-плоскости, обеспечивающего УБЛ не более -25 дБ.

Закон амплитудного распределения дополнительно задаётся выбором величины разноса точек питания с шагом, кратным λ_ϵ . Это позволяет максимально точно добиться требуемого УБЛ, так как указанная регулировка обеспечивает закон поля излучения с точностью не хуже $1,0$ дБ над каждым из 15 элементов каждой подрешётки, хотя напрямую неравновесное деление осуществляется для четырёх точек.

Выполнение требования синфазности последовательных апертур друг относительно друга при их параллельном возбуждении задаётся следующим равенством при центральной частоте f_0 :

$$\gamma_{l1}L_{l1} - \gamma_{l2}L_{l2} = \frac{1}{2} \frac{\lambda_\epsilon}{(L_{l1} + L_{l2})} \quad (3)$$

Формула (3) отличается от (1) из-за того, что волна электрического тока, разделяясь пополам, распространяется в противоположных направлениях, имея одну и ту же начальную фазу относительно каждой из восьми точек питания двухмерной АР (Рисунок 5).

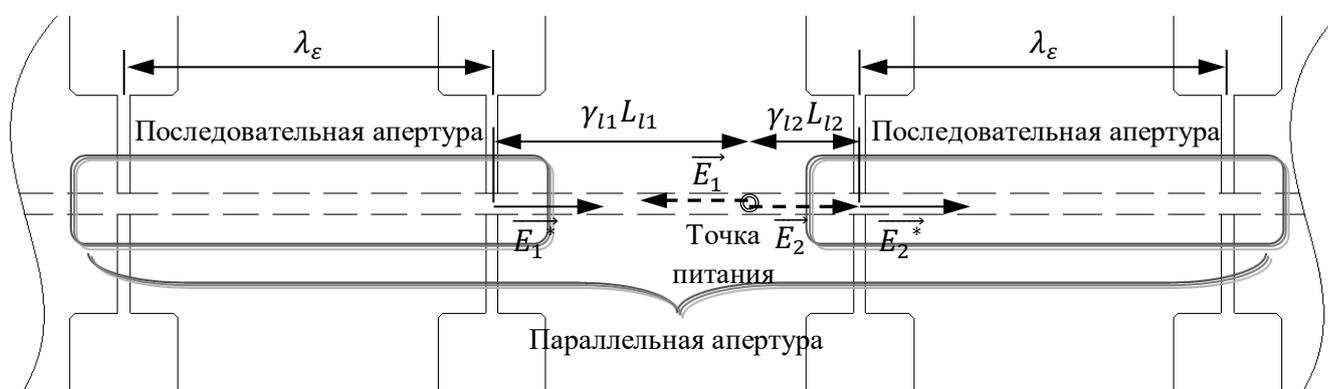


Рисунок 5 – Графическое пояснение условия синфазного параллельного возбуждения последовательных апертур

При введении дополнительного набегу фазы, равного 180° , ориентация векторов \vec{E}_1^* , \vec{E}_2^* оказывается одинакова, но с короткой временной задержкой $\tau(f) = \lambda_\epsilon/2v_\phi$.

Наличие подложки усиливает свойство последовательной апертуры в $\sqrt{\epsilon}$ раз изменять направление максимума ДН при изменении частоты. Данный фактор ухудшает эффективность применения последовательно-параллельной схемы возбуждения с целью стабилизации формы ДН. Проявление эффекта

минимизируется при замене электрического типа излучателя и направляющей линии магнитным аналогом в виде щелевой периодической структуры, изображённой на Рисунке 1. Коэффициент замедления в среднем уменьшается в $1,2 \div 1,3$ раза. Ровно во столько раз уменьшается значение отклонения луча на рассматриваемой частоте, следовательно, отодвигается критическая граница, оценка которой производится по графику, отображённому на Рисунке 3.

Стоит отметить неизбежное ухудшение диапазонных свойств по заданному уровню максимального коэффициента отражения (КО) при наращивании последовательной апертуры путём увеличения количества элементов. Применение предложенной щелевой структуры, снижает минимально необходимое количество излучателей ввиду уменьшения постоянной распространения. Это приводит к увеличению геометрического шага решётки и резонансного размера излучателя, что в общей сложности уменьшает число N элементов при фиксированной длине апертуры $Nd = const$. В результате чего щелевая коллинеарная антенна имеет примерно на 20% меньшее количество элементов по сравнению с микрополосковым вариантом, что расширяет диапазонные свойства двухмерной АР, построенной на её основе. Отдельно выделяется тот факт, что параллельное возбуждение настроенных последовательных апертур практически не влияет на итоговую частотную характеристику КО ввиду того, что их суммарная мощность обратной волны распределена в некоторой пропорции, заданной распределительной системой питания, относительно мощности общего входа. При этом большему влиянию подвержено значение активной составляющей полного входного сопротивления, что определяет требуемое волновое сопротивление входной линии возбуждения и техническую реализацию СВЧ переходов к конкретному типу разъёма или иного радиотракта.

В третьей главе показан способ построения неравновесного делителя с расширенными диапазонными свойствами в виде системы волноводных направленных ответвителей (НО) с взаимным инвертированием прямого и побочного каналов. В качестве пояснения служит Рисунок 6. Добиться данного эффекта позволяет применение окна связи увеличенного размера с дополнительным настроечным штырём, что формирует высокочастотные колебания первого и второго порядка, суммарная энергия которых перераспределяется так, что прямой канал №2 с большей мощностью $P_{пр}$ преобразуется в канал с меньшей мощностью $P_{от}$, при этом 90° -ая задержка фазы, по-прежнему, сохраняется в связанном канале. В итоге инвертирование эквивалентно отрицательному значению ослабления:

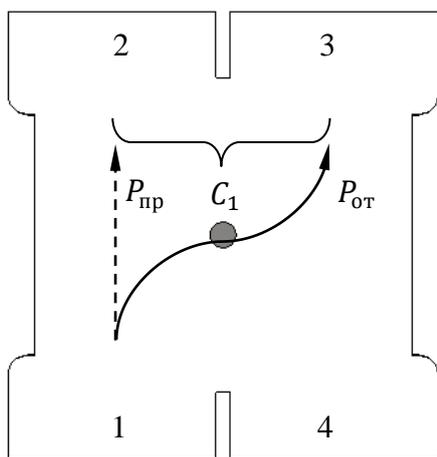


Рисунок 6 – Пояснение термина инвертирования выходных каналов НО, $P_{пр} < P_{от}$

$$C(f) = 10 \log(P_{пр}/P_{от}) \rightarrow -10 \log(P_{от}/P_{пр}) \quad (4)$$

Указанная реализация ступеней обусловлена повышенным требованием к частотной стабильности разности фаз коэффициентов передачи (КП) чего невозможно добиться обычным НО с сильной связью.

Апертура исследуемой АР составлена из пары двумерных подрешёток стоячей волны, каждая из которых возбуждается несимметричным микрополоском с четырьмя точками питания, образующих последовательно-параллельную схему. Микрополосковые линии возбуждения находятся на одной оси, поэтому начальная

ориентация вектора напряжённости электрического поля \vec{E} соответствующих зеркальных половин АР противоположна друг другу. Формирование общей синфазной апертуры достигается противофазным возбуждением подрешёток, что обеспечивается конструкцией волноводного делителя, входное равновесное звено X_0 которого выполнено в виде Е-тройника, задающего противоположно направленную взаимную ориентацию \vec{E} .

Ввиду того, что общая схема деления построена по принципу последовательного включения направленных ответвителей X_1, X_2, X_3 , где выход свободных плеч продолжается до точек питания $1 \div 8$ (Рисунок 7), то электрическая длина всех каналов различна. Дополнительное отличие вносит квадратурное соотношение между прямым и побочным каналами используемых НО. С целью выравнивания фазы волн напряжений выходных чётных и нечётных каналов во всей рабочей полосе частот вводится дополнительная временная задержка путём удлинения линии между выходом последнего звена деления и местом расположения волноводного зонда, передающим мощность к точкам питания антенны. Таким образом, электрические длины волноводных линий от общего входа делителя до каждого выхода должны быть одинаковыми. Нарушение условия влечёт к разному наклону частотной зависимости фазы КП.

Измерение амплитудных весов в образце волноводного неравновесного 8-канального делителя показало совпадение с расчётными значениями не хуже $\pm 0,3$ дБ, что удовлетворяет необходимой точности для достижения заданного уровня УБЛ. Частотная зависимость разности фаз волн напряжений для каналов синфазной части и каналов противофазной части делителя имеет

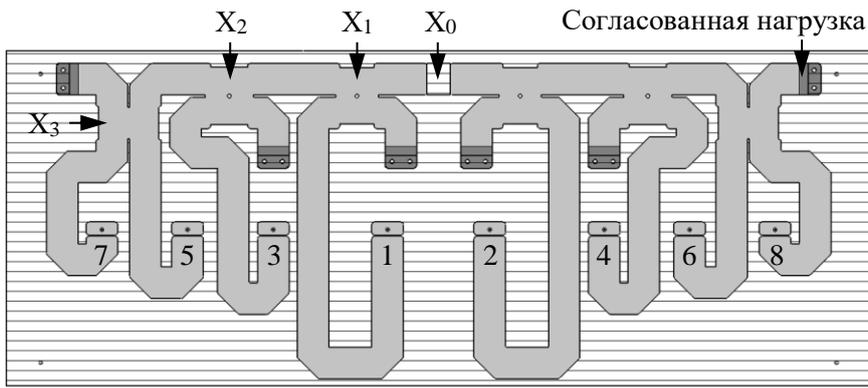


Рисунок 7 – Сечение 3D модели 8-канального волноводного неравновесного делителя

максимальное отклонение не более $\pm 3^\circ$, что формирует практически идеальное возбуждение точек питания каждой двухмерной подрешётки.

Далее в работе представлен вариант исполнения СВЧ

перехода с выхода делителя на печатную структуру, при этом изложена специфика технической реализации соединительных узлов.

Четвёртая глава содержит описание методики проведения измерений направленных характеристик антенной решётки и S-параметров собранной антенной системы. На Рисунках 8-1 и Рисунке 13 отображены сравнительные результаты расчёта (тонкая светлая линия) и экспериментальных полевых исследований в дальней зоне, на Рисунке 12 – в дальней зоне и на основе амплитудно-фазовых измерений в ближней зоне.

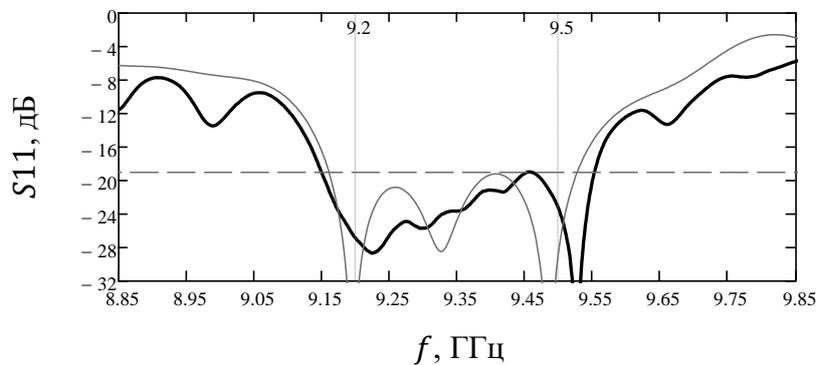


Рисунок 8 – Частотная зависимость измеренного и расчётного КО

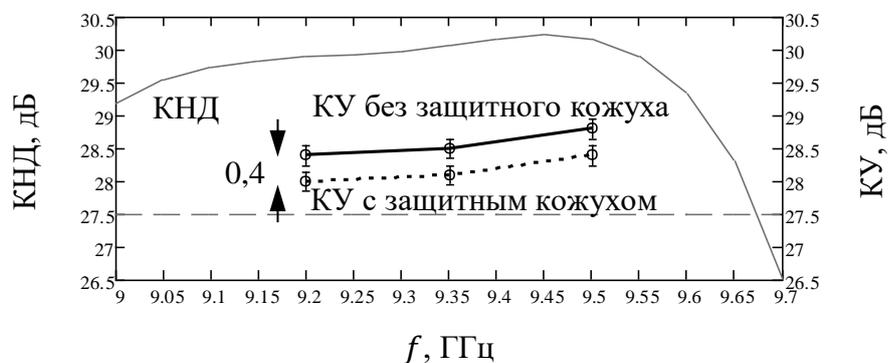


Рисунок 9 – Частотная зависимость измеренного КУ и расчётного КНД

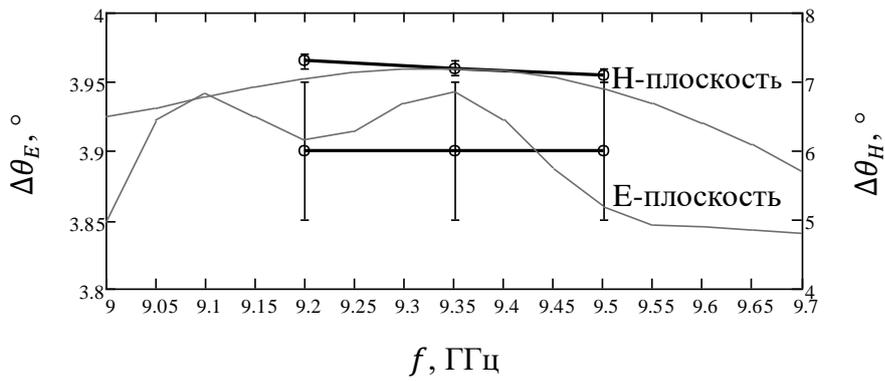


Рисунок 10 – Частотная зависимость измеренной и расчётной ширины ДН

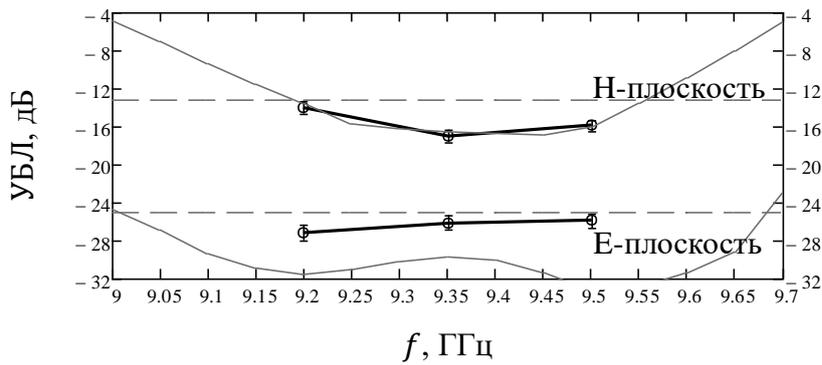


Рисунок 11 – Частотная зависимость измеренного и расчётного УБЛ

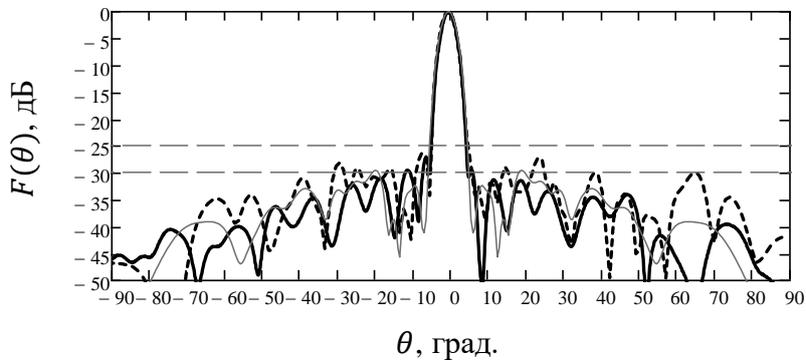


Рисунок 12– Типичный вид измеренной и расчётной ДН, $f_0 = 9,35$ ГГц, Е-плоскость. Дальняя зона (жирная сплошная линия), ближняя зона (жирная пунктирная линия)

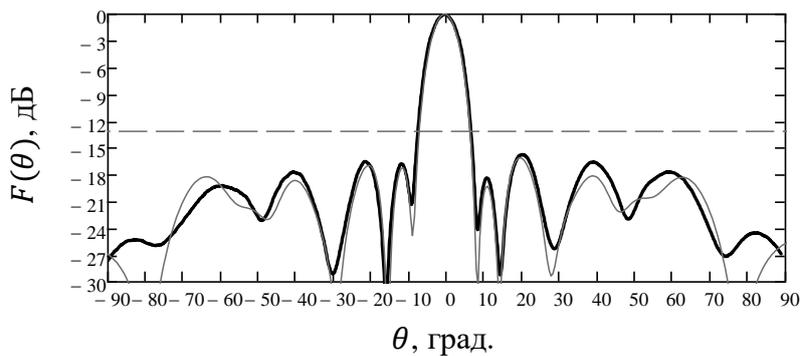


Рисунок 13 – Типичный вид измеренной и расчётной ДН, $f_0 = 9,35$ ГГц, Н-плоскость

Исходя из расчётного уровня КНД и измеренного уровня КУ, определён КПД значением не менее 0,7. В целом эффективность применения предложенной гибридной схемы питания может быть улучшена с помощью покрытия внутренних стенок волноводной распределительной системы высокопроводящим слоем или их полировки. Например, нанесение нескольких микрон серебра, проводимость которого в два раза выше используемого алюминиевого сплава Д16, ориентировочно снизит потери на 0,3 ÷ 0,4 дБ, что увеличит КПД до 0,75 ÷ 0,77.

Отдельно выделены результаты измерений диссипативных потерь (Рисунок 14) контролируемого волноводного неравновесного делителя для оценки уровня влияния на КПД антенной решётки и реальной возможности улучшения его параметров. Также измерена развязка (Рисунок 15) между приёмной и передающей решётками антенной системы (Рисунок 16, 17) в случае отсутствия и наличия защитного кожуха из полимерного ударопрочного пластика ABS толщиной 1,5 мм. В данном случае добиться нужного значения развязки применением различных индуктивных дроссельных канавок не удалось, и только введение в конструкцию металлической пластины, определённой высоты и ширины при подобранном расстоянии между АР, привело к положительному результату.

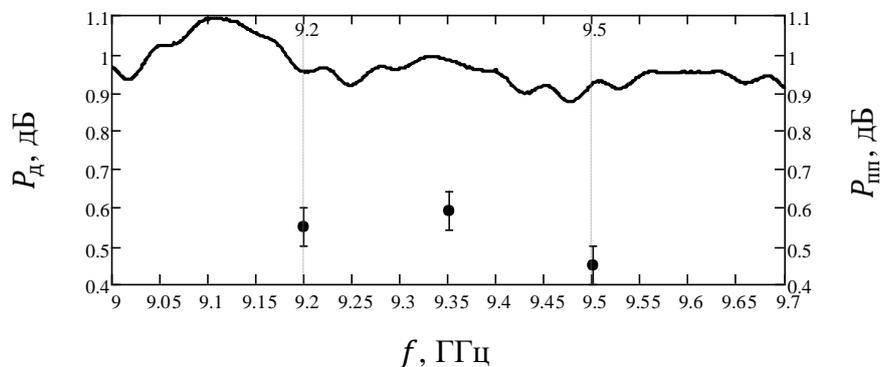


Рисунок 14 – Частотная зависимость диссипативных потерь

P_d в волноводном делителе (сплошная линия), $P_{пп}$ в печатной плате излучателей (точки)

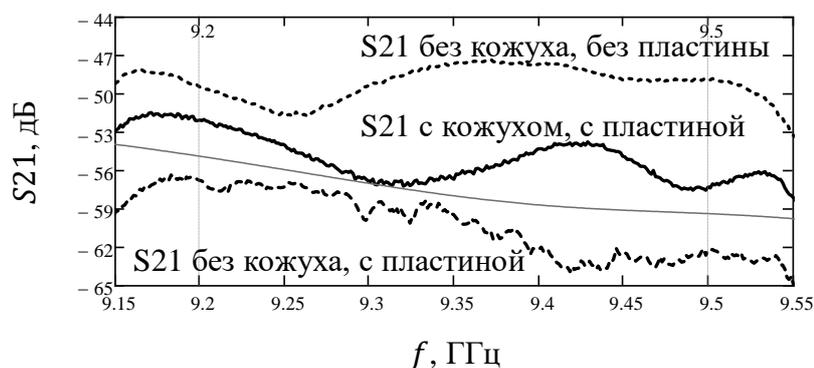


Рисунок 15 – Частотная зависимость измеренного и расчётного уровня развязки.

Используемый вариант (жирная сплошная линия)

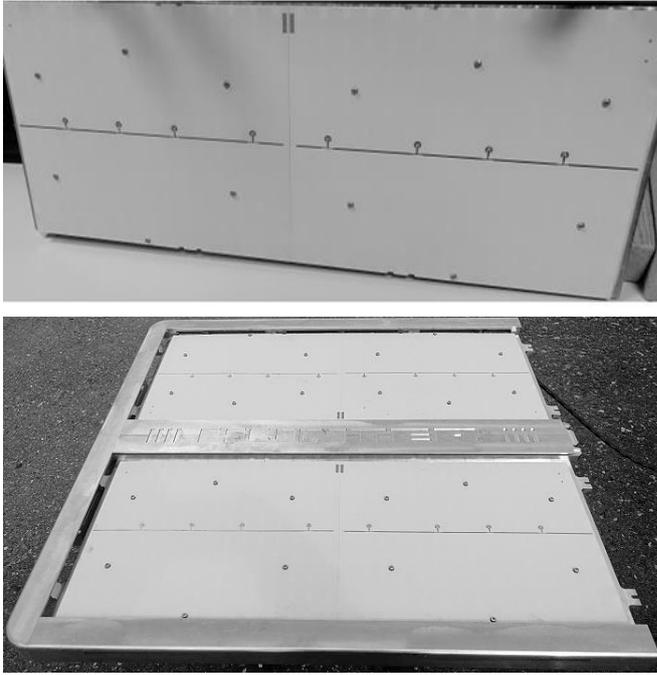


Рисунок 16 – Изображение образца разработанной AP и антенной системы, состоящей из приёмной и передающей AP

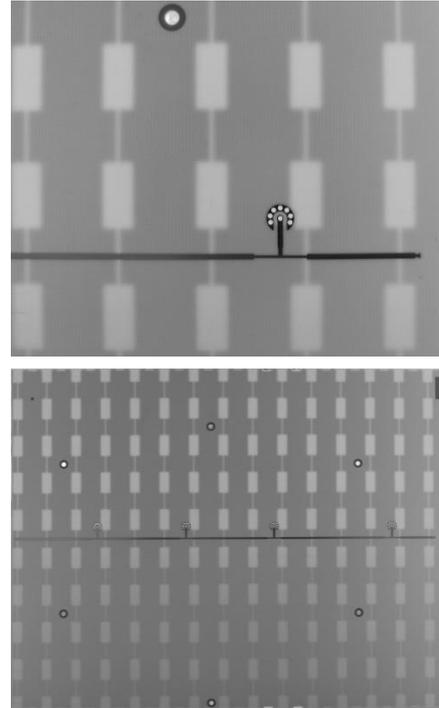


Рисунок 17 – Изображение печатной платы разработанной AP

В заключении формулируются основные научно-технические результаты и выводы работы. Проведено их обобщение и экстраполяция эффективности использования гибридной системы питания для задач построения антенных решёток малогабаритных РЛС.

Приложения включают в себя данные об использовании результатов работы с копиями подтверждающих документов и пояснение требования уровня развязки между приёмной и передающей антенными решётками, определяемого свойствами схемы компенсации, описанной в статье журнала IEEE Trans. on Antennas and Propagation (Web of Science Core Collection, Q1).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

Работа носит выраженный прикладной характер, так как содержание всех научных положений направлено на практический способ улучшения диапазонных и направленных свойств печатных решёток для обеспечения высокой эффективности излучения. Каждая глава содержит ряд тезисов, что формирует поэтапное представление о комплексном подходе к решению вопросов, связанных с основной целью и поставленными теоретическими, практическими задачами.

Предложенная гибридная система питания позволяет лучшим образом реализовывать общий потенциал пассивных многоэлементных антенных решёток в широкой полосе частот при ограниченных массогабаритных характеристиках.

Сформулировано и обоснованно пять характерных признаков любой антенной решётки, которые она должна иметь в случае использования гибридной системы питания:

1. Печатная топология излучающей части.
2. Режим стоячей волны.
3. Коллинеарное расположение излучателей.
4. Последовательное питание излучателей с разбиением на параллельно возбуждаемые участки апертуры.
5. Волноводная распределительная система деления мощности параллельных апертур.

Наиболее важные результаты данной работы представлены следующими выводами:

1. Предложена новая излучающая структура, возбуждаемая волной эквивалентного магнитного тока, одновременно обладающая несколькими характерными признаками.

2. Показано реальное применение с описанием расчёта предложенной излучающей структуры, возбуждаемой волной эквивалентного магнитного тока, что позволило обеспечить расширение полосы согласования, стабильность формы ДН и снижение диссипативных потерь многоэлементной планарной антенной решётки, в сравнении с микрополосковыми структурами, возбуждаемыми волной электрического тока.

3. Показана возможность максимального отбора подводимой мощности в антенной решётке с последовательно-параллельной схемой питания при использовании режима стоячей волны в ограниченной полосе частот.

4. Приведена печатная топология двумерной антенной решётки, состоящей из набора коллинеарных антенн, элементы которых возбуждаются эквивалентным магнитным током, при этом не требуется разветвлённой системы деления / суммирования, снижающей эффективность излучения.

5. Разработано волноводное устройство деления / суммирования, являющееся важнейшей частью гибридной системы питания. Приведены результаты измерений S -параметров, отличающиеся от расчётных на $2 \div 3\%$, что при гарантируемой точности производства и монтажа позволяет применять его в составе антенных решёток без дальнейшего контроля электрических параметров.

6. Разработана широкополосная планарная двумерная антенная решётка X -диапазона с гибридной системой питания, имеющая полосу пропускания не менее 300 МГц. Экспериментально получено значение КУ, по крайней мере, на 1,5 дБ превышающее КУ обычных микрополосковых антенных решёток таких же размеров.

В итоге подробно описан практический способ реализации каждого характерного признака, которые демонстрируют состоятельность и высокую

эффективность применения гибридной системы питания в современных антенных устройствах широкополосных малогабаритных РЛС.

Разработанная решётка с гибридной системой питания входит в антенную систему, состоящую из приёмной и передающей антенн, которая является частью малогабаритной РЛС «Hunter» с квазинепрерывным излучением серийного производства АО «НПФ «Микран».

В целом результаты работы позволили создать печатные решётки К-диапазона с использованием некоторых характерных признаков, что указывает на гибкость применения гибридной системы питания.

Дальнейшие научные исследования и инженерные решения для реализации возбуждения излучающих СВЧ структур эквивалентным магнитным током могут позволить существенно уменьшить количество микрополосковых узлов с волной электрического тока в последовательно-параллельных схемах питания.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК

1. Буянов Ю.И. Микрополосковая коллинеарная антенна / Ю.И. Буянов, **М.О. Коноваленко** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т.53. – №9/2. – С. 64- 65, (ISSN: 0021-3411).

2. Коноваленко М.О. Микрополосковая коллинеарная антенна / **М.О. Коноваленко**, Ю.И. Буянов // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – №2. – 6 с., (eISSN: 1684-1719).

3. Коноваленко М.О. Диапазонные свойства антенных решёток с последовательно-параллельным возбуждением / **М.О. Коноваленко**, Ю.И. Буянов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т.56. – №8/2. – С. 130- 133, (ISSN: 0021-3411).

4. Коноваленко М.О. Программно-аппаратный комплекс для измерения параметров линейных антенных решёток X-диапазона / **М.О. Коноваленко**, Ю.И. Буянов, А.В. Христенко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т.58. – №8/2. – С. 68-71, (ISSN: 0021-3411).

5. Khristenko A.V. Magnitude and Spectrum of Electromagnetic Wave Scattered by Small Quadcopter in X-Band / A.V. Khristenko, **М.О. Konovalenko**, M.E. Rovkin [et al] // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66, no. 4. – PP. 1977-1984, (DOI 10.1109/TAP.2018.2800640, Web of Science Core Collection, Q1).

Доклады в сборниках трудов международных конференций

6. Коноваленко М.О. Способ калибровки конформной антенной решётки по измерениям комплексных амплитуд поля в ближней зоне / **М.О. Коноваленко**, А.В. Христенко, А.В. Самотугин // Материалы 28-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2018. – Т3. – С. 533-539, (ВАК).

7. Khristenko A.V. Magnitude and Spectrum of Electromagnetic Wave Scattered by Small UAVs / A.V. Khristenko, **М.О. Konovalenko**, M.E. Rovkin [et al] // XIII International Siberian Conference on Control and Communications, (SIBCON 2017). – Astana, 2017. – PP. 217-221, (DOI 10.1109/SIBCON.2017.7998472, Web of Science Core Collection, Scopus).

8. Rovkin M.E. Radar Detection of Small-Size UAVs / M.E. Rovkin, V.A. Khlusov, **М.О. Коноваленко** [et al] // Proceedings – 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, (USBREIT 2018). – Yekaterinburg, 2018. – PP. 371-374, (DOI 10.1109/USBREIT.2018.8384626, Scopus).

Доклады в сборниках трудов всероссийских конференций

9. Коноваленко М.О. Микрополосковая антенная решётка для радиолокатора речных судов / **М.О. Коноваленко**, Ю.И. Буянов // Информационно-измерительная техника и технологии. Сб. научн. тр. – Томск: НИ ТПУ – 2011. – №2. – С. 96-97.

Отчёты НИР

10. Создание на основе собственной СВЧ элементной базы системы мониторинга верхней полусферы охраняемых объектов для предотвращения несанкционированного проникновения сверхмалоразмерных летательных аппаратов (типа «дрон») в охраняемую зону: отчёт о ПНИЭР (промежуточный, этап 2, часть 1) / ТУСУР; рук. В.А. Хлусов; Исполн.: **М.О. Коноваленко** (разд. 1, с. 17-92), Д.М. Носов, А.В. Христенко [и др.]. – Томск, 2016. – 205 с. – ГР № АААА-А15-115123010010-3. – Соглашение № 14.577.21.0188 от 27.10.2014.

11. Прикладные исследования и экспериментальная разработка многочастотных радиолокационных станций дистанционного зондирования Земли на платформах легкомоторной и беспилотной авиации для решения задач мониторинга и противодействия техногенным и биогенным угрозам: отчёт о ПНИЭР (промежуточ., этап 2) / ТУСУР; рук. М.Е. Ровкин; Исполн.: Н.Д. Малютин, **М.О. Коноваленко** (разд. 9), В.А. Хлусов [и др.] – Томск, 2018. – В 2-х кн. – С. 211-232. – ГР № АААА-А17-117102750005-3. – Соглашение № 14.577.21.0279 от 26.09.2017, идентификатор RFMEFI57717X0279.

Патенты

12. Патент на полезную модель №163383 Российская Федерация, МПК H01Q 21/00. Сверхширокополосный облучатель с высоким коэффициентом эллиптичности / Ю.И. Буянов, **М.О. Коноваленко**, О.Ю. Сваровский; заявитель и патентообладатель АО «НПФ «Микран». – Оpubл. 20.07.2016, Бюл. №20.

13. Патент на полезную модель №163406 Российская Федерация, МПК H01Q 21/00. Сверхширокополосный облучатель с высоким коэффициентом эллиптичности / Ю.И. Буянов, **М.О. Коноваленко**, О.Ю. Сваровский; заявитель и патентообладатель АО «НПФ «Микран». – Оpubл. 20.07.2016, Бюл. №20.

СПИСОК ПОБЕД В КОНКУРСНЫХ НАУЧНЫХ ПРОГРАММАХ

1. Разработка опытного образца пассивного ретранслятора для современных беспроводных сетей / Рук. и исполн. **М.О. Коноваленко**. – Томск. – Программа «Участник молодёжного научно-инновационного конкурса 2012» У.М.Н.И.К.

2. Пассивный ретранслятор Wi-Fi сетей / Рук. и исполн. **М.О. Коноваленко**. – Москва. – Конкурс Инноваций и инновационных проектов Международной академии связи (МАС) 2012.

Коноваленко Максим Олегович

**Гибридная система питания антенных решёток
для малогабаритных радиолокационных станций**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук