



Волков Александр Петрович

**ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СВЧ КОМПОЗИТНЫЕ СТРУКТУРЫ В
БОРТОВЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМАХ**

05.12.07 - АНТЕННЫ, СВЧ-УСТРОЙСТВА И ИХ ТЕХНОЛОГИИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре радиофизики, антенн и микроволновой техники Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гринев Александр Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор
Ильинский Анатолий Серафимович
(Московский государственный университет им.
М.В. Ломоносова)

кандидат технических наук, с.н.с.
Инденбом Михаил Вульфович
(АО «Всероссийский научно-исследовательский
институт радиотехники»)

Ведущая организация: ПАО «Радиофизика»

Защита диссертации состоится <<06>> июня 2017 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте mau.ru и в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан <<__>> _____ 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.03, д.т.н.

М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Неизменной тенденцией развития теории и техники антенных систем (АС) бортовых многофункциональных радиоэлектронных комплексов, выполняющих функции РЛС, землеобзора, радиотехнической разведки, радиоэлектронной борьбы, госопознавания, радионавигации и радиосвязи, является поиск и внедрение научно обоснованных технических решений, направленных на использование единой системы излучения в интересах нескольких радиотехнических систем, расширение полосы рабочих частот, сектора сканирования и многофункциональности АС, снижения эффективной поверхности рассеяния и минимизации габаритов АС [1]. Решение подобных задач, как правило, усложняется ограниченным объемом и эксплуатационными требованиями к АС. Одним из путей решения некоторых указанных проблем является использование периодических СВЧ композитных (ПСК) структур. Последние представляют собой периодические, в общем случае многослойные, структуры, свойства которых обусловлены типом элемента, периодом и их композицией, и которые обладают некоторыми нетрадиционными свойствами.

Периодические структуры рассматривались многими авторами: Вайнштейном Л.А., Фельдом Я.Н., Шестопаловым В.П., Ильинским А.С., Сивовым А.Н., Нефёдовым Е.И., Фиалковским А.Т., Конторовичем М.И., Brillouin L., Oliner A.A., Walter C.H. и др.. Второму рождению ПСК структур, вызванным поиском их практического использования, а также существенным прорывом вычислительных методов и средств, способствовала приоритетная публикация D.F. Sievenpiper «High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band» [2], посвящённая поверхностям с высоким импедансом со свойствами искусственного магнитного проводника (АМС) и запрещённой электромагнитной зоны (ЕВГ) (структуры с отрицательными значениями электрофизических параметров в настоящей работе не рассматриваются).

Тем не менее, недостаточно исследованы многие важные для практического использования периодических СВЧ композитных структур в антенных системах вопросы. В частности: оценка взаимного влияния и ожидаемых характеристик системы АС–ПСК; определение возможности снижения ЭПР ФАР с помощью частотно-селективных структур (ЧСС) при ограниченном объеме размещения и влиянии ФАР на ЧСС; выявление особенностей конечных АМС/ЕВГ структур и близко расположенным возбуждающим источником (антенной) и их влияния на полную полосу рабочих частот (включающую как характеристики согласования, так и направленности) АС; разработка электродинамических моделей, объединяющих АС с ПСК структурами; моделирование всей системы численными методами с последующей оптимизацией; обоснование преимуществ технических решений с внедрением ПСК структур в конкретные практические разработки АС, например, в комплексы госопознавания, радионавигации и землеобзора авиационного и космического базирования.

Объект и предмет диссертационного исследования

Объект исследования – бортовые антенные системы авиационных и космических комплексов.

Предмет исследования – периодические СВЧ композитные структуры, комплексированные с бортовыми антенными системами.

Цель работы. Сокращение высоты профиля, увеличение полосы рабочих частот и развязки, подавление поверхностных волн в подложках излучающего полотна (исключение эффекта ослепления ФАР), снижение эффективной поверхности рассеяния (снижение радиозаметности планера с АС) бортовых АС на основе внедрения периодических СВЧ композитных структур со свойствами искусственного магнитного проводника, запрещённой электромагнитной зоны, частотной селективности.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели ставятся и решаются следующие **основные задачи**:

1. Синтез каскадных и многорезонансных периодических СВЧ композитных структур со свойствами частотной селективности, реализующих полосно-заграждающие фильтры сантиметрового диапазона.

2. Исследование возможности снижения диаграммы обратного рассеяния ФАР с помощью полосно-заграждающих ЧСС при ограниченном объеме размещения. Оценка влияния ФАР на ЧСС и ЧСС на ФАР.

3. Разработка антенной системы, объединяющей ФАР L-диапазона, размещаемую в отклоняемом носке передней консоли крыла летательного аппарата, ЧСС с режекторной пространственно-частотной характеристикой и поглощающий материал на основе резистивных печатных элементов, с пониженным уровнем лепестков Брэгга диаграммы обратного рассеяния в X- и Ku-диапазонах.

4. Исследование особенностей конечных ПСК структур со свойствами искусственного магнитного проводника с близко расположенным возбуждающим источником в зависимости от их реализации, размера и формы подстилающей поверхности.

5. Разработка конформной двухполяризационной антенной системы ОВЧ-диапазона на основе ПСК структур со свойствами искусственного магнитного проводника.

6. Разработка ПСК структур со свойствами электромагнитной запрещённой зоны и их комплексирование с ФАР и двухполяризационными АС.

Методы исследования. Аппарат теории антенн, устройств СВЧ и математической физики, включая численные электродинамические методы моделирования на основе метода конечных разностей во временной области и метода конечных элементов, численные методы оптимизации целевых функций, а также экспериментальные методы антенных измерений.

Научная новизна работы

1. Разработаны принципы построения и функционирования АС, состоящей из ФАР L-диапазона, ЧСС с полосно-заграждающей пространственно-частотной характеристикой и поглощающего материала, позволяющие существенно снизить амплитуду лепестков Брэгга ДОР АС.

2. Выявлен эффект «ослепления» при комплексировании АС с ПСК структурами со свойствами частотной селективности, обусловленный резонансными процессами в системе ЧСС–АС и приводящий к неполному подавлению отдельных лепестков Брэгга ДОР АС.

3. Предложен способ расширения полной полосы АС на конечной ПСК структуре со свойствами искусственного магнитного проводника.

4. Разработаны принципы построения и функционирования АС, интегрированной с периодическими СВЧ композитными структурами со свойствами искусственного магнитного проводника, позволяющие снизить высоту профиля и расширить полную полосу рабочих частот двухполяризационных антенных систем.

5. Разработаны принципы построения и функционирования АС, интегрированной с периодическими СВЧ композитными структурами со свойствами электромагнитной запрещённой зоны, позволяющие подавить поверхностные волны и увеличить развязку между элементами антенной решётки

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработанный для ФАР L-диапазона принцип комплексирования ФАР–ЧСС–поглощающий материал позволяет снизить амплитуду лепестков Брэгга ДОР ФАР в X- и Ku-диапазонах, и, тем самым, уменьшить радиозаметность планера с ФАР.

2. Разработанные принципы построения и функционирования АС, интегрированных с периодическими СВЧ композитными структурами со свойствами искусственного магнитного проводника и электромагнитной запрещённой зоны, позволяют снизить высоту профиля антенных систем, расширить полосу рабочих частот, подавить поверхностные волны и увеличить развязку между излучателями.

Реализация и внедрение результатов

Реализации результатов диссертационной работы позволит модернизировать антенные устройства разрабатываемых в настоящее время для авиационных и космических комплексов, улучшив их габаритные и радиотехнические характеристики. Результаты диссертационного исследования, оформленные в виде актов о внедрении, использованы:

- в эскизном техническом проекте составной части опытно-конструкторской разработки «Разработка излучающего элемента системы излучения бортовой активной фазированной решетки», шифр «Аббат-М», проведенной ОАО «НИИП им. В.В. Тихомирова» для снижения ЭПР и уменьшения заметности планера с АФАР L-диапазона;

- при проработке модернизированных вариантов антенных устройств АУ-311 и АУ-411 многочастотного радиолокационного комплекса МРК-411, проводимой в АО «Концерн «Вега», для снижения высоты профиля антенн ОВЧ и УВЧ диапазонов и улучшения аэродинамики ЛА.

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгой постановкой граничных задач при численном электродинамическом моделировании и подтверждением результатов, полученных разными методами, согласованностью с положениями макроскопической электродинамики, теории антенн и устройств СВЧ, сравнением полученных результатов с имеющимися в литературе отдельными частными случаями, сравнением результатов расчётов с данными измерений отдельных образцов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные принципы комплексирования АС с периодическими СВЧ композитными структурами со свойствами частотной-селективности, искусственного магнитного проводника и электромагнитной запрещённой зоны позволяют снизить амплитуду лепестков Брэгга ДОР ФАР на 5-25 дБкв.м, снизить высоту профиля антенных систем до $0.04-0.08\lambda_0$ при полосе рабочих частот 14% - 40%, подавить поверхностные волны и увеличить развязку между элементами антенных решёток на 5-10 дБ.

2. Разработанные принципы построения и функционирования АС, состоящих из ФАР L-диапазона, ЧСС с полосно-заграждающей пространственно-частотной характеристикой и поглощающего материала, позволяют устранить эффект «ослепления» ЧСС и снизить амплитуду лепестков Брэгга ДОР ФАР в X- и Ku-диапазонах на 5-25 дБ в диапазоне углов облучения $10...55^\circ$ и обеспечить снижение коэффициента усиления ФАР L-диапазона не более чем на 0.3 дБ.

3. Разработанные принципы построения и функционирования двухполяризационных антенных систем ОВЧ-диапазона и ПСК структур со свойствами искусственного магнитного проводника позволяют снизить высоту профиля излучателя антенной системы до $0.06-0.08\lambda_0$, расширить полную полосу рабочих частот до 40% по уровню $K_{CB} \leq 2.5$.

4. Разработанные принципы построения и функционирования АС, состоящих из печатных вибраторных излучателей УВЧ диапазона ($\lambda_0 = 69$ см) и ПСК структур со свойствами электромагнитной запрещённой зоны позволяют подавить поверхностные волны и устранить эффект ослепления печатных ФАР, снизить высоту профиля, обеспечить развязку между ортогональными поляризациями не более -30 дБ и уменьшить взаимовлияния излучателей с одноименными поляризациями на 3-20 дБ в двухполяризационных АС.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на:

- 26-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2016 г.

- Семнадцатой ежегодной научной конференции ИТПЭ РАН, Москва, 2016 г.
- Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2015», Москва, МАИ, 2015 г.
- Пятой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств воздушно-космической обороны», Москва, ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей», 2014 г.
- Первой Всероссийской Микроволновой конференции, Москва, ИРЭ РАН, 2013 г.

Публикации. По основным результатам выполненных в диссертации исследований опубликованы 24 печатные работы, из них 10 статей (5 в журналах, рекомендуемых ВАК) и 14 тезисов докладов.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа изложена на 154 машинных листах и состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников. Иллюстративный материал представлен в виде 128 рисунков и 10 таблиц. Список литературы включает 105 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дается краткое содержание глав работы. Приведена условная классификация периодических СВЧ композитных структур и выделены основные задачи исследования.

Первый раздел работы посвящен ПСК структурам со свойствами частотной селективности (ЧСС) [3]. Проведен аналитический обзор литературы по ЧСС, которые возможно использовать для уменьшения характеристик рассеяния ФАР L-диапазона. Выделены этапы синтеза, анализа и интеграции ЧСС с ФАР:

1. Синтез фильтра-прототипа на сосредоточенных элементах;
2. Выбор моделей периодических решеток, используемых для перехода от фильтра-прототипа к реальной электродинамической структуре ЧСС. Выбор методов анализа периодических решеток для определения геометрических и электрофизических параметров ЧСС;
3. Полноволновое электродинамическое моделирование ЧСС в ячейке Флоке, включающее сопоставление различных методов полноволнового моделирования, оценку влияния геометрических и электрофизических параметров ЧСС, угла падения и поляризации волны на характеристики ЧСС;
4. Полноволновое моделирование ФАР совместно с ЧСС, включающее оценку влияния ЧСС на характеристики согласования и направленности ФАР (в L-диапазоне), а также оценку ДОР ФАР с ЧСС (в X- и Ku-диапазонах).

Последовательно, реализуя этапы перехода от параметров фильтра прототипа к ВЧ реализации, синтезированы полосно-заграждающие каскадные, однорезонансные и многорезонансные ЧСС на основе печатных кольцевых элементов, проведен анализ геометрических

и электрофизических параметров на характеристики ЧСС. На рисунке 1 приведена синтезированная двухслойная ЧСС с рабочей полосой 76% по уровню коэффициента прохождения -10 дБ.

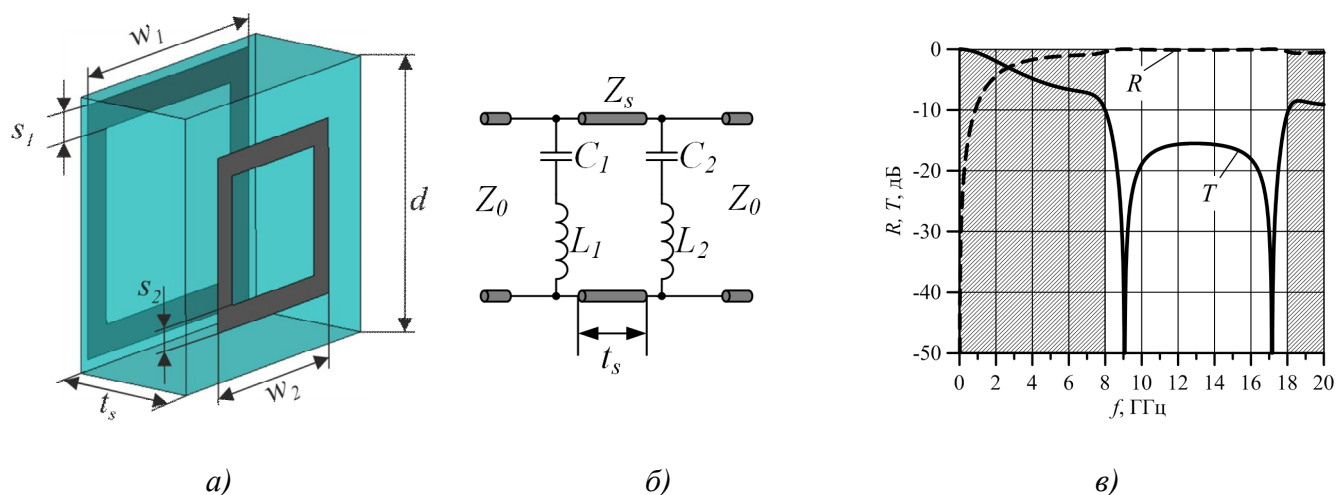


Рисунок 1 – Двухслойная частотно-селективная структура: а) – геометрия единичной ячейки; б) – эквивалентная схема; в) – коэффициенты отражения (R) и прохождения (T) ЧСС.

Рассмотрен механизм образования лепестков обратного рассеяния ДОР в конечной системе ЧСС-проводящий экран, обусловленный резонансными процессами между ЧСС и проводящим экраном. Приведена методика, основанная на теории резонаторов с полупрозрачной стенкой, позволяющая определить частотное и угловое положение резонансных лепестков ДОР.

Проведены макетирование и экспериментальные измерения частотной зависимости коэффициента прохождения однослойной ЧСС. Сравнение результатов измерений и численное моделирование показало их удовлетворительное совпадение (рисунок 2).

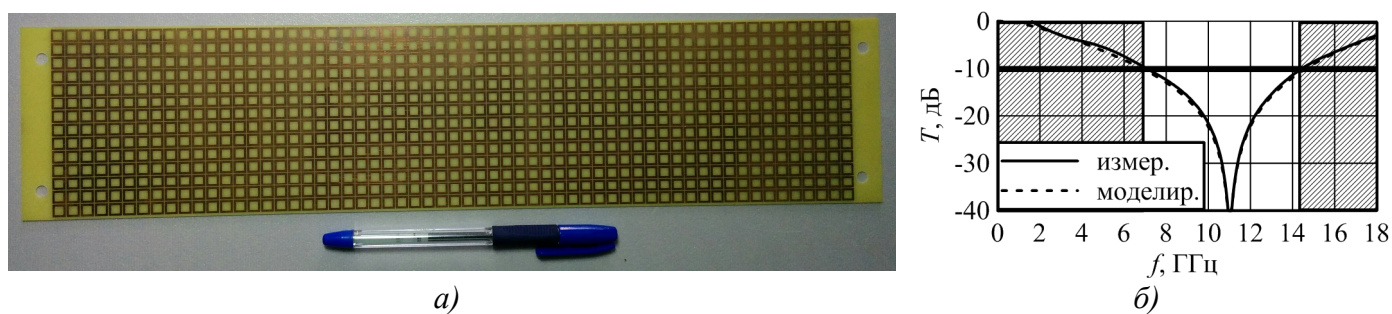


Рисунок 2 – Макетирование и измерения однослойной ЧСС.

Во **втором** разделе рассмотрена литература по уменьшению характеристик рассеяния антенн и антенных решеток с помощью ЧСС. Проведено полноволновое моделирование ДОР линейных периодических структур L-диапазона, экранированных различными синтезированными полосно-заграждающими ЧСС при облучении плоской ЭМ волной X- и Ku-диапазонов (рисунок 3). Выявлен эффект «ослепления» ЧСС, обусловленный резонансными эффектами между ЧСС, ЛПС и проводящим основанием, приводящий к подавлению отдельных лепестков Брэгга ДОР. Резонансные частоты неподдавленных лепестков Брэгга можно определить из системы уравнений, первое уравнение которой определяет частотную зависимость резонансных углов резонатора с частично-прозрачной стенкой, а второе уравнение – положение n -лепестка Брэгга:

$$\begin{cases} \Psi_{fss}^R(f, \theta) - \pi - \frac{4\pi}{\lambda} h \cdot \cos(\theta) = 2\pi N \\ \sin(\theta) = \frac{nc}{2D_{AP}f} \end{cases}, N = 1, 2, \dots, n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

где N – номер резонансной моды резонатора с частично-прозрачной стенкой, n – номер лепестка Брэгга, D_{AP} – период ЛПС L-диапазона. На рисунке 3 в) приведен результат расчета ДОР восьмиэлементной ЛПС без и с ЧСС.

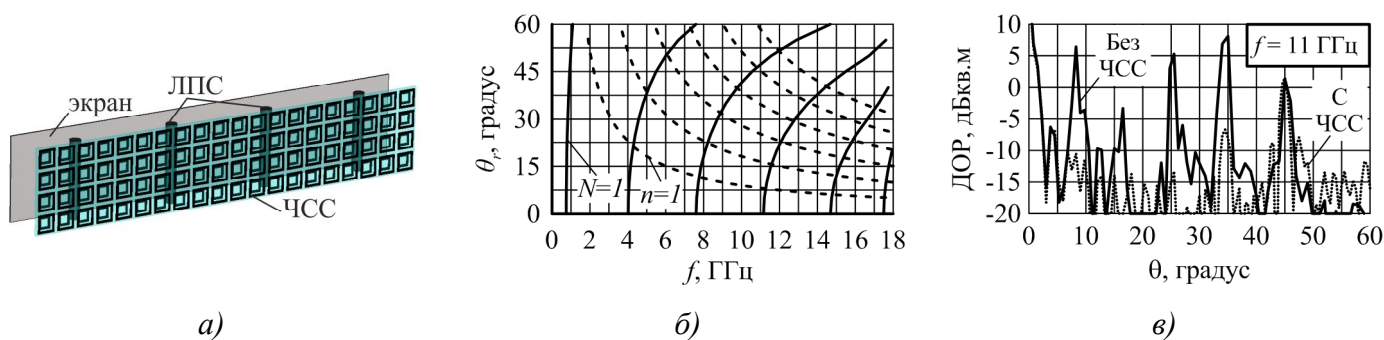


Рисунок 3 – К эффекту «ослепления» ЧСС: а) – общий вид исследуемой структуры; б) – графическое решение системы уравнений (1); в) – ДОР.

Рассмотрены следующие способы устранения эффекта «ослепления» ЧСС: уменьшение расстояния от ЧСС до проводящего экрана и введение поглощающих материалов, располагаемых на проводящем экране. Как правило, уменьшение расстояния от ЧСС до проводящего экрана затруднено в связи со значительной высотой профиля антенной решетки.

При втором способе для устранения эффекта ослепления ЧСС в качестве поглощающего материала использовался поглотитель на основе резистивных печатных элементов. Использование поглощающего материала позволило устранить эффект «ослепления» ЧСС и снизить амплитуду всех лепестков Брэгга (рисунок 4).

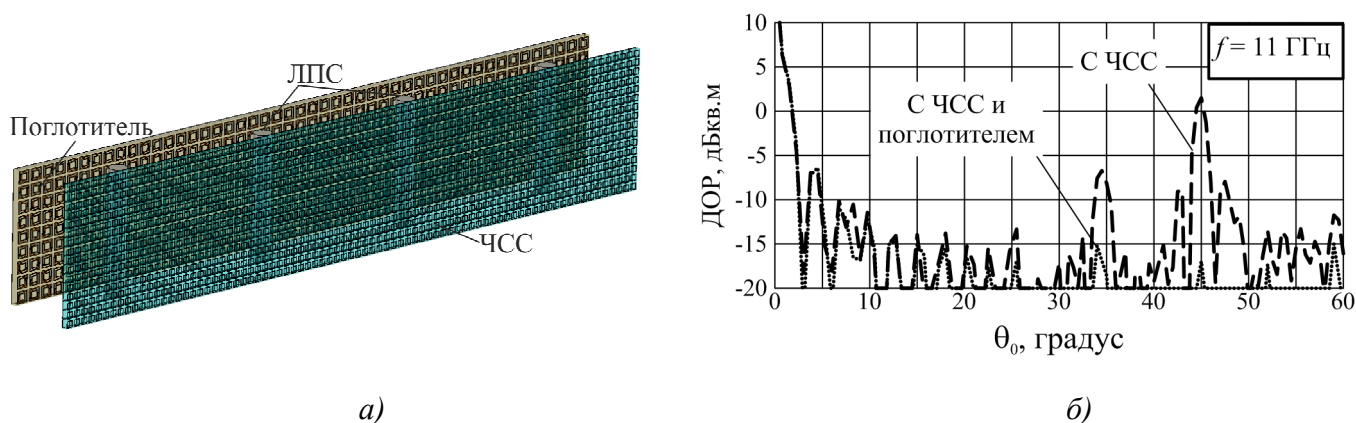
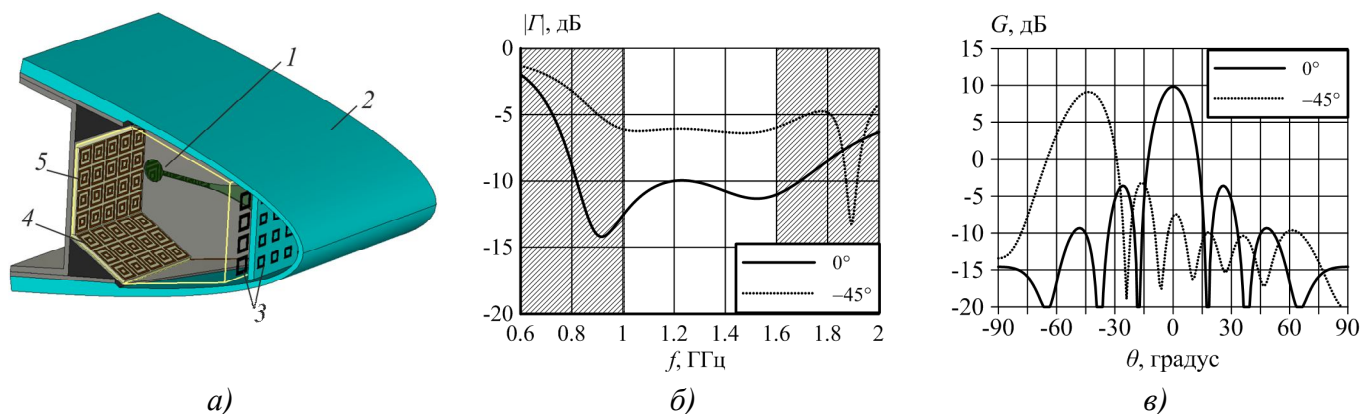


Рисунок 4 – Введение поглощающего материала для устранения эффекта ослепления ЧСС: а) – геометрия задачи; б) ДОР на частоте 11 ГГц.

Результаты исследований использовались для снижения ДОР восьмиэлементной ФАР L-диапазона. Разработана антенная система, включающая ФАР L-диапазона на основе металлодиэлектрического неоднородного излучателя (МНИ), размещаемую в отклоняемом носке

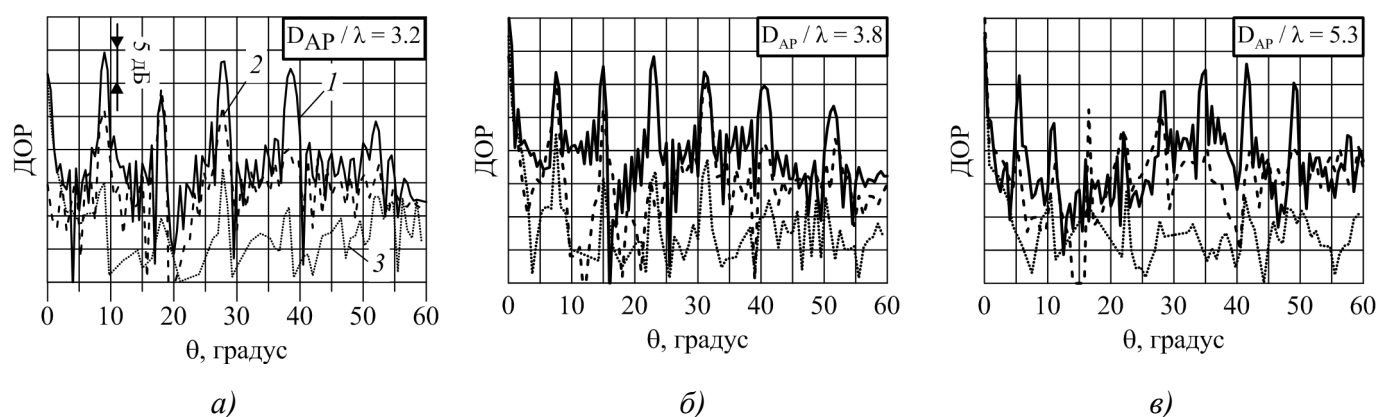
передней консоли крыла летательного аппарата, двухслойную ЧСС с полосно-заграждающей пространственно-частотной характеристикой, размещаемую на плоской диафрагме перед апертурой ФАР, и поглотитель на основе резистивных печатных элементов, размещаемый на П-образном металлическом профиле (рисунок 5). При введении в конструкцию ФАР ЧСС наблюдалось ухудшение качества согласования и параметры излучателя были подстроены для компенсации влияния ЧСС. Получены характеристики согласования ($K_{СВ} < 2$ при синфазном возбуждении и $K_{СВ} < 3$ при фазировании лучом в направлении 45°) и направленности ФАР.



1 – МНИ; 2 – обтекатель ЛА; 3 – ЧСС; 4, 5 – поглощающий материал.

Рисунок 5 – ФАР на основе элемента типа МНИ с двухслойной ЧСС и поглотителем: а) – общий вид; б) – модуль коэффициента отражения от входа центрального излучателя; в) – КУ в **H**-плоскости.

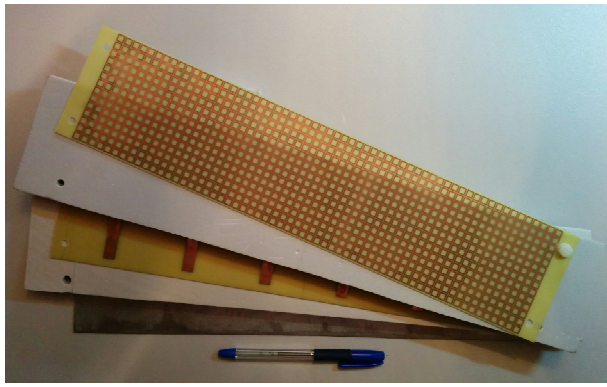
Комплексное использование двухслойной ЧСС и поглощающего материала позволило снизить амплитуду лепестков Брэгга ДОР ФАР L-диапазона в диапазоне углов $10^\circ \dots 60^\circ$ на 5-25 дБ в полосе частот 8–18 ГГц (рисунок 6). При этом, коэффициент усиления разработанной АС, по сравнению с исходной ФАР, не более чем на 0,3 дБ меньше в полосе частот 1..1.6 ГГц и секторе сканирования ± 45 градусов.



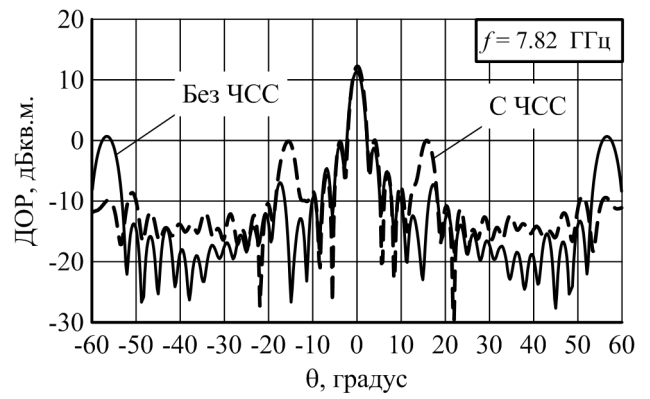
1 – исходная ФАР; 2 – ФАР с двухслойной ЧСС; 3 – ФАР с ЧСС и поглощающим материалом.

Рисунок 6 – ДОР линейной восьмиэлементной ФАР.

Проведено макетирование и экспериментальные измерения ДОР шестиэлементной ЛПС L-диапазона с проводящим основанием, экранированной однослойной ЧСС. Экспериментальные результаты подтвердили наличие неподавленных лепестков Брэгга ДОР (рисунок 7).



а)

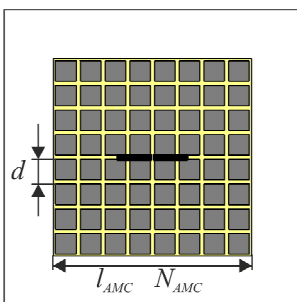


б)

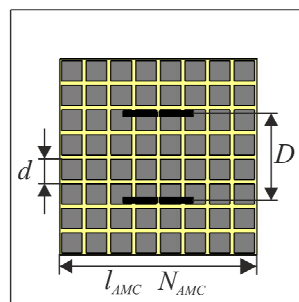
Рисунок 7 – Макетирование и измерения ДОР ЛПС с однослойной ЧСС.

В третьем разделе диссертационной работы рассмотрены ПСК структуры со свойствами искусственного магнитного проводника (АМС) [1, 4]. Проведен аналитический обзор литературы, посвященной низкопрофильным АС. Исследована полная полоса (включающая как характеристики согласования, так и направленности) излучателя, расположенного вблизи ($\sim 0.001\lambda_0$) различных типов АМС структур. Показано, что в случае структуры типа «грибы», расположенной на проводящем экране размером большим, чем АМС структура, происходит деградация ДН АС в \mathbf{E} -плоскости и возникновение провалов в нормальном направлении ДН. Это ухудшение направленных свойств АС в согласованной полосе рабочих частот обусловлено излучением вертикальных проводников АМС структуры.

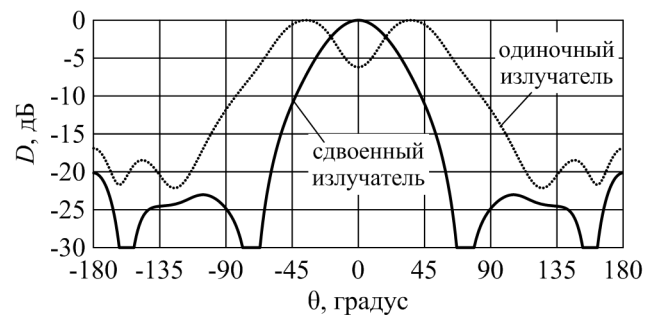
Рассмотрены особенности ДН АС в \mathbf{H} -плоскости, расположенных на планарных АМС структурах (рисунок 8 а), вызванные равенством длины конечной АМС структуры и резонансной длины волны ТЕ моды. Предложен способ расширения полной полосы АС на конечной планарной АМС структуре путем использования системы из «сдвоенного» излучателя, состоящего из двух вибраторов, запитываемых синфазно и разнесенных на расстояние $D \sim \lambda_n / 2$ в плоскости провала (рисунок 8 б).



а)



б)



в)

Рисунок 8 – Излучатель на планарной АМС структуре: а) – одиночный излучатель, б) – сдвоенный излучатель, в) – ДН в \mathbf{H} -плоскости.

Результаты исследований использовались для разработки низкопрофильной конформной двухполяризационной антенной системы ОВЧ-диапазона, размещаемой на фюзеляже ЛА (рисунок 9). Для контроля ДН в \mathbf{H} -плоскости излучатели горизонтальной поляризации (ВГ) и вертикальной

поляризации (ВВ) состоят, каждый, из двух диполей, разнесенных на расстояние $D_v = D_h = 3.5 \cdot d$ (1120 мм) друг от друга. Высота антенной системы составила $h = 165$ мм ($0.07\lambda_0$).

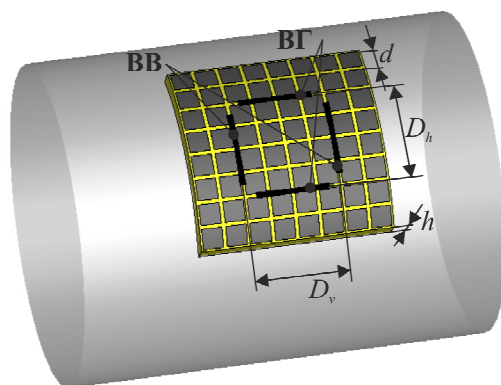


Рисунок 9 – Общий вид низкопрофильной конформной двухполяризационной антенной системы ОВЧ-диапазона.

На рисунке 10 приведены графики частотной зависимости модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ от входа излучателей (рисунок 10 а), а также ДН АС в Е- и Н-плоскостях (рисунок 10 б, в). В рабочей полосе частот $KCB < 2.1$ и уровень заднего излучения не превышает -10 дБ.

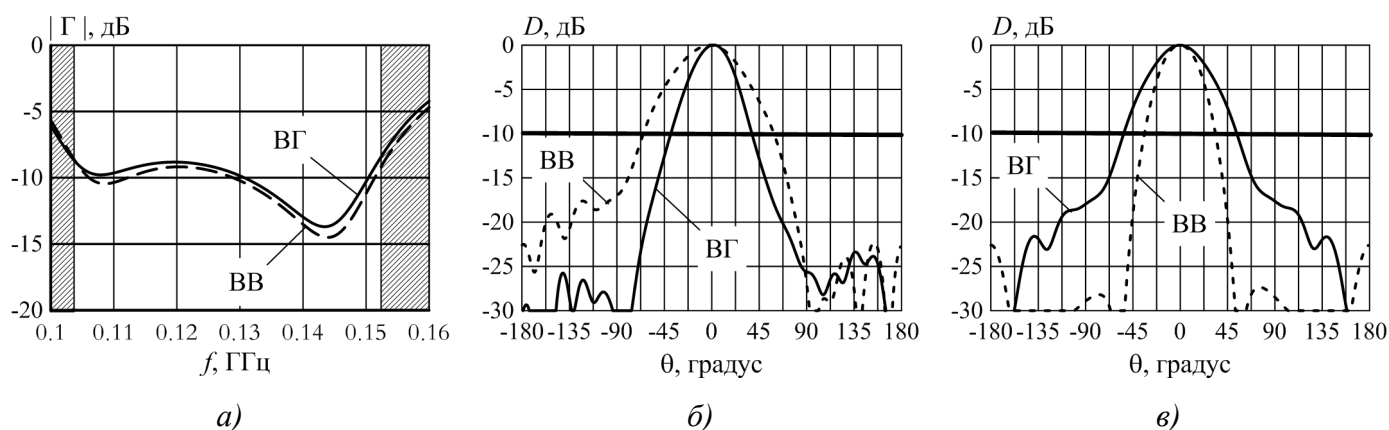


Рисунок 10 – Результаты моделирования АС: а) – модуль коэффициента отражения от входа излучателя; б) – ДН АС в Е-плоскости; в) – ДН АС в Н-плоскости.

В таблице 1 приведено сравнение известных из литературы реализаций низкопрофильных АС и разработанной АС.

Таблица 1 – К сравнению низкопрофильных АС.

Статья	Высота профиля	Продольные размеры	Рабочая полоса частот	Поляризация
Andrea Vallecchi, et al. Low Profile Fully Planar Folded Dipole Antenna on a High Impedance Surface // IEEE Trans. Antennas Propag. 2012. V. 60. No. 1. P. 51–62.	$0.059\lambda_0$	$0.64\lambda_0 \times 0.7\lambda_0$	6%	однополяриза ционная
Yong-Wei Zhong, et al. Gain enhancement of bow-tie antenna using fractal wideband artificial magnetic conductor ground // Electronics Letters. 2015 V. 51. No. 4. P. 315–317.	$0.14\lambda_0$	$0.33\lambda_0 \times 0.45\lambda_0$	16.8%	однополяриза ционная
Haider R. Raad, et al. Flexible and Compact AMC Based Antenna for Telemedicine Applications // IEEE Trans. Antennas Propag. 2013. V. 61. No. 2. P. 524–531.	$0.012\lambda_0$	$0.54\lambda_0 \times 0.54\lambda_0$	18%	однополяриза ционная
Tangjie Yuan, et al. Dual-Layer EBG Structures for Low-Profile “Bent” Monopole Antennas // Progress In Electromagnetics Research B. 2013. V. 47. P. 315–337.	$0.029\lambda_0$	$1.62\lambda_0 \times 1.62\lambda_0$	24.4%	однополяриза ционная
Aaron K. Shackelford et al. Design of small-size wide-bandwidth microstrip-patch antennas // IEEE Antennas and Propag. Magazine. 2003. V. 45. No. 1. P. 75–83.	$0.1\lambda_0$	$0.659\lambda_0 \times 0.374\lambda_0$	42%	однополяриза ционная

Aaron K. Shackelford, et al. Design of small-size wide-bandwidth microstrip-patch antennas // IEEE Antennas and Propag. Magazine. 2003. V. 45. No. 1. P. 75-83.	$0.1\lambda_0$	$0.475\lambda_0 \times 0.396\lambda_0$	40%	однополяриза ционная
F. Mohamadi Monavar, N. Komjani. Bandwidth enhancement of microstrip patch antenna using jerusalem cross-shaped frequency selective surfaces by invasive weed optimization approach // Progress In Electromagnetics Research. 2011. V. 121. P. 103-120.	$0.1\lambda_0$	$1.2\lambda_0 \times 1.2\lambda_0$	8.41%	однополяриза ционная
Wanchen Yang, et al. A Wideband and High-Gain Edge-Fed Patch Antenna and Array Using Artificial Magnetic Conductor Structures // IEEE Antennas and wireless propag. letters. 2013. V. 12. P. 769-772.	$0.05\lambda_0$	$1.3\lambda_0 \times 1.7\lambda_0$	20.45%	однополяриза ционная
Johan Joubert, et al. CPW-Fed Cavity-Backed Slot Radiator Loaded With an AMC Reflector // IEEE Trans. Antennas Propag. 2012. V. 60. No. 2. P.735-742.	$0.063\lambda_0$	$1.02\lambda_0 \times 0.82\lambda_0$	5%	однополяриза ционная
Mohammed Ziaul Azad, Mohammad Ali. Novel Wideband Directional Dipole Antenna on a Mushroom Like EBG Structure // IEEE Trans. Antennas Propag. 2008. V. 56. No. 2. P. 1242–1250.	$0.041\lambda_0$	$0.71\lambda_0 \times 0.53\lambda_0$	36% (КСВ<2.5)	однополяриза ционная
Hossein Malekpoor, et al. Improved Radiation Performance of Low Profile Printed Slot Antenna Using Wideband Planar AMC Surface // IEEE Trans. Antennas Propag. 2016. V. 64. N. 11. P. 4626-4638.	$0.133\lambda_0$	$1.17\lambda_0 \times 1.9\lambda_0$	86.48%	однополяриза ционная
Jean-Marc Barfco, et al. AMC Low Profile Wideband Reference Antenna for GPS and GALLILEO Systems // IEEE Trans. Antennas Propag. 2008. V. 56. No. 8. P. 2540–2547.	$0.057\lambda_0$	$0.69\lambda_0 \times 0.69\lambda_0$	33% (КСВ<2.5)	двухполяриза ционная
Wei Hu, et al. Wideband, Low-Profile, Dual-Polarized Slot Antenna with an AMC Surface for Wireless Communications // International Journal of Antennas and Propagation. V. 2016 (2016). P. 8.	$0.12\lambda_0$	$2.52\lambda_0 \times 2.52\lambda_0$	36.7%	двухполяриза ционная
Разработанная АС	$0.07\lambda_0$	$1.1\lambda_0 \times 1.1\lambda_0$	39% (КСВ<2.1)	двухполяриза ционная

Четвертый раздел диссертационной работы посвящен периодическим СВЧ композитным структурам с электромагнитной запрещенной зоной (EBG) [1, 5].

Рассмотрено использование EBG структур для подавления поверхностных волн и устранения эффекта ослепления в печатных ФАР. На основе EBG структуры разработан излучатель (рисунок 11) с малой высотой профиля ($h = \lambda / 10$) для перспективных АФАР функционирующих в X-диапазоне. Излучатель состоит из многослойной печатной платы СВЧ 1, закрепленной на металлическом основании 2. Печатная плата СВЧ 1 содержит симметричный вибратор 3, расположенный над EBG структурой 4, а также схему возбуждения вибратора 5.

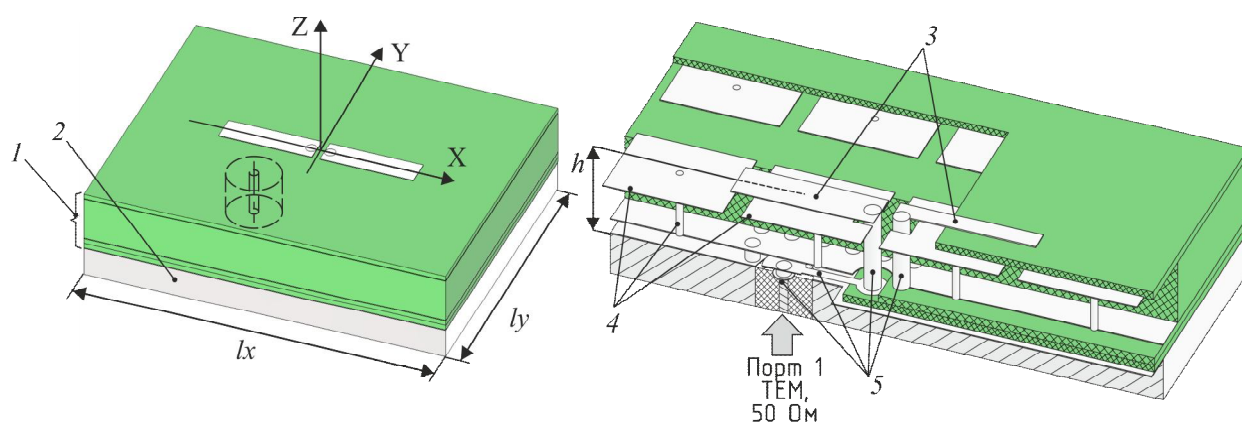


Рисунок 11 – Внешний вид модели печатного вибраторного излучателя на поперечной печатной плате с EBG структуры.

Использование EBG структуры позволило подавить поверхностные волны и устранить эффект ослепления ФАР. На рисунке 12 приведены графики частотной зависимости модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ от входа излучателя в модели бесконечной решетки для различных углов сканирования.

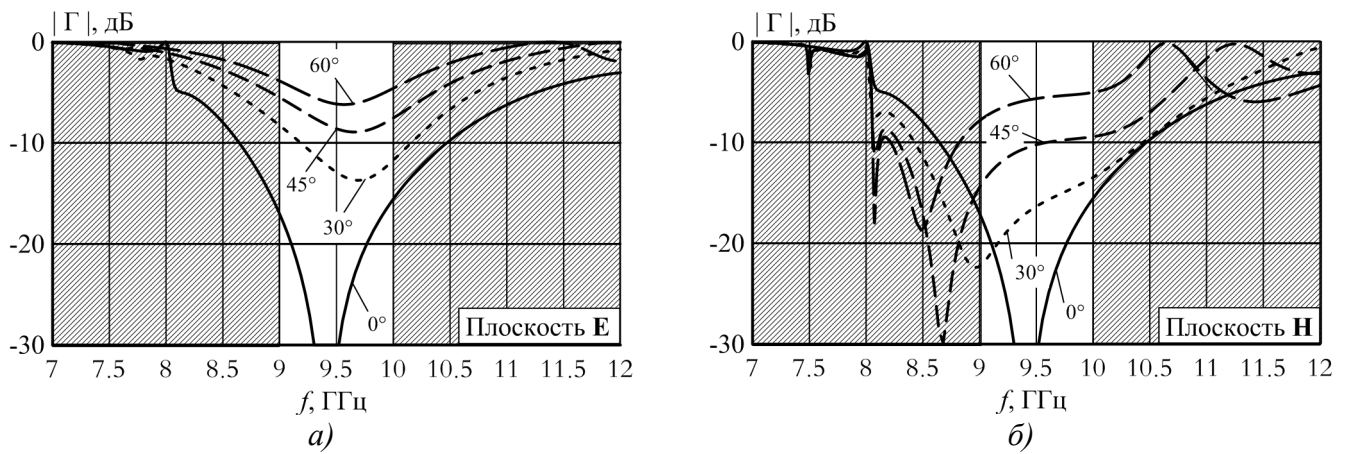
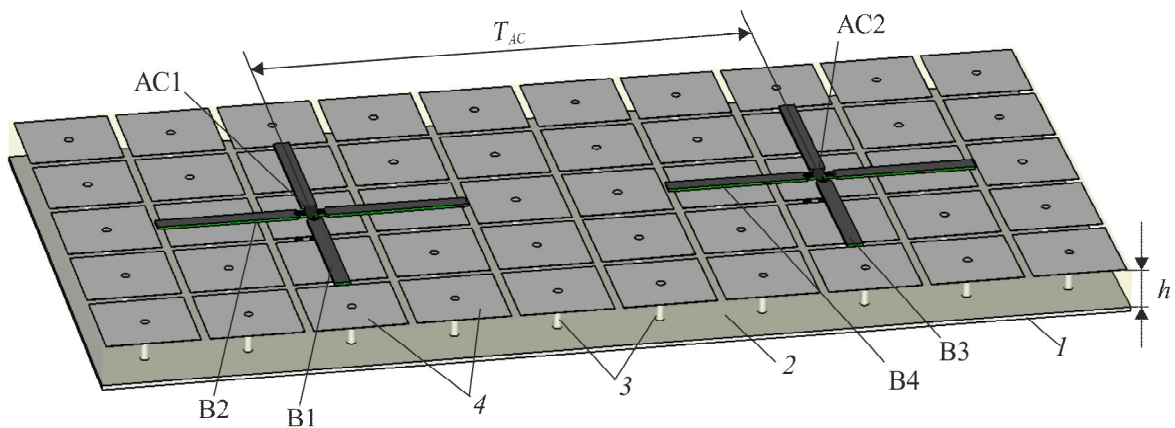


Рисунок 12 – Графики частотной зависимости модуля коэффициента отражения от входа излучателя для различных углов сканирования.

Рассмотрены ПСК структуры с электромагнитной запрещенной зоной для увеличения развязки между элементами в двухполяризационных антенных системах. На рисунке 13 приведен общий вид АС УВЧ-диапазона ($\lambda_0 = 69$ см), состоящей из двух подсистем, разнесенных на расстояние $T_{AC} = 0.49\lambda_0$, с ортогональными поляризациями. Высота профиля разработанной развязанной АС составила $T_{AC} = 0.044 \lambda_0$.



1 – проводящий экран; 2 – диэлектрический слой с ϵ_l ; 3 – цилиндрические проводники; 4 – металлические пластины; АС1 – антенная система 1; АС2 – антенная система 2; В1 – вибратор 1; В2 – вибратор 2; В3 – вибратор 3; В4 – вибратор 4.

Рисунок 13 – Антенная система УВЧ-диапазона.

На рисунке 14 приведены графики частотной зависимости модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ от входа излучателей (рисунок 14 а) и развязки между излучателями подсистем одноименной поляризации (рисунок 14 б). EBG структура позволила уменьшить взаимовлияние между излучателями двухполяризационной антенной системы на 3-10 дБ по сравнению с традиционным случаем.

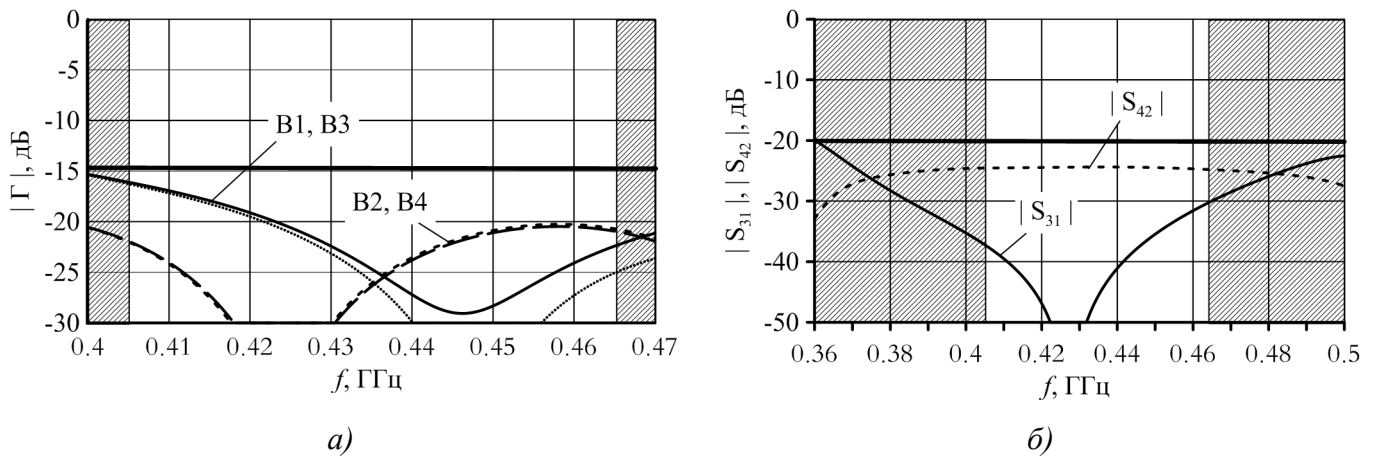


Рисунок 14 – Результаты моделирования АС: а) – модуль коэффициента отражения от входа излучателя; б) – взаимовлияние.

Проведено макетирование и экспериментальные измерения одиночной подсистемы разработанной АС. На рисунке 15 б) приведены результаты измерения частотной зависимости модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ от входов излучателей В1 и В2.

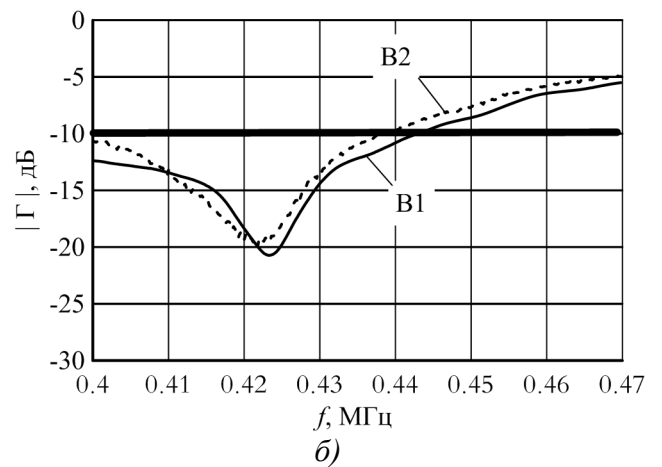
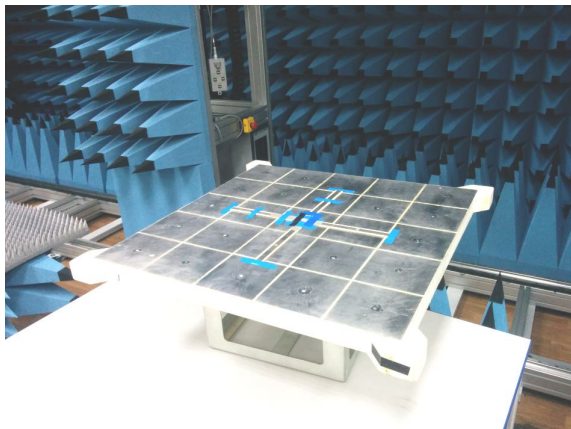


Рисунок 15 – Макетирование и измерения излучателя УВЧ-диапазона: а) – общий вид; б) – модуль коэффициента отражения от входа излучателя.

Заключение

Диссертация посвящена использованию периодических СВЧ композитных структур для улучшения характеристик бортовых антенных систем. При исследовании получены следующие **основные результаты**:

1. Синтезированы каскадные и многорезонансные периодические СВЧ композитные структуры с частотно-селективными свойствами, реализующие полосно-заграждающие фильтры сантиметрового диапазона, последовательно реализуя этапы перехода от фильтра-прототипа на сосредоточенных элементах к их высокочастотному аналогу. Предложены и обоснованы электродинамические модели синтезированных ЧСС и проведено их полномасштабное моделирование, включающие сопоставление различных методов расчета, оценку влияния геометрических и электрофизических параметров на характеристики ЧСС и их зависимости от угла падения и поляризации волны. Выявлен механизм «ослепления» ЧСС, обусловленный резонансными процессами в системе ЧСС–АР, приводящий к неполному подавлению отдельных лепестков Брэгга

ДОР на некоторых частотах и углах падения зондирующей волны. Предложены способы устранения эффекта «ослепления» ЧСС путем внедрения поглощающего материала.

2. Разработана антенная система, объединяющая ФАР L-диапазона, размещаемую в отклоняемом носке передней консоли крыла летательного аппарата, ЧСС с полосно-заграждающей пространственно-частотной характеристикой и поглощающий материал на основе резистивных печатных элементов, с амплитудой лепестков Брэгга в полосе частот 8-18 ГГц в диапазоне углов облучения $10...55^\circ$ на 5-25 дБ меньше, чем у исходной ФАР. При этом, коэффициент усиления разработанной АС, по сравнению с исходной ФАР, не более чем на 0.3 дБ меньше в полосе частот 1..1.6 ГГц и секторе сканирования ± 45 градусов.

3. Выявлены особенности конечных ПСК структур со свойствами искусственного магнитного проводника и близко расположенным источником в зависимости от их реализации, формы и размера подстилающей поверхности. В частности, для структуры типа «грибы», расположенной на проводящем экране размером большим, чем размер структуры, эти особенности проявляются в деградации ДН АС в Е-плоскости (возникновении провала в нормальном направлении ДН) в согласованной полосе рабочих частот и обусловлены излучением вертикальных проводников АМС структуры. При расположении АС на планарной АМС структуре наблюдается деградация и образование провала в Н-плоскости ДН, вызванная равенством продольного размера конечной АМС структуры и резонансной длины волны ТЕ моды. Предложен метод устранения провала в ДН АС расположенной на планарной АМС структуре, путем использования системы из двух «сдвоенных» вибраторных излучателей, запитываемых синфазно и разнесенных на расстояние $D \sim \lambda_{\text{п}} / 2$ в плоскости провала.

4. Разработаны ПСК структуры со свойствами искусственного магнитного проводника, предложены и обоснованы их электродинамические модели и проведено полноволновое моделирование в составе АС, показавшее возможность снижения высоты профиля двухполяризационных АС. В частности, комплексная разработка низкопрофильной конформной двухполяризационной антенной системы ОВЧ-диапазона ($\lambda_0 = 2.3$ м) авиационного комплекса землеобзора с искусственным магнитным проводником позволило снизить высоту профиля АС до $0.07\lambda_0$ и расширить полную полосу рабочих частот 40% по уровню $K_{\text{СВ}} \leq 2.1$, обеспечить низкий уровень заднего излучения (менее -10 дБ в рабочем диапазоне АС) и развязку между ортогональными поляризациями не более -35 дБ, что позволит улучшить радиотехнические характеристики АС и сохранить аэродинамические свойства летательного аппарата.

5. Разработаны ПСК структуры со свойствами электромагнитной запрещенной зоны, предложены и обоснованы их электродинамические модели, проведено полноволновое моделирование в составе АС, показавшее возможность подавления поверхностных волн, устранения эффекта ослепления в печатных ФАР и увеличения развязки между элементами АР. В частности, комплексная разработка антенной системы УВЧ-диапазона ($\lambda_0 = 69$ см), состоящей из двух

подсистем с ортогональными поляризациями, космического комплекса землеобзора с ПСК структурами позволило уменьшить профиль АС до $0.055\lambda_0$ при ширине полосы рабочих частот 14% по уровню КСВ ≤ 2 , развязкой в кроссполяризационных каналах не более -30 дБ, уменьшить эффект взаимовлияния между подсистемами АС на 3-20 дБ, что позволяет улучшить радиотехнические характеристики АС и компактно размещать антенное устройство внутри обтекателя при выводе космического аппарата на орбиту.

Цитированная литература

1. *Frontiers in antennas: next generation design & engineering* / ed. *Gross F.B.* McGraw-Hill Companies. 2011. P. 526.
2. Sievenpiper D.F., Zhang L., Broas R.F.J., Alexopolous N.G., Yablonovitch E. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band // *IEEE Trans. on microwave theory and techniques*. 1999. V. 57. No.11. 1999. P. 2059-2074.
3. Munk B.A. *Frequency-Selective Surfaces: Theory and Design*. N.Y.: John Wiley & Sons. 2000. P. 440.
4. Tretyakov S. *Analytical modeling in applied electromagnetics*. Artech House. 2003. P. 284.
5. Yang F., Rahmat-Samii Y. *Electromagnetic band gap structures in antenna engineering*. Cambridge University Press. 2009. P. 266.

Список публикаций автора по теме диссертации

Статьи в журналах перечня ВАК министерства образования и науки РФ:

1. Гринев А.Ю., Ильин Е.В., Волков А.П. Расчет параметров поверхности с высоким импедансом для низкопрофильных вибраторных антенн // *Антенны*. 2012. №10. С. 57–62.
2. Грибанов А.Н., Ильин Е.В., Зайкин А.Е., Волков А.П. Моделирование фазированных антенных решеток конечных размеров из волноводных и печатных излучающих элементов // *Антенны*. 2013. №4. С. 9–21
3. Гринев А.Ю., Курочкин А.П., Волков А.П. Низкопрофильная развязанная антенная система на основе поверхности с высоким импедансом // *Антенны*. 2014. №9. С. 4–11
4. Волков А.П., Козлов К.В., Асиновский Г.С., Мезин В.Р. Низкопрофильный двухполяризационный излучатель АФАР Р диапазона // *Антенны*. 2016. №9. С. 96–101.
5. Гринев А.Ю., Волков А.П., Синани А.И., Мосейчук Г.Ф. Полосно-заграждающие частотно-селективные структуры для контроля диаграммы обратного рассеяния линейной АФАР L-диапазона // *Антенны*. 2016. №10. С. 96–101.

В других изданиях:

6. Грибанов А.Н., Ильин Е.В., Зайкин А.Е., Волков А.П. Моделирование фазированных антенных решеток конечных размеров из волноводных и печатных излучающих элементов // коллективная

монография под ред. А.Ю. Гринева. Научно-технические серии: Моделирование, проектирование и технологии СВЧ-устройств и ФАР, М.: Радиотехника, 2014. С. 24-35.

7. Ильин Е.В., Волков А.П. Поверхность с высоким импедансом для низкопрофильных вибраторных антенн и антенных решеток // в кн. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения 2013-2015 / под ред. Ю.И. Белого. М.: Радиотехника. 2013. С. 195-200

8. Гринева А.Ю., Курочкин А.П., Волков А.П. Низкопрофильный развязанный излучатель на основе поверхности с высоким импедансом // в кн. Антенно-фидерные и оптоэлектронные устройства / под ред. В.С. Вербы и А.П. Курочкина. М.: Радиотехника. 2014. С. 216-226

9. Мосейчук Г.Ф., Синани А.И., Гринева А.Ю., Ильин Е.В., Волков А.П. Оценка и контроль диаграммы обратного рассеяния линейной ФАР L-диапазона // в кн. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения / под ред. Ю.И. Белого. М.: Радиотехника. 2016. С. 620 – 636.

10. Гринева А.Ю., Волков А.П., Измайлов А.А. Композитные СВЧ структуры в антенных система // в кн. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения / под ред. Ю.И. Белого. М.: Радиотехника. 2016. С. 594 – 606.

Тезисы докладов:

11. Ильин Е.В., Волков А.П. Поверхность с высоким импедансом для низкопрофильных вибраторных антенн // Сборник тезисов докладов московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2012», Москва, 17-20 апреля 2012 г. С. 85

12. Волков А.П. Низкопрофильные печатные вибраторные антенные решетки дециметрового диапазона с электронным управлением лучом // Сборник тезисов докладов московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2013», Москва 16 – 18 апреля 2013 г. С. 20

13. Гринева А.Ю., Ильин Е.В., Волков А.П. СВЧ-композитные структуры с электромагнитной запрещенной зоной для улучшения характеристик печатных антенных систем // Сборник докладов I Всероссийской Микроволновой конференции – Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2013 г. С. 320–324.

14. Ильин Е.В., Волков А.П. СВЧ-композитные структуры в антеннах и антенных решетках // Сборник аннотаций работ международного межотраслевого молодёжного научно-технический форума «Молодежь и будущее авиации и космонавтики», Москва, 2013 г. С. 182-184.

15. Волков А.П., Кузнецов Г.Ю., Бронников Д.В. СВЧ-композитные структуры с электромагнитной запрещенной зоной для создания низкопрофильных антенных систем // Сборник тезисов докладов московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2014», Москва, 22–24 апреля 2014 г. С. 142–143.

16. Волков А.П., Козлов К.В. Низкопрофильная антенная система УВЧ диапазона // Сборник докладов пятой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные

вопросы развития систем и средств воздушно-космической обороны», Москва, 25-27 сентября 2014 г. С. 103-108.

17. Измайлов А.А., Волков А.П. Частотно-селективные структуры для контроля эффективной поверхности рассеяния линейной ФАР «L»-диапазона // Сборник тезисов докладов московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2015», Москва, 21–23 апреля 2015 г. Москва. С. 130–131.

18. Гринев А.Ю., Волков А.П., Измайлов А.А. Частотно-селективные структуры для контроля диаграммы обратного рассеяния линейной АФАР L диапазона // Сборник тезисов 14-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2015», Москва, 16-20 ноября 2015 г. С. 234-236.

19. Измайлов А.А., Волков А.П. Низкопрофильная спутниковая антенная система ОВЧ диапазона // Сборник тезисов докладов XLII Международной молодежной конференции «Гагаринские чтения», Москва, 12-15 апреля, 2016 г. Том 1. С. 487-488

20. Волков А.П. Каскадные частотно-селективные структуры для контроля диаграммы обратного рассеяния линейной ФАР L диапазона // Сборник тезисов докладов XLII Международной молодежной конференции «Гагаринские чтения», Москва, 12-15 апреля, 2016 г. Том 1. С. 495-496

21. Батаев В.Я., Ильин Е.В., Волков А.П. Композитные СВЧ-структуры в бортовых антенных системах // Тезисы докладов научно-технической конференции ФО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ электроника – 2016», Фрязино, 18-19 мая 2016 г. С. 49-50.

22. Гринев А.Ю., Волков А.П., Синани А.И., Мосейчук Г.Ф. Частотно-селективные структуры для контроля диаграммы обратного рассеяния линейной ФАР L диапазона // Сборник тезисов докладов «Семнадцатой ежегодной научной конференции ИТПЭ РАН», Москва, 16-19 мая 2016 г. С. 46-47

23. Измайлов А.А., Волков А.П. Низкопрофильная спутниковая антенная система ОВЧ-диапазона // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Том 5. С. 1023-1029.

24. Воскресенский Д.И., Волков А.П., Гринев А.Ю. Периодические СВЧ композитные структуры в бортовых антенных системах // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Том 1. С. 6-17.