

На правах рукописи



Михайлов Артемий Николаевич

ПЕЧАТНЫЕ РЕФЛЕКТОРНЫЕ АНТЕННЫ  
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН  
С ПОВОРОТОМ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Специальность: 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт- Петербург  
2020

Работа выполнена в акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Радар ммс» в лаборатории антенн с электромеханическим сканированием Научно-производственного комплекса «Радиолокационных систем и комплексов».

Научный руководитель:

**Кирпанев Алексей Владимирович**

доктор технических наук, доцент, начальник отдела антенн W-диапазона Акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», г. Санкт-Петербург

Официальные оппоненты:

**Парнес Михаил Давидович**

д.т.н., главный конструктор ООО «Резонанс» г. Санкт-Петербург

**Ривкин Марк Ильич**

к.т.н., главный специалист научного отдела управления системного проектирования, АО «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится 25 декабря 2020 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)» по адресу 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета [www.etu.ru](http://www.etu.ru) в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах».

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д.5.

Автореферат разослан 23 октября 2020 года

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.238.03,  
кандидат технических наук



М.Е. Шевченко

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** На протяжении последних десятилетий проявляется заметный интерес к разработке радиосистем миллиметрового диапазона волн (ММДВ), а в настоящее время данный вопрос приобретает особую актуальность. Это связано с развитием телекоммуникационных систем, разработкой автомобильных радиолокационных систем (РЛС) и реализации концепции “умных дорог”, а также активным внедрением беспилотных летательных аппаратов. Как известно, телекоммуникационные системы ММДВ, обладающие широкополосностью, способны в несколько раз увеличить плотность информационного потока. РЛС ММДВ должны, фактически, выполнять функции оптических систем в любое время суток, при любых погодных условиях и даже в условиях пыльных бурь и задымленности. При этом, неоспоримыми преимуществами обладают двухканальные скомплексированные РЛС с существенным разнесением несущих частот, один из каналов которых – миллиметровый.

При разработке радиосистем ММДВ и, особенно, 3-х ММДВ волн предъявляются повышенные требования к точности, технологичности антенн и, как следствие, повторяемости их от образца к образцу. Антенны обзорных РЛС должны, как правило, обеспечивать широкоугольный сектор сканирования. Современные тенденции в антенной технике связаны с разработкой фазированных и активных фазированных антенных решеток (ФАР/АФАР).

В России больших успехов в разработке ФАР ММДВ достигли сотрудники МВТУ им. Н.Э. Баумана – В.М. Крехтунов, Ю.С. Русов, Е.В. Комиссарова. Вместе с тем, в нашей стране ФАР 3-х ММДВ имеют высокую стоимость, а технология полностью не отработана.

Радиолокационные задачи обзорных РЛС гражданского назначения успешно решаются с помощью сканирующих рефлекторных антенн. На сегодняшний день для радиосистем ММДВ в качестве общепризнанного решения являются двухрефлекторные антенны с поворотом плоскости поляризации (АППП). Среди наиболее известных авторов, посвятивших свои труды разработке и исследованию АППП ММДВ, следует отметить Д. Ханфлинга и Г. Зрничу, В. Боркара, Э. Хольцмана. Общей проблемой для АППП является сложность изготовления основного элемента - параболического трансрефлектора, связанную с необходимостью выполнения жёстких требований к профилю криволинейной поверхности, сложными технологическими операциями напыления и скрайбирования для нанесения поляризационной структуры. Вместе с тем известны антенны ММДВ с плоским зонированным рефлектором Френеля, различным

вариантам реализации которых посвящены труды Ю. Гуо, С. Бартона, Т. Райта, Д. Гаррета, Д. Вилтса, Б. Нгуен, К. Ямомото и других авторов.

Таким образом, перспективным представлялся поиск научно обоснованных решений, связанных с разработкой в ММДВ АППП с плоскими рефлекторами, поляризационные структуры которых выполнены по отработанной на сегодняшний день технологии изготовления печатных плат.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование следующих сканирующих антенн с плоскими печатными рефлекторами ММДВ:

- АППП ММДВ;
- Двухдиапазонной антенной системы (ДАС) состоящей из волноводно-щелевой антенной решетки (ВЩАР) сантиметрового диапазона волн (СМДВ) и АППП ММДВ.

**Задачами диссертационного исследования** являются:

- анализ пути и уровня развития антенн ММДВ, специфики применяемых технологий и методов построения плоских печатных диаграммообразующих и поляризационных рефлекторов сканирующих зеркальных антенн ММДВ;
- разработка методики расчета геометрических параметров плоского печатного трансрефлектора АППП ММДВ и её верификация на основе компьютерного моделирования при центральном и вынесенном расположении облучателя АППП;
- разработка конструкций, компьютерных моделей и экспериментальных образцов АППП ММДВ, с плоскими печатными трансрефлекторами, выполнение вычислительных и натурных исследований, с целью определения характеристик излучения и влияния на них возможных дефектов изготовления;
- разработка ДАС, состоящей из ВЩАР СМДВ и АППП ММДВ, выполнение вычислительных исследований с целью поиска пути уменьшения взаимного влияния на характеристики излучения ДАС в обоих диапазонах частот.

**Объектом исследования** является АППП ММДВ диапазона, а также ДАС, с существенно разнесенными частотами.

**Предметом исследования** являются: структура и характеристики поляризационных плоских рефлекторов антенн АППП ММДВ; конструкция и характеристики АППП ММДВ с плоскими печатными трансрефлекторами; конструкция и характеристики ДАС на основе АППП ММДВ и ВЩАР СМДВ; влияние щелей на характеристики АППП ММДВ, а

поляризационных структур твистрефлектора АППП ММДВ – на характеристики ВЦАР СМДВ.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач применялись методы: геометрическая оптика при разработке методики расчета геометрических параметров плоских печатных трансрефлекторов; интегральные уравнения с использованием каналов Флоке для расчёта математических моделей поляризационных структур; конечных интегралов во временной области, основой которого являются уравнения Максвелла в интегральной форме, для вычислительных исследований математических моделей полноразмерных антенн и антенных систем; метод измерений в дальней зоне амплитудных диаграмм направленности (ДН) при натуральных исследованиях макетных образцов антенн.

**Научная новизна.** полученных в диссертации результатов, заключается в следующем:

- Разработана и научно обоснована методика расчета геометрических параметров конструкции плоских печатных трансрефлекторов осесимметричной и не осесимметричной структур для АППП ММДВ, отличающаяся от известных совместным применением методов геометрической оптики для диаграммобразующих структур и эквивалентных схем для разработки фильтров поляризации;
- Исследовано влияние кубической фазовой ошибки распределения поля в апертуре АППП ММДВ на ДН при формировании равносигнального направления (РСН) и показано её снижение в случае применения плоского печатного трансрефлектора.
- Получена зависимость коэффициентов отражения и передачи ступенчатой поляризационной структуры плоского печатного трансрефлектора от различных углов падения плоской электромагнитной волны (ЭМВ), и предложен способ увеличения поляризационной развязки.
- Разработана новая двухдиапазонная антенная система (ДАС) с существенным разнесением частот, состоящая из АППП ММДВ и ВЦАР СМДВ, работоспособность которой доказана с помощью вычислительных исследований на основе компьютерного моделирования.
- С помощью вычислительных исследований на основе компьютерного моделирования установлено влияние поляризационной структуры твистрефлектора, выполненного на диэлектрике, на характеристики ВЦАР СМДВ, предложены и реализованы конструктивные и технологические пути устранения этого влияния.

На основе полученных результатов при выполнении диссертационной работы сформулированы следующие **положения, выносимые на защиту**:

- Плоский печатный трансрефлектор, выполненный в соответствии с разработанной методикой расчета его геометрической структуры повышает технологичность изготовления, уменьшает стоимость и улучшает повторяемость характеристик излучения АППП ММДВ;
- Применение плоского печатного трансрефлектора АППП ММДВ при формировании РСН приводит к снижению УБЛ на 1,6 дБ и смещения максимума ДН на 0,1 град за счет уменьшения кубической фазовой ошибки апертурного поля.
- ДАС, реализованная на основе АППП и ВЩАР, обеспечивает работу в СМДВ и ММДВ с соотношением длин волн 10/1.
- Металлизация диэлектрических стенок щелевых отверстий твистрефлектора из решетки проводников (классический), или применение многоэлементного твистрефлектора ДАС ММДВ существенно снижает его влияние на характеристики ДАС в СМДВ.

#### **Практическая ценность и внедрение результатов работы.**

На основе разработанной методики определения поляризационной структуры плоского трансрефлектора создан макетный образец АППП ММДВ, который подтвердил соответствие характеристики при теоретическом исследовании, отдельно при натурных измерениях в дальней зоне и работе в составе РЛС.

Определены исходные данные на разработку конструкторской документации (КД) плоских рефлекторов для ДАС, разработана КД на плоские рефлекторы, включая плоские многослойные трансрефлекторы и твистрефлекторы с различной поляризационной структурой.

Результаты диссертационной работы внедрены в инициативных работах, выполняемых АО «НПП «Радар ммс» (соответствующие акты о внедрении приведены в приложении диссертации), и учебном процессе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» и дали положительные результаты при экспериментальном исследовании модернизированных антенных систем, а также подготовке новой дисциплины магистерской программы. Результаты диссертационной работы могут быть использованы на предприятиях радиотехнического профиля для разработки антенн РЛС различного назначения.

**Достоверность результатов** основывается на корректном применении численных и аналитических методов, использовании современных САПР

реализующих методы точного электродинамического расчёта, апробированных экспериментальных методик, поверенного и откалиброванного оборудования. Результаты являются воспроизводимыми и проверяемыми, наблюдается количественное и качественное совпадение результатов моделирования, экспериментальных данных и данных, известных из литературы.

**Апробация результатов.** Результаты работы были доложены и обсуждены на следующих конференциях:

- Научно-техническая конференция «Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов», АО «Концерн «Моринсис-Агат», Москва, 2017 г..
- VI Всероссийская конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 2017 г..
- 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2017 г..
- 28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2018 г..
- 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2019 г..
- Всероссийская научно-техническая конференция «Антенны и распространение радиоволн» 15-17 окт. 2019, г. Санкт-Петербург, 2019 г.

**Публикации.** Основные теоретические и практические результаты по теме диссертации опубликованы в 12 статьях и докладах, из которых 6 публикаций, из которых 1 без соавторов, в рецензируемом научном издании, рекомендованном действующим Перечнем ВАК, 1 патенте на полезную модель и 5 докладах на научно-теоретических конференциях.

**Структура и объём диссертации.** Структурно диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, выводов, заключения, списка источников и приложения. Работа изложена на 170 страницах машинописного текста и содержит 84 рисунка и 10 таблиц. Список использованных источников насчитывает 101 наименование. Приложение с актом использования результатов исследований, патента на полезную модель и дополнительными материалами изложено на 8 страницах.

### **Краткое содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, отмечены теоретическая и практическая значимость работы, научная новизна.

**В первой главе «АППП с осесимметричным трансрефлектором на основе многослойных ПАФ»** описана структура и принцип действия двухзеркальной АППП с осесимметричным параболическим трансрефлектором и выявлен основной недостаток АППП – трудоемкость изготовления трансрефлектора обусловленная следующими факторами, особенно критичными в 3-х ММДВ, которые мотивировали к созданию плоских полупрозрачных структур трансрефлектора:

- Криволинейной поверхностью параболической формы;
- Необходимость равномерного напыления металла на параболическую поверхность;
- Необходимость создания поляризационной структуры с заданными параметрами ширины и шага проводников на металлизированной части параболической поверхности.

Поиск и анализ существующих пути снижения трудоёмкости изготовления трансрефлектора АППП и увеличения воспроизводимости характеристик показал целесообразность использования устройства, построенного по принципу зонной поверхности печатной антенны Френеля (ПАФ), с параметром дискретизации фазы  $\Psi=180^\circ$ , основным недостатком которой является низкая фазовая эффективность  $k_\Psi$  не превышающая 0.41 (для параболического зеркала  $k_\Psi \approx 1$ ).

Увеличение фазовой эффективности  $k_\Psi$  достигается путём изменения конструкции зонной поверхности и приближает её характеристики излучения к параболическому отражателю. Достаточным с точки зрения обеспечения приемлемых характеристик и технологичности изготовления плоского рефлектора является  $\Psi=90^\circ$ , поскольку дальнейшее его увеличение не даёт значительного прироста  $k_\Psi$ , приводя к усложнению конструкции.

Разработанный вариант конструкции трансрефлектора, позволяющий реализовать отражатель с  $\Psi < 180^\circ$ , основан на плоской многослойной зонной поверхности Френеля (Рисунок 1). Он содержит систему из чередующихся полупрозрачных (2,3,4,n) и радиопрозрачных кольцевых зон, ограниченных концентрическими окружностями, расположенную на плоских диэлектрических подложках (5,6,M-1) и имеющих одинаковую ориентацию, ширину  $W$  и период  $S$  расположения металлических полосок полупрозрачных кольцевых зон, а также дополнительный слой диэлектрического материала (7). Зонная поверхность трансрефлектора разделена на  $i$  полноволновых полупрозрачных кольцевых зон, состоящих из  $M$  полупрозрачных кольцевых подзон. Каждая полупрозрачная кольцевая подзона отражает электромагнитную волну с фазовой задержкой  $\Delta\varphi = \lambda_d / M$  по отношению к полупрозрачным кольцевым подзонам, расположенным на



соседних диэлектрических подложках. Суммарная толщина диэлектрических подложек совместно с дополнительным слоем диэлектрического материала соответствует условию  $h_{\Sigma} = u\lambda_d/2$ ,  $u=1,2,3\dots$

Также в первой главе приведены методики теоретического расчёта и моделирования поляризационных характеристик структуры трансрефлектора с заданными геометрическими размерами. Показано, что результаты теоретического расчёта могут быть использованы при точном электродинамическом моделировании, позволяющем учитывать специфику конструкции трансрефлектора (материала и формы проводников, шероховатости поверхности диэлектрической пластины и др.).

Приведена методика теоретического расчёта и моделирования характеристики излучения конического рупорного облучателя АППП.

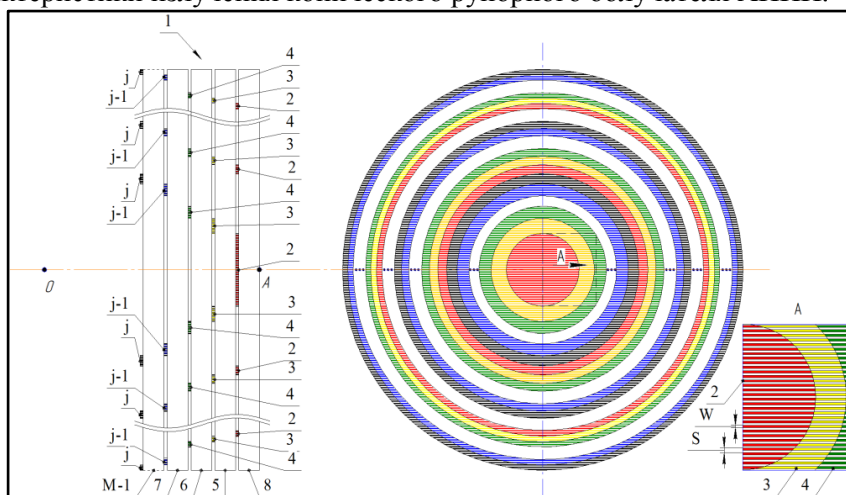


Рисунок 1 – Схематическое изображение плоского многослойного трансрефлектора.

Объектом исследования является АППП 3-х ММДВ с центральной частотой 94ГГц, с двумя типами трансрефлекторов одинакового диаметра  $D_{тр}$  (Рисунок 2): 1) Параболический с отношением фокуса к диаметру  $f/D_{тр}=0.5$ ; 2) Плоский многослойный с  $M=4$  ( $\Psi=90^\circ$ ) и отношением  $f/D_{тр}=0,36$ . Проведен теоретический расчёт исследуемых антенн. Обозначения в таблице 1: ДН – диаграмма направленности; КНД – коэффициент направленного действия; ШДН (ЗдБ) – ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности; УБЛ–уровень первого бокового лепестка.

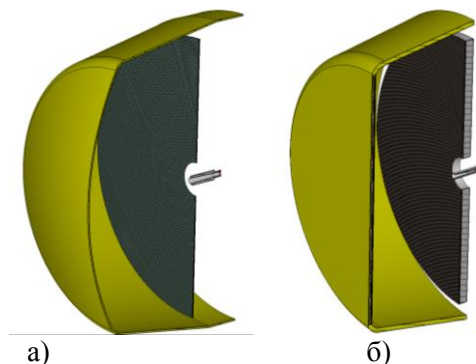


Рисунок 2 – Компьютерная модель АППП с:

а) параболическим; б) плоским многослойным трансрефлектором

Таблица 1 – Характеристики излучения АППП с двумя типами трансрефлектора при нескольких углах отклонения твистрефлектора

Тип трансрефлектора.	Плоский		Парабола		Плоский		Парабола	
	Аз.	Ум.	Аз.	Ум.	Аз.	Ум.	Аз.	Ум.
Угол отклон. твист р-ра $\alpha, ^\circ$	1	-	1	-	18	-	18	-
Угол отклонения луча ДН, $^\circ$	2,2	0	2,3	0	36,6	0	36,7	0
КНД, дБ	39,1	39,1	40,8	40,8	38,7	38,7	40,8	40,8
ШДН (3дБ), $^\circ$	1,6	1,5	1,4	1,5	1,5	1,9	1,4	1,8
УБЛ, -дБ	25,6	26,8	18,3	20,5	20,6	26,5	16,2	20,2

Анализ данных таблицы 1 показал, что ДН, сформированные АППП с разработанным плоским многослойным трансрефлектором и с параболическим трансрефлектором имеют, практически, полное соответствие.

Для экспериментального подтверждения полученных результатов, было проведено конструирование и изготовление макетных образцов АППП, с трансрефлекторами, имеющими геометрические размеры аналогичные теоретически исследованным электродинамическим моделям (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Макет плоского и параболического трансрефлектора АППП диаметром.

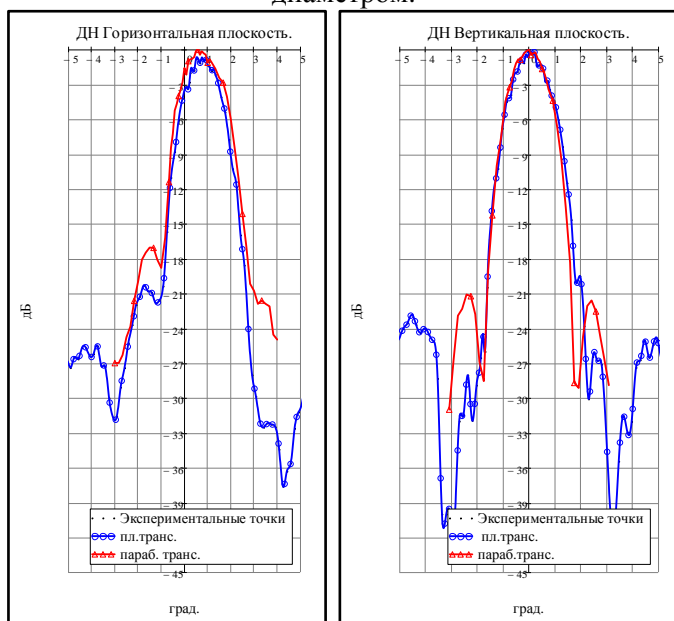


Рисунок 4 – Диаграммы направленности АППП с параболическим трансрефлектором и АППП с плоским трансрефлектором для  $\alpha=0^\circ$  в: а) Е – плоскости б) Н – плоскости

Анализ результатов измерения ДН сформированных АППП, с макетами плоских многослойных трансрефлекторов, в сравнении с ДН, сформированными устройством с параболическим трансрефлектором, для соответствующих углов отклонения твистрефлектора  $\alpha$  и положений облучателя, показал, что:

- КУ антенны с плоским трансрефлектором при  $\alpha=0^\circ$ , в зависимости от положения облучателя, ниже на  $1,5\div 1,7$  дБ. При  $\alpha=10^\circ$  КУ антенны с плоским трансрефлектором ниже на  $1,1\div 1,3$  дБ.
- ШДН антенны с плоским трансрефлектором при  $\alpha=0^\circ$ , в зависимости от положения облучателя, на  $0,04\div 0,15^\circ$  больше в азимутальной плоскости и ниже на  $0,03\div 0,13^\circ$  в угломестной плоскости. При  $\alpha=10^\circ$  ШДН антенны с плоским трансрефлектором на  $0,05\div 0,12^\circ$  больше в азимутальной плоскости и на  $0,16\div 0,24^\circ$  больше в угломестной плоскости.
- УБЛ антенны с плоским трансрефлектором при  $\alpha=0^\circ$ , в зависимости от положения облучателя, ниже на  $0,7\div 5,7$  дБ в азимутальной плоскости и на  $0,6\div 1,8$  дБ в угломестной плоскости. При  $\alpha=10^\circ$  УБЛ антенны с плоским трансрефлектором ниже  $2,3\div 8,0$  дБ в азимутальной плоскости и на  $2,4\div 6,1$  дБ в угломестной плоскости;
- Смещение максимума парциальных ДН антенны в зависимости от положения облучателя составляет  $0,7^\circ$ .
- Уровень пересечения парциальных ДН антенны в ортогональных плоскостях антенны с плоским многослойными трансрефлектором составляет  $-2,5$  дБ, что на  $0,5$  дБ больше, чем у антенны с параболическим трансрефлектором.
- Повторяемость характеристик излучения для всех исследуемых макетов плоского трансрефлектора.

Снижение КУ связано с дискретным изменением длины пути лучей в плоском трансрефлекторе, падающих и отражённых от полупрозрачных кольцевых подзон в отличие от параболического отражателя с непрерывным изменением. При этом снижение кубической фазовой ошибки в раскрыве плоского многослойного, в сравнении с параболическим трансрефлектором, привело к снижению УБЛ в плоскости смещения облучателя и незначительному изменению ШДН.

Так же следует отметить, что уровень пересечения парциальных ДН у антенны с параболическим и плоским трансрефлектором, при двух положениях облучателя, составляет  $-2\div -3$  дБ, что говорит о примерно одинаковых углах смещения максимума ДН.

Уменьшить влияние отверстия облучателя в твистрефлекторе позволяет использование не осесимметричного зеркала трансрефлектора. Предложена конструкция плоского не осесимметричного трансрефлектора в которой волновой фронт облучателя падает на поверхность под углом  $\alpha$ , определяемым смещением оси облучателя относительно фокальной оси трансрефлектора, а максимум излучения ДН, направлен по нормали к его поверхности.

На рисунке 5 показан процесс получения не осесимметричной отражательной поляризационной структуры с дугообразными подзонами, сформированной путем обрезки плоского многослойного осесимметричного трансрефлектора, и проведена аналогия с не осесимметричной параболической вырезкой.

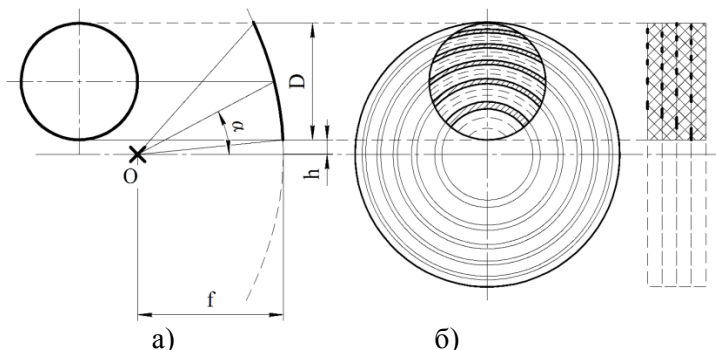


Рисунок 5 – Процесс получения вырезки плоского многослойного не осесимметричного трансрефлектора.

Исследование характеристик АППП с плоским не осесимметричным трансрефлектором в 3-х ММДВ проведено с помощью электродинамического моделирования. Исследуемая модель состоит из: облучателя – пирамидальный рупор с углом между собственной осью и фокальной осью трансрефлектора  $\alpha=38^\circ$ , позволяющим вынести его за пределы твистрефлектора; трансрефлектора, имеющего диаметр  $D_{тр}$  и дискрет фазирования  $M$  аналогичный исследованной осесимметричной конструкции с  $f/D_{тр}=0,75$ ; твистрефлектора обеспечивающего перекрытие апертуры трансрефлектора.

Результаты моделирования показали, что форма основного лепестка ДН АППП с плоским не осесимметричным трансрефлектором практически не отличается от осесимметричной плоской структуры. Основные изменения касаются снижения КНД на 0,7 дБ и роста УБЛ на 4,2 дБ в угломестной плоскости, которые можно объяснить следующими факторами:

- Несимметричным амплитудным распределением, создаваемым облучателем в вертикальной плоскости раскрыва трансрефлектора;
- Прохождением части ЭМВ, излучаемой облучателем, через пространство между полупрозрачными подзонами, с последующим излучением в свободное пространство;

– Увеличенной толщиной диэлектрического колпака, являющегося конструктивным элементом антенны, в области расположения плоского трансрефлектора.

Приведённые результаты моделирования характеристик излучения, свидетельствуют о принципиальной возможности создания не осесимметричной АППП на основе плоского многослойного трансрефлектора.

Во второй главе «Исследование влияний отклонений и дефектов геометрических параметров элементов АППП на характеристики излучения» подробно описано влияние кубической фазовой ошибки распределения поля в апертуре АППП ММДВ на ДН при формировании равносигнального направления (РСН) и показано, что:

1. Линейная составляющая, преобразованная к виду ступенчатой функции, имеет среднюю линию, совпадающую с аналогичной фазовой добавкой параболического трансрефлектора. Максимальная фазовая ошибка для плоского трансрефлектора в сравнении с параболическим составляет  $\pm 45^\circ$ ;
2. Квадратичная составляющая, необходимая для коррекции фазового фронта, в случае плоской многослойной структуры, практически полностью повторяет форму зависимости для параболического зеркала;
3. Кубическая ошибка, в отличие от параболической структуры, в раскрыве плоского трансрефлектора ниже на  $\pm 28^\circ$ , что приводит к снижению УБЛ на  $\sim 1.6$  дБ;
4. Максимальное отклонение фазового распределения плоского трансрефлектора от параболического составляет  $90^\circ$  и проявляется в центральной части и на крайних точках зеркала, где присутствует перегиб фазового распределения.

С помощью вычислительного эксперимента исследовано влияние разрывов проводников трансрефлектора на его поляризационные характеристики. Анализ результатов моделирования ячейки Флоке с периодическими граничными условиями показал, что изменение угла падения плоской горизонтально поляризованной ЭМВ на исследуемую структуру приводит к значительным снижению поляризационной развязки до  $-3$  дБ в диапазоне углов падения. Увеличение поляризационной развязки до значений не выше  $-18$  дБ во всём диапазоне углов падения плоской ЭМВ достигается за счёт замены кольцевых полупрозрачных подзон, расположенных на слое противоположном направлению падения волны, на непрерывную поляризационную структуру.

Также проведена оценка влияния отверстия в центре твистрефлектора на характеристики исследуемой антенны. Показано, что это влияние сводится к

уменьшению главного максимума ДН на  $-1,8$  дБ за счёт снижения КИП и росту уровня бокового лепестка на  $2,8$  дБ.

В третьей главе «Двухдиапазонные антенные системы на основе АППП и ВЦАР» предложена схема ДАС (рисунок 6а), функционирующая в значительно разнесённых (до 10 раз) частотных диапазонах, позволяющая решить проблему повышения разрешающей способности бортовых РЛС переднего обзора, и упростить её производство, за счёт применения широко распространенных технологий изготовления. В диапазоне верхних частот антенна выполнена по принципу АППП и состоит из трех основных элементов: (1) облучателя, например конического рупора; не осесимметричного трансрефлектора, представляющего собой диэлектрический колпак (2), в котором центральная часть выполнена в виде не осесимметричной вырезки из параболоида вращения с расположенной на ней структурой вертикальных металлических проводников (3) выполняющих роль поляризационного фильтра; твистрефлектора (4) – устройства пространственного поворота поляризации.

Низкочастотная часть ДАС представляет собой резонансную ВЦАР (5), на излучающую поверхность которой установлен твистрефлектор (4) диапазона верхних частот со сквозными отверстиями по форме, размерам и расположению, соответствующими щелевым излучателям ВЦАР (5). Твистрефлектор (4) представляет собой плоский отражатель, содержащий на одной стороне ряд параллельных металлических полосок шириной  $W$  и шагом расположения  $S$ , ориентированных под углом  $45^\circ$  к оси щелевых излучателей ВЦАР, а на другой – металлический экран.

В ходе вычислительного эксперимента установлено влияние поляризационной структуры твистрефлектора (3), выполненного на диэлектрике, на характеристики ВЦАР (4) СМДВ. Предложены и реализованы конструктивные и технологические пути устранения этого влияния за счет металлизации диэлектрических стенок отверстий твистрефлектора ММДВ из решетки проводников (Рисунок 7), или применения многоэлементного твистрефлектора, позволившие уменьшить уровень затекающего поля на  $\sim 10$  дБ.

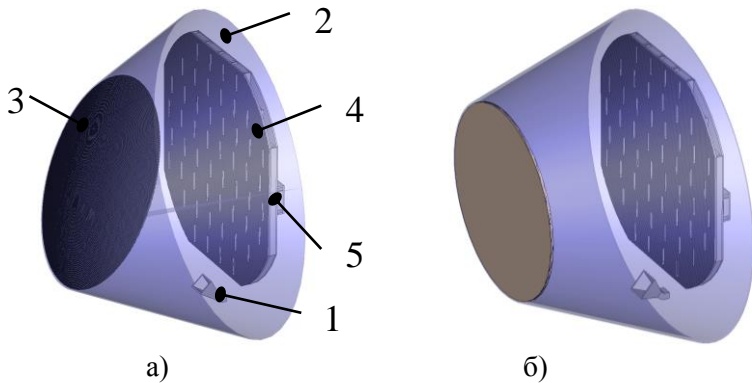


Рисунок 6 – Варианты конструкции ДАС:

а) с параболическим трансрефлектором; б) с плоским многослойным трансрефлектором

Для проверки работоспособности предложенной схемы ДАС построена модель ДАС, с разнесением частотных диапазонов 4/1 (3-х СМДВ и 8-ми ММДВ) и 10/1(3-х СМДВ и 3-х ММДВ). Положительные результаты теоретического исследования АППП с не осесимметричным плоским трансрефлектором на основе многослойной ПАФ послужили основой для создания ДАС, с плоским трансрефлектором на его основе (Рисунок 6б).

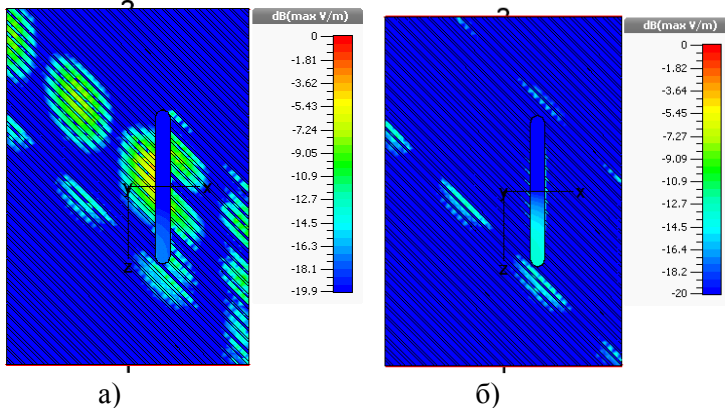


Рисунок 7 – Распределение поля на элементе ВЦАР с расположенной на нём структурой твистрефлектора:

а) без металлизации щели б) с металлизацией щели.

Параболический (рисунок 6а) и плоский с параметром  $M=4$  (рисунок 6б) трансрефлекторы ДАС имеют одинаковые параметры диаметра  $D_{тр}$  и



фокусного расстояния ( $f/D_{\text{тр}}=0.8$ ) для моделей соответствующих частотных диапазонов, что позволило объективно сравнить характеристики ДАС.

Показано, что для ДАС с разнесением частот в 4 раза (4/1) в 3-х СМДВ при использовании плоского трансрефлектора, в сравнении с параболическим, снижение КНД составило  $\sim 0,9$  дБ, а расширение ДН в обеих плоскостях не превысило 10% от значений, показанных ДАС с параболическим трансрефлектором. УБЛ увеличился в азимутальной на 6,5 дБ и угломестной плоскостях на 3,6 дБ и составили  $-21,4$  дБ и  $-16,4$  дБ соответственно. Указанные изменения связаны с влиянием дискретной структуры проводников плоского трансрефлектора, длина которых близка к резонансной для 3-х СМДВ, что приводит к значительному влиянию поля, переизлучаемого ими, на плоский фронт волны, идущий от ВЦАР, и подтверждается результатами моделирования ДАС с разнесением частот в 10 раз (10/1). Показано снижение КНД ДАС, с плоской многослойной структурой, в сравнении с параболическим трансрефлектором, на 1,5 дБ и 5 дБ в 8-ми и 3-х ММДВ соответственно связано с дискретной фазовой коррекцией плоской многослойной структуры. Замена параболического трансрефлектора плоским привела к незначительному изменению ШДН в обеих плоскостях. УБЛ ДАС, с неосесимметричным плоским отражателем, в 8-ми ММДВ увеличился как в азимутальной плоскости с  $-18,2$  дБ до  $-17,4$  дБ, так и в угломестной с  $-21,5$  дБ до  $-17,6$  дБ. Напротив, в 3-х ММДВ УБЛ ДАС практически не изменился.

Описанное влияние на характеристиках высокочастотной части ДАС обусловлено заменой стационарного облучателя, приводящей к изменению амплитудного распределения в апертуре отражателя, расположение в пространстве и геометрические размеры которых различны. Так, для ДАС с разнесением 4/1, в угломестной плоскости пирамидальный рупор для параболической структуры должен иметь ШДН по уровню  $-10$  дБ равную  $60,0^\circ$ . При этом, для плоской многослойной структуры, ШДН должна составлять  $43,1^\circ$ . В азимутальной плоскости разница ШДН по уровню  $-10$  дБ, для параболической и плоской многослойной структуры, составляет  $9,81^\circ$  не приводя к сильному увеличению УБЛ ДАС.

Данные моделирования подтвердили работоспособность предложенной схемы построения ДАС как в 8-и, так и в 3-х ММДВ, совместно с 3-х СМДВ, а также показали, что разработанная система имеет низкий уровень взаимного влияния структур одного диапазона на структуры другого и при совмещении двух независимых антенн различных диапазонов практически полностью сохраняет характеристики.

## **Основные результаты и выводы**

- Проведен анализ пути и уровня развития антенн ММДВ, специфики применяемых технологий и методов построения плоских печатных диаграммобразующих и поляризационных рефлекторов сканирующих зеркальных антенн ММДВ;
- Разработана и научно обоснована методика расчета геометрических параметров конструкции плоских печатных трансрефлекторов осесимметричной и не осесимметричной структур для АППП ММДВ, отличающаяся от известных совместным применением методов геометрической оптики для диаграммобразующих структур и эквивалентных схем для разработки фильтров поляризации;
- Разработана новая двухдиапазонная антенная система (ДАС) с существенным разнесением частот до 10/1, состоящая из АППП ММДВ и ВЦАР СМДВ, работоспособность которой доказана с помощью вычислительных исследований на основе компьютерного моделирования;
- Установлено влияние поляризационной структуры твистрефлектора, выполненного на диэлектрике, на характеристики ВЦАР СМДВ с помощью вычислительных исследований на основе компьютерного моделирования, предложены и реализованы конструктивные и технологические пути устранения этого влияния.

### **Основными научными результатами являются следующие утверждения:**

- Плоский печатный трансрефлектор позволяет реализовать отражатели, с различным параметром фазовой дискретизации, на основе фольгированных материалов с различными диэлектрическими параметрами в зависимости от требуемых характеристик излучения. Проведённый сравнительный анализ результатов теоретического и экспериментального исследования макетного образца АППП подтвердил работоспособность предложенного плоского трансрефлектора обеспечивающего приемлемые характеристики излучения.
- Приведен подробный теоретический анализ фазовых ошибок в раскрыве плоского трансрефлектора при создании РСН который показал значительное уменьшение кубических ошибок на его периферии, за счёт дискретности фазокорректирующей структуры, в сравнении с параболической структурой, позволившему снизить УБЛ на 1,6 дБ.

– Плоский печатный трансфлектор позволяет повысить технологичность изготовления, в сравнении с параболическим отражателем, за счёт использования технологии многослойных печатных плат.

Обоснованность данных выводов подтверждена в ходе экспериментальных исследований изготовленного образца АППП в рамках НИОКР, выполняемых АО «НПП «Радар ммс».

## **Результаты диссертации опубликованные в следующих работах**

### **Статьи, входящие в перечень рекомендуемых ВАК изданий:**

1. Галкина Э. В. Влияние твистрефлектора w-диапазона на характеристики двухдиапазонной антенны в х-диапазоне / Э. В. Галкина, А. В. Кирпанев, **А. Н. Михайлов** // Вопросы радиоэлектроники. – 2016. – Вып.11. – С. 35–39.

2. Кузьмин А. А. Конструкция антенны с поворотом плоскости поляризации на основе плоского трансфлектора / А. А. Кузьмин, **А. Н. Михайлов** // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – Вып.9. – С. 22–26.

3. Кирпанев А. В. Двухдиапазонная антенная система для бортовой радиолокационной станции переднего обзора / А. В. Кирпанев, **А. Н. Михайлов** // Вопросы радиоэлектроники. – 2018 – Вып.9. – С. 22–26.

4. **Михайлов А. Н** Снижение взаимного влияния элементов двухдиапазонной антенны при использовании многоэлементного твистрефлектора // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. Вып.2. – С. 15–19.

5. Батутина М.С. Антенна с поворотом плоскости поляризации на основе плоского неосесимметричного трансфлектора / М. С. Батутина, А. А. Кузьмин, **А. Н. Михайлов** // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. Вып.2. – С. 26–30.

6. Кирпанев А. В. Двухчастотные антенны с офсетными трансфлекторами / А. В. Кирпанев, **А. Н. Михайлов** // Вопросы радиоэлектроники. – 2019 – Вып.8. – С. 71–78.

### **Патенты:**

7. Пат. на полезную модель №167147, Российская Федерация. Трансфлектор / Кузьмин А. А., **Михайлов А. Н.**; Заявитель и патентообладатель АО «НПП «Радар ммс», – №2016129875, заявл. 20.07.2016. опубл. 27.12.2016.

## Статьи и тезисы в трудах российских и международных конференций:

8. **Михайлов А. Н.** Оценка возможности построения антенны с поворотом плоскости поляризации на основе плоского трансрефлектора / А. Н. Михайлов, А. А. Кузьмин // Сборник докладов научно-технической конференции «Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов» (4-5 апр. 2017, г. Москва), под общ. ред. Е. С. Новикова; АО «Концерн «Моринсис-Агат» – 2017 г. – С.219–224

9. Кузьмин А. А. Антенна с поворотом плоскости поляризации на основе плоского трансрефлектора / А. А. Кузьмин, **А. Н. Михайлов** // Сборник докладов VI D Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ » (29 мая - 1 июня 2017, г. Санкт-Петербург); СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – 2017 г. – С.340–345

10. Кузьмин А. А. Антенна с поворотом плоскости поляризации на основе плоского трансрефлектора / А. А. Кузьмин, **А. Н. Михайлов** // Материалы конференции «27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», (10-16 сент. 2017, г. Севастополь); СевГУ – 2017 – С. 597-603

11. Кирпанев А. А. Двухдиапазонная сканирующая антенна / А. А. Кирпанев, **А. Н. Михайлов** // Материалы конференции «27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», (10-16 сент. 2017, г. Севастополь); СевГУ – 2017 – С. 592-596

12. Кирпанев А. А. Двухдиапазонная антенная система / А. А. Кирпанев, **А. Н. Михайлов** // Материалы конференции «28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (9-15 сент. 2018, г. Севастополь); СевГУ – 2018 – С. 580-586

13. Кирпанев А. А. Антенная система с существенно разнесенными частотами и широкоугольным сканированием / А. А. Кирпанев, **А. Н. Михайлов** // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Антенны и распространение радиоволн» (15-17 окт. 2019, г. Санкт-Петербург) – 2019