

**На правах рукописи**



**Сучков Александр Владимирович**

**ЧАСТОТНО-СКАНИРУЮЩИЕ МОНОИМПУЛЬСНЫЕ  
АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ ТРЕХКООРДИНАТНЫХ РЛС**

**05.12.07 – АНТЕННЫ, СВЧ-УСТРОЙСТВА И ИХ ТЕХНОЛОГИИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**Москва – 2018**

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 технических наук, профессор  
Нечаев Евгений Евгеньевич  
(Московский государственный  
технический университет  
гражданской авиации)

кандидат технических наук  
Милосердов Максим Сергеевич  
(АО «Научно-исследовательский  
институт точных приборов»)

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-  
производственное предприятие «Салют»  
(АО «НПП «Салют»)

Защита диссертации состоится «30» октября 2018 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](http://mau.ru) и в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «\_\_\_» сентября 2018 года

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



М.И. Сычев

# 1 Общая характеристика работы

## Актуальность работы

В настоящее время в условиях роста требований, предъявляемых к трехкоординатным радиолокационным системам (РЛС) обзора воздушного пространства и управления воздушным движением в части обеспечения требуемой зоны обнаружения с заданными точностными характеристиками и темпом обновления выдаваемой информации, а также эффективности функционирования при воздействии пассивных помех, возникает необходимость в использовании узконаправленных сканирующих антенных систем (АС) с несколькими независимыми каналами, низким уровнем боковых лепестков (УБЛ), максимальным коэффициентом усиления [1]. Ужесточение требований к тактико-техническим характеристикам радиолокационного оборудования, в первую очередь, обусловлено необходимостью пространственного разрешения целей при высокой интенсивности полетов в зонах аэродромов и на воздушных трассах. Кроме того, с целью эксплуатации в любых климатических районах современные РЛС разрабатываются по принципу необслуживаемых станций [2], способных круглосуточно функционировать без участия технического персонала и обеспечивать формирование единого информационного пространства о состоянии воздушной обстановки. В составе таких систем желательно иметь надежные, необслуживаемые, антенны без управляемых элементов с наименьшей стоимостью. Практическая реализация подобных антенн, как правило, дополнительно усложняется ограничениями по массогабаритным и эксплуатационным характеристикам. Одним из возможных направлений для решения указанных проблем является применение в составе современных РЛС антенных решеток с частотным сканированием (АРЧС), которые представляют собой полностью пассивные устройства и, соответственно, надежный, сравнительно простой и наименее дорогой вариант для осуществления электрического управления диаграммой направленности (ДН).

Частотно-сканирующие антенные решетки рассматривались многими авторами: Дерюгин Л.Н., Бахрах Л.Д., Воскресенский Д.И., Ленци Ю.И., Зимин Д.Б., Кашин А.В., Немоляев А.И., Skolnik M.I., Hansen R.C., Wang H., Wheeler M.S., Kinsey R.R., Begovich N.A., Ishimaru A. и др. Наблюдаемый в последние годы интерес к практической реализации таких антенн в моноимпульсном исполнении, вызвали публикации: Ajioka J.S. «Frequency-scan antennas» [3], Бородин Н.Д., Исаков М.В. «Моноимпульсная антенна с частотным сканированием» [4], посвященные частотно-сканирующим антенным решеткам трехкоординатных РЛС, в которых используется моноимпульсный метод пеленгации, позволяющий существенно повысить точность измерения угловых координат, по сравнению с применяемым в одноканальных АРЧС методом интерполяции угловой координаты путем сравнения амплитуд в соседних лучах, сформированных на разнесенных частотах.

Тем не менее, недостаточно исследованы многие важные для практической реализации моноимпульсных АРЧС вопросы. В том числе: поиск и внедрение научно обоснованных технических решений, направленных на устранение характерных недостатков различных вариантов построения диаграммообразующих схем (ДОС) моноимпульсных АРЧС; определение возможности достижения в полосе рабочих частот в плоскости частотного сканирования низкого УБЛ ДН суммарного канала без ухудшения КПД ДОС, а также обеспечения равенства амплитуд в максимумах и увеличения глубины нуля ДН разностного канала при ограничении массогабаритных характеристик антенной системы; обеспечение согласования суммарного и разностного входов в полосе рабочих частот при широкоугольном сканировании через нормаль к апертуре антенны; специфика реализации низкого УБЛ ДН суммарного и разностного каналов; разработка электродинамических моделей ДОС, методик для их численного анализа и последующей оптимизации параметров; обоснование преимуществ технических решений с внедрением моноимпульсных АРЧС в конкретные практические разработки, например, в РЛС обзора воздушного пространства и управления воздушным движением.

### **Цель и задачи работы**

Целью диссертационной работы является разработка частотно-сканирующих моноимпульсных антенных решеток трехкоординатных РЛС с высоким коэффициентом усиления, низким УБЛ, повышенной глубиной нуля и равенством амплитуд в максимумах ДН разностного канала, низкопрофильной конструкцией и возможностью широкоугольного сканирования через нормаль к апертуре на основе модифицированных схем построения с учетом высокоэффективных технологий и средств современного производства.

В соответствии с поставленной целью в работе были решены следующие задачи:

1. Модификация схем построения моноимпульсных АРЧС с учетом предъявляемых требований и обоснование технических решений, принятых к реализации.
2. Исследование возможности достижения в полосе рабочих частот в плоскости частотного сканирования низкого УБЛ ДН суммарного канала без ухудшения КПД ДОС, а также обеспечения равенства амплитуд в максимумах и увеличения глубины нуля ДН разностного канала.
3. Исследование особенностей обеспечения согласования суммарного и разностного входов АРЧС в полосе рабочих частот при широкоугольном сканировании через нормаль к апертуре.
4. Разработка волноводно-щелевой моноимпульсной антенной решетки  $S$ -диапазона с частотным сканированием по углу места и круговым механическим сканированием по азимуту для трассовой РЛС.

5. Разработка волноводной моноимпульсной антенной решеткой аэродромной РЛС  $X$ -диапазона с ДН веерного типа и частотным сканированием по азимуту.

6. Анализ путей реализации ДОС с независимым формированием амплитудно-фазового распределения суммарного и разностного каналов АРЧС в плоскости частотного сканирования.

### **Методы исследования**

Аппарат теории антенн, устройств СВЧ и математической физики, включая метод конечных элементов для численного электродинамического моделирования, численные методы оптимизации целевых функций, программные средства систем автоматизированного проектирования для решения задач в области конструирования, анализа и технологической подготовки производства, а также экспериментальные методы антенных измерений.

### **Научная новизна работы**

1. Разработан комплекс технических решений, заложенных при построении моноимпульсных частотно-сканирующих антенных решеток на основе модифицированных ДОС последовательного и последовательно-параллельного типов, позволяющий при осуществлении широкоугольного сканирования через нормаль к апертуре получить высокий коэффициент усиления и низкий УБЛ ДН суммарного канала, а также ДН разностного канала с повышенной глубиной нуля и равенством амплитуд в максимумах, что обеспечивает повышение точности измерения угловых координат моноимпульсным методом, низкопрофильность конструкции антенны и улучшение тактико-технических характеристик трехкоординатных РЛС.

2. Проведено исследование электродинамических характеристик волноводных направленных ответвителей с Т-образным элементом связи в  $S$ - и  $X$ -диапазоне частот, что позволило создать технологичную конструкцию ответвителя, интегрируемую с волноводными ДОС в качестве типового элемента распределения мощности.

3. Выявлены ошибки амплитудно-фазового распределения (АФР), формируемого ДОС моноимпульсной АРЧС с последовательным питанием излучателей, обусловленные диапазонными свойствами направленных ответвителей и приводящие к существенному ухудшению УБЛ ДН.

4. Предложен принцип реализации широкополосного низкопрофильного волноводного мостового устройства с регулируемым коэффициентом деления мощности на основе двух 3-децибельных направленных ответвителей и фазовращателя, включенного между ними, позволяющий устранить асимметрию амплитудного распределения (АР) ДОС последовательного типа.

5. Представлен способ обеспечения согласования АРЧС в рабочем диапазоне частот при широкоугольном сканировании через нормаль к апертуре антенны, позволяющий расширить

сектор сканирования и полосу рабочих частот, улучшить согласование, повысить коэффициент усиления и снизить трудоемкость изготовления антенны.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработанные принципы построения и оптимизации суммарно-разностной ДОС последовательного типа, позволили обеспечить возможность практической реализации надежных низкопрофильных моноимпульсных АРЧС  $S$ - и  $X$ -диапазона, с низким УБЛ суммарной ДН, высоким коэффициентом усиления, равенством амплитуд в максимумах и увеличенной глубиной нуля разностной ДН, возможностью широкоугольного частотного сканирования через нормаль к апертуре без ухудшения согласования в полосе рабочих частот, и, тем самым, улучшить радиотехнические и эксплуатационные характеристики трехкоординатных радиолокаторов с АРЧС в частности: точность измерения угловых координат моноимпульсным методом, эффективность функционирования в условиях пассивных помех, максимальную дальность обнаружения.

2. Разработанный принцип конструктивно-технологической реализации моноимпульсных АРЧС, позволяет обеспечить простоту и точность изготовления и сборки, возможность реализации групповых методов изготовления деталей, высокие прочностные и эксплуатационные показатели, снижение трудоемкости и высокий процент выхода годных изделий при серийном производстве.

3. Разработана методика, включающая алгоритм и программу расчёта суммарно-разностной ДОС последовательного типа, позволяющая минимизировать ошибки формируемого амплитудно-фазового распределения, обусловленные диапазонными свойствами направленных ответвителей, и обеспечить требуемые радиотехнические характеристики АРЧС.

4. Проведена оценка влияния допусковых погрешностей, определяемых технологией изготовления, на радиотехнические характеристики АРЧС, что позволило установить требования к точности производственного оборудования, обеспечивающие характеристики разработанных моноимпульсных АРЧС  $S$ - и  $X$ -диапазона в заданных пределах.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке частотно-сканирующих моноимпульсных антенных систем трехкоординатных РЛС сантиметрового и дециметрового диапазонов.

### **Реализация и внедрение результатов**

Реализация результатов диссертационной работы позволит модернизировать частотно-сканирующие антенные системы разработанных и перспективных аэродромных и трассовых комплексов, улучшив их радиотехнические и эксплуатационные характеристики.

Результаты диссертационного исследования, оформленные в виде акта внедрения № 100/03-630 от 19.05.2017, использованы:

– в ОКР «Наблюдатель» и ОКР «Модернизация РСР-27С, РСР-28М», проведенных «АО «НПО ЛЭМЗ» в период с 2013 г. по 2016 г. с целью создания перспективных аэродромных и трассовых РЛК обзора воздушного пространства и управления воздушным движением, способных круглосуточно функционировать без участия технического персонала и обеспечивать формирование единого информационного пространства о состоянии воздушной обстановки в интересах различных потребителей.

– при разработке, изготовлении, комплексной регулировке и серийном освоении частотно-сканирующих моноимпульсных антенных систем 125АС02 ЦИВР.464657.012, 125АС51 ЦИВР.464657.013, 275АА01 ЦИВР.464657.017, 275АА02 ЦИВР.464657.018, используемых для улучшения радиотехнических и эксплуатационных характеристик в составе унифицированного РЛК «12А6К» и посадочного радиолокатора «ПРЛ-27СМ».

### **Достоверность полученных результатов**

Обеспечивается использованием апробированного математического аппарата, теории антенн и устройств СВЧ, специализированного программного обеспечения, строгой постановкой граничных задач при численном электродинамическом моделировании и подтверждением результатов, полученных разными методами, сравнением полученных результатов с имеющимися в литературе отдельными частными случаями, согласованностью результатов расчетов с данными измерений экспериментальных и первых серийных образцов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Моноимпульсная антенная решетка с частотным сканированием (АРЧС) с высоким коэффициентом усиления, низким УБЛ ДН суммарного канала, повышенной глубиной нуля и равенством амплитуд в максимумах ДН разностного канала, позволяющая осуществлять широкоугольное сканирование через нормаль к апертуре и повысить точность пеленгации в плоскости частотного сканирования в 3 раза (до 5 угловых минут), что достигается за счет применения суммарно-разностной ДОС последовательного типа, волноводных фазовращателей, мостового устройства с регулируемым коэффициентом деления, Т-щелевых направленных ответвителей, коррекции длин периодов линий задержки.

2. Комплекс технических и конструкторско-технологических решений, заложенных при построении моноимпульсной волноводно-щелевой АРЧС S-диапазона на основе модифицированной ДОС последовательного типа, позволяющий осуществлять сканирование в секторе от  $-20,5^\circ$  до  $+24,5^\circ$  в полосе рабочих частот 5% и по сравнению с аналогичным вариантом реализации антенны на основе существующей последовательной схемы снизить УБЛ ДН суммарного канала на 7,6 дБ (до  $-30,1$  дБ) при коэффициенте усиления не менее 41 дБ, улучшить глубину нуля ДН разностного канала на 11,9 дБ (до  $-33,7$  дБ), уменьшить модуль разности амплитуд в ее максимумах на 1,63 дБ (до 0,21 дБ) и сократить высоту профиля конструкции антенны в 2,5 раза.

3. Комплекс технических и конструкторско-технологических решений, заложенных при построении моноимпульсной волноводной АРЧС X-диапазона на основе модифицированной последовательно-параллельной ДОС, позволяющий осуществлять сканирование в секторе от  $-16^\circ$  до  $+19^\circ$  в полосе рабочих частот 4,5% и по сравнению с аналогичным вариантом реализации антенны на основе существующей последовательно-параллельной схемы снизить УБЛ ДН суммарного канала на 8,9 дБ (до  $-30,3$  дБ) при коэффициенте усиления не менее 32 дБ, улучшить глубину нуля ДН разностного канала на 10,5 дБ (до  $-32,1$  дБ), уменьшить модуль разности амплитуд в ее максимумах на 2,56 дБ (до 0,23 дБ) и сократить максимальную длину периода линии задержки параллельной части схемы на  $3,5\Lambda_{\text{норм}}$  (до  $1,5\Lambda_{\text{норм}}$ ).

4. Методика проектирования, включающая алгоритм и программу расчета волноводной суммарно-разностной ДОС последовательного типа, построенной на основе направленных ответвителей, позволяющая выявить и минимизировать ошибки формируемого АФР, обусловленные особенностями построения, и обеспечивающая возможность практической реализации моноимпульсной АРЧС с заданными характеристиками ДН.

#### **Апробация результатов работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались на:

- 27-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо'17, Севастополь, 2017 г.;
- Международной научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии», Сочи, 2016 г.;
- 15-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2016», Москва, 2016 г.;
- 4-й Всероссийской микроволновой конференции, Москва, 2016 г.;
- межотраслевом конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики», Москва, 2015 г.

#### **Публикации**

По основным результатам выполненных в диссертации исследований опубликовано 20 печатных работ, в том числе 8 публикаций в научно-технических журналах, включенных в перечень ВАК, 2 патента, 10 публикаций в журналах и сборниках трудов конференций, входящих в систему РИНЦ. Список этих работ представлен в разделе 5 автореферата.

#### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа изложена на 152 машинописных страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 105 наименований и двух приложений. Основное содержание состоит из 122 страниц, включая иллюстративный материал, представленный в виде 101 рисунка и 10 таблиц.

## 2 Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и основные задачи исследований, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены положения, выносимые на защиту. Приведены структура диссертации, форма апробации и внедрения результатов.

**В первой главе** проведен аналитический обзор отечественных и зарубежных частотно-сканирующих антенных решеток трехкоординатных РЛС обзора воздушного пространства и управления воздушным движением. Такие РЛС предназначены для обнаружения и определения пространственных координат (дальность, азимут, высота) и параметров движения воздушных объектов и включают в большинстве случаев волноводно-щелевые антенные решетки с механическим вращением по азимуту и частотным сканированием в угломестной плоскости.

Рассмотрены основные типы применяемых в настоящее время частотно-сканирующих антенн, начиная от простейших до моноимпульсных (рисунок 1).

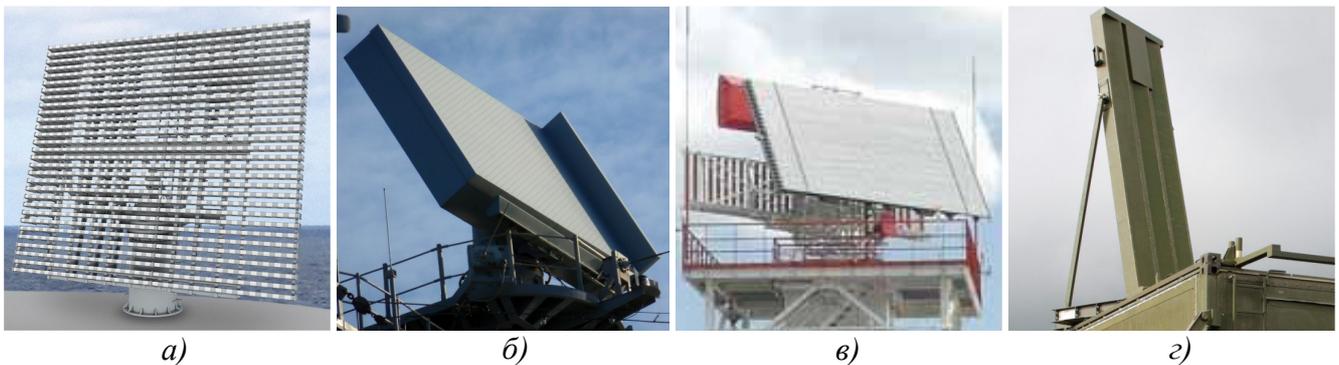


Рисунок 1 – Частотно-сканирующие антенные решетки трехкоординатных РЛС: а) – антенна РЛС «Подберезовик-ЭТ1»; б) – антенна РЛС AN/SPS-52; в) – антенная система ТРЛК «Сопка-2»; г) – моноимпульсная антенная система посадочного радиолокатора «ПРЛ-28М».

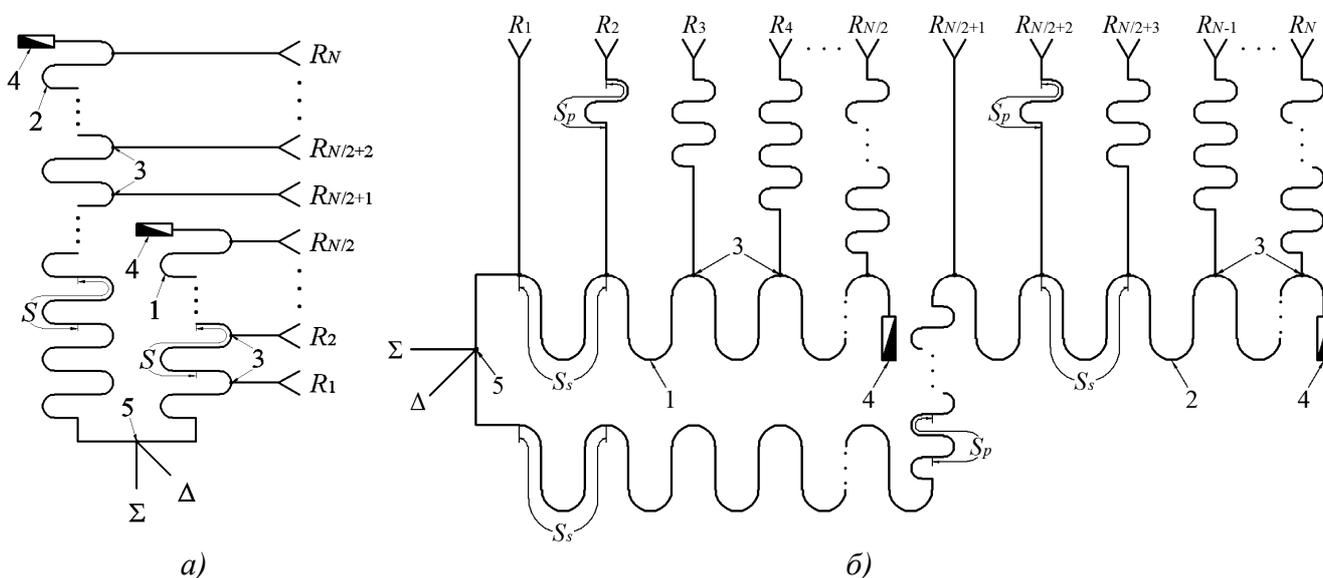
Представлен анализ технических решений, используемых при создании АРЧС в различных диапазонах частот. В таблице 1 приведены некоторые характеристики разработанных антенных систем.

Таблица 1 – Характеристики разработанных АРЧС.

Характеристики	AN/SPS-39	AN/SPS-52 SPA-64 / SPA-72	AN/SPS-48	«Сопка-2»	AN/TPS-32
Диапазон частот	2,91–3,1 ГГц	2,91–3,1 ГГц	2,9–3,1 ГГц	S	X
Ширина луча	2,4°×3,0°	1,9°×2,25° / 1,1°×2,25°	1,5°×1,6°	1,15°×2,0°	1,4°×0,7°
КУ антенны	34 дБ	37 дБ / 39,5 дБ	38,5 дБ	41 дБ	42 дБ
Размеры антенны	3,0×2,0 м	4,19×4,24 м / 6,59×4,24 м	4,93×5,79 м	6,68×3,79 м	1,8× 3,7 м
Пиковая мощность	1 МВт	1 МВт	2,4 МВт	40 кВт	8 кВт
Сканирование по азимуту	механическое 360°	механическое 360°	механическое 360°	механич. 360°	фазовое ±45°
Сканирование по углу места	частотное (26 лучей)	частотное	частотное (28 лучей)	частотное (32 луча)	частотное (32 луча)

Показано, что ужесточение требований к точностным характеристикам современных систем приводит к необходимости использования АРЧС, обеспечивающих возможность моноимпульсной пеленгации в плоскости частотного сканирования. Сформулированы основные технические требования, предъявляемые к частотно-сканирующим моноимпульсным антенным решеткам трехкоординатных РЛС аэродромных и трассовых комплексов гражданской авиации. Выработаны общие требования к составным частям моноимпульсных АРЧС – ДОС и излучателям, рассмотрены возможные варианты их реализации и конструктивно-технологического исполнения.

Проанализированы возможные пути построения моноимпульсных АРЧС на основе последовательной, параллельной и комбинированной ДОС, а также варианты, обеспечивающие возможность независимого формирования амплитудного распределения суммарного и разностного каналов. Определены наиболее рациональные схемы построения (рисунок 2).



1 – короткая линия задержки (ЛЗ), 2 – длинная ЛЗ, 3 – ответвитель мощности, 4 – поглощающая нагрузка, 5 – мостовое устройство,  $R_1, R_2 \dots R_N$  – излучатели,  $S, S_s$  – длина периода ЛЗ последовательной части,  $S_p$  – длина периода ЛЗ параллельной части

Рисунок 2 – Схемы построения моноимпульсных АРЧС: а) – на основе ДОС последовательного типа; б) – на основе последовательно-параллельной ДОС.

Установлено, что характерными недостатками данных схем являются проблематичность получения требуемого УБЛ (около  $-30$  дБ) без ухудшения КПД ДОС (снижения коэффициента усиления суммарной ДН), а также требуемого качества разностной ДН в части глубины нуля на уровне  $-30$  дБ и равенства амплитуд в ее максимумах в пределах  $\pm 0,5$  дБ при адекватных габаритах и массе конструкции. Показано, что устранить указанные недостатки возможно путем кардинальной переработки структуры частотно-сканирующей ДОС.

В результате проведено обоснование выбранных технических решений в части принципа построения ДОС и излучающего полотна, позволяющих обеспечить требуемые радиотехнические и эксплуатационные характеристики АРЧС.

**Вторая глава** посвящена исследованию особенностей разработанных схем построения моноимпульсной волноводно-щелевой АРЧС  $S$ -диапазона на основе ДОС последовательного типа и моноимпульсной волноводной АРЧС  $X$ -диапазона с последовательно-параллельной ДОС. На рисунке 3 показана модифицированная ДОС последовательного типа (4), которая является ключевым элементом, определяющим характеристики разработанных антенн.

Разработанные технические решения по модификации ДОС в части применения Т-щелевых направленных ответвителей, коррекции длин периодов замедляющей системы, исключения оконечных нагрузок в половинах схемы, использования волноводных фазовращателей и волноводного мостового устройства с регулируемым коэффициентом деления, позволяют реализовать низкопрофильную конструкцию моноимпульсной АРЧС на базе технологии фрезерования ее составных частей на высокоточном фрезерном оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ). Приняты меры, направленные на устранение эффекта «нормали» [3], которые показали целесообразность перехода к последовательно-параллельной схеме построения моноимпульсной волноводной АРЧС  $X$ -диапазона с размещением параллельной части ДОС в линейных волноводных решетках излучателей.

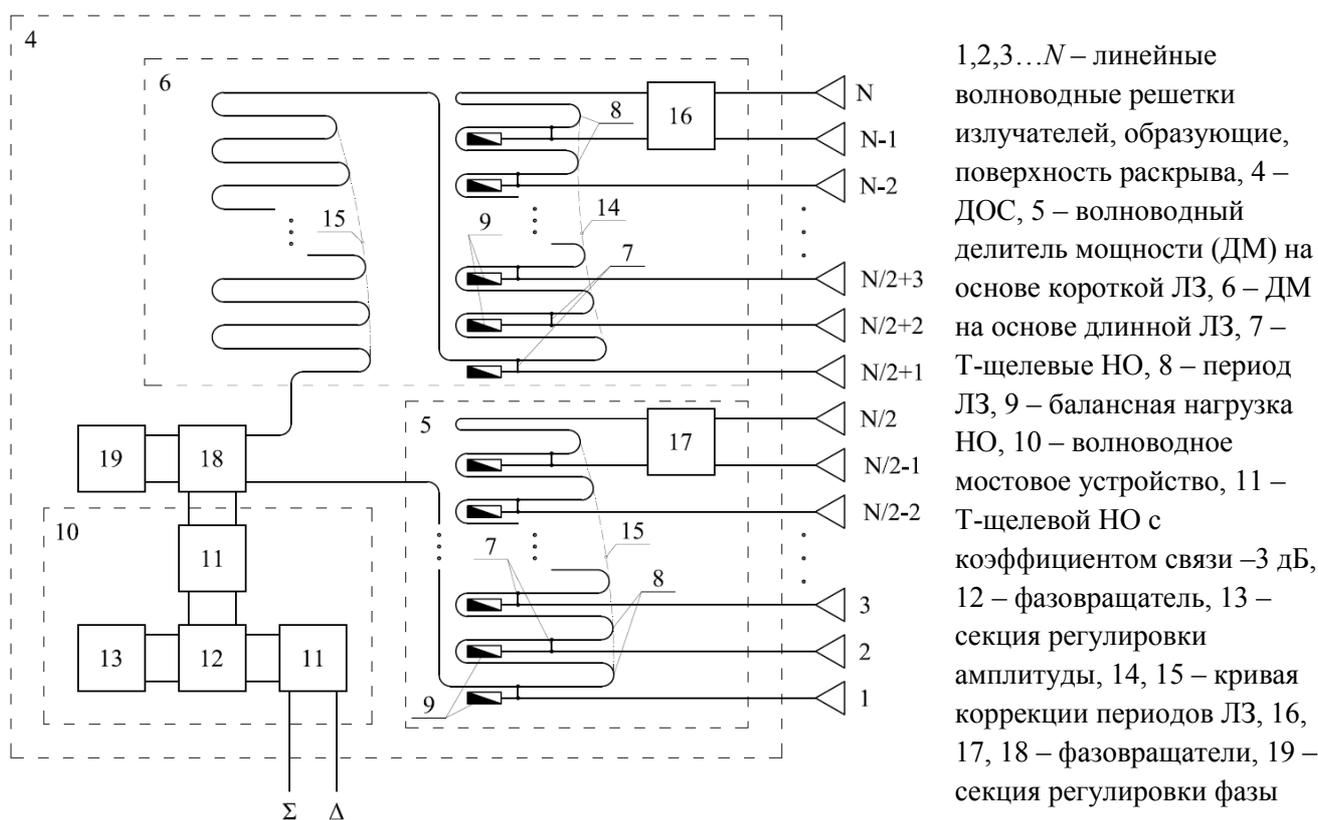


Рисунок 3 – Обобщенная схема построения моноимпульсных АРЧС  $S$ - и  $X$ -диапазона на основе модифицированной ДОС последовательного типа.

Разработана методика расчета, которая позволила выявить ошибки формируемого АФР, обусловленные особенностями построения ДОС и оказывающие существенное влияние на качество суммарной и разностной ДН. Характеристики на выходах ДОС АРЧС  $S$ -диапазона, восстановленные в соответствии с разработанной методикой, показаны на рисунке 4.

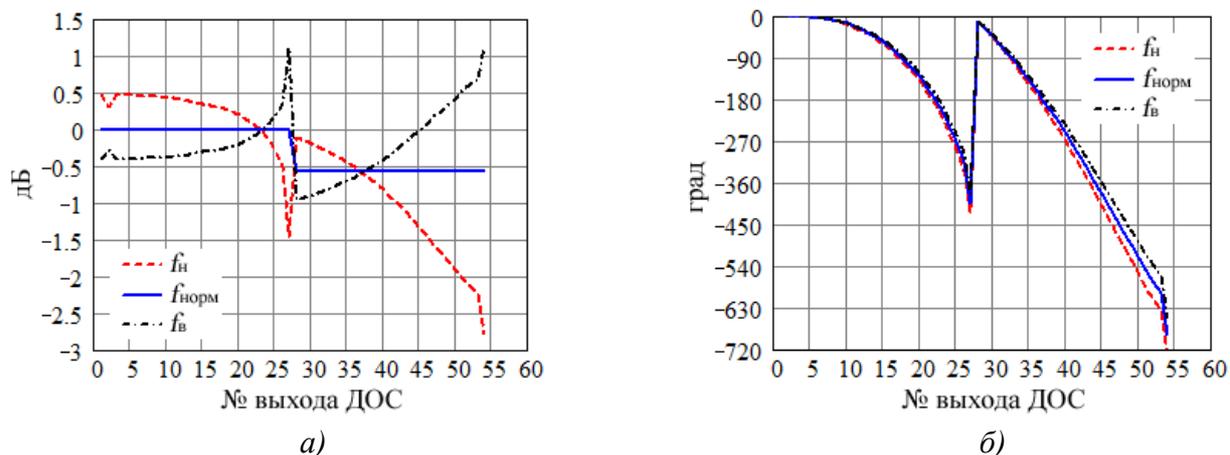


Рисунок 4 – Характеристики ДСОС: *а)* – отклонение восстановленного АР от теоретического (в качестве теоретического АР выбрано  $\bar{n}$ -параметрическое распределение Тейлора [1] при  $SLR = 33$  дБ,  $A = 1,4299$ ,  $\bar{n} = 5$ ,  $\sigma = 1,0589$ ,  $g(\pm 1) = 0,41$ ,  $g(\pm 0,87) = 0,35$ ); *б)* – отклонение восстановленного ФР от теоретического линейного.

С целью компенсации ошибок фазового распределения (ФР) произведена коррекция длин периодов ЛЗ с учетом зависимости фазы НО от величины переходного ослабления в соответствии с формулой:

$$S_{c_n} = S - \frac{\lambda_{норм}(\Delta\varphi_{n+1} - \Delta\varphi_n)}{0,36\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{норм}}{2a}\right)^2}} \quad (1)$$

где  $S_{c_n}$  – длина периода ЛЗ, скорректированная с учетом фазовой поправки НО;  $S$  – исходная длина периода;  $\Delta\varphi_n = \varphi_{l_n} - \varphi_n$  – разность фаз на частоте нормали между требуемым линейным ФР  $\varphi_{l_n}$  и восстановленным ФР  $\varphi_n$  (рисунок 4 б);  $\lambda_{норм}$  – длина волны на частоте нормали  $f_{норм}$ ;  $a$  – размер широкой стенки волноводной ЛЗ;  $n = 1, 2 \dots N-1$ .

После коррекции длин периодов выявлен «пилообразный» характер фазовой ошибки (рисунок 5 а), для компенсации которой в схему (рисунок 3) были введены волноводные фазовращатели 16, 17, 18.

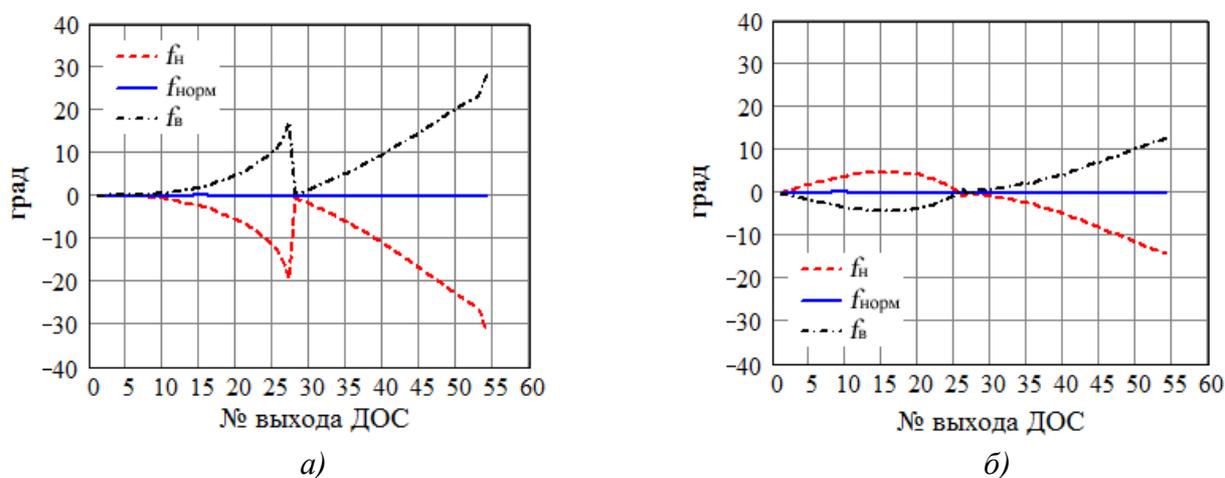


Рисунок 5 – Отклонение восстановленного ФР от теоретического после коррекции длин периодов ЛЗ: *а)* – до введения в схему (рисунок 3) фазовращателей 16, 17, 18; *б)* – после введения фазовращателей.

Принцип работы фазовращателей основан на том, что два прямоугольных волновода с сечениями каналов  $a_1 \times b$  и  $a_2 \times b$  и длинами  $L_1$  и  $L_2$ , соответственно, могут обеспечить постоянство разности фаз  $\Delta\varphi$  в диапазоне длин волн от  $f_n$  до  $f_v$ . Тогда, принимая известными значения  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b$ ,  $f_n$ ,  $f_v$  и  $\Delta\varphi$ , величины  $L_1$  и  $L_2$  могут быть определены исходя из следующих соотношений:

$$L_1 = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{1 - \frac{\Lambda_{n2}}{\Lambda_{v2}}}{\frac{1}{\Lambda_{v1}} - \frac{1}{\Lambda_{v2}} - \frac{\Lambda_{n2}}{\Lambda_{v2}} \left( \frac{1}{\Lambda_{n1}} - \frac{1}{\Lambda_{n2}} \right)}; \quad L_2 = L_1 + \Lambda_{n2} \left[ L_1 \left( \frac{1}{\Lambda_{n1}} - \frac{1}{\Lambda_{n2}} \right) - \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right], \quad (2)$$

где  $\Lambda_{n1}$ ,  $\Lambda_{v1}$ ,  $\Lambda_{n2}$ ,  $\Lambda_{v2}$  – длина волны в волноводе с соответствующим поперечным сечением  $a_1 \times b$  ( $a_2 \times b$ ) для нижней ( $f_n$ ) и верхней ( $f_v$ ) частот рабочего диапазона.

Перепад АР между половинами ДОС (рисунок 4 а) устранен с помощью волноводного мостового устройства с регулируемым коэффициентом деления мощности (10, рисунок 3).

ДН моноимпульсной волноводно-щелевой АРЧС S-диапазона, рассчитанные до компенсации ошибок АФР представлены на рисунке 6, где 1 – суммарная ДН на частоте  $f_v$ ; 2 – разностная ДН на частоте  $f_v$ ; 3 – суммарная ДН на частоте  $f_{норм}$ ; 4 – разностная ДН на частоте  $f_{норм}$ ; 5 – суммарная ДН на частоте  $f_n$ ; 6 – разностная ДН на частоте  $f_n$ .

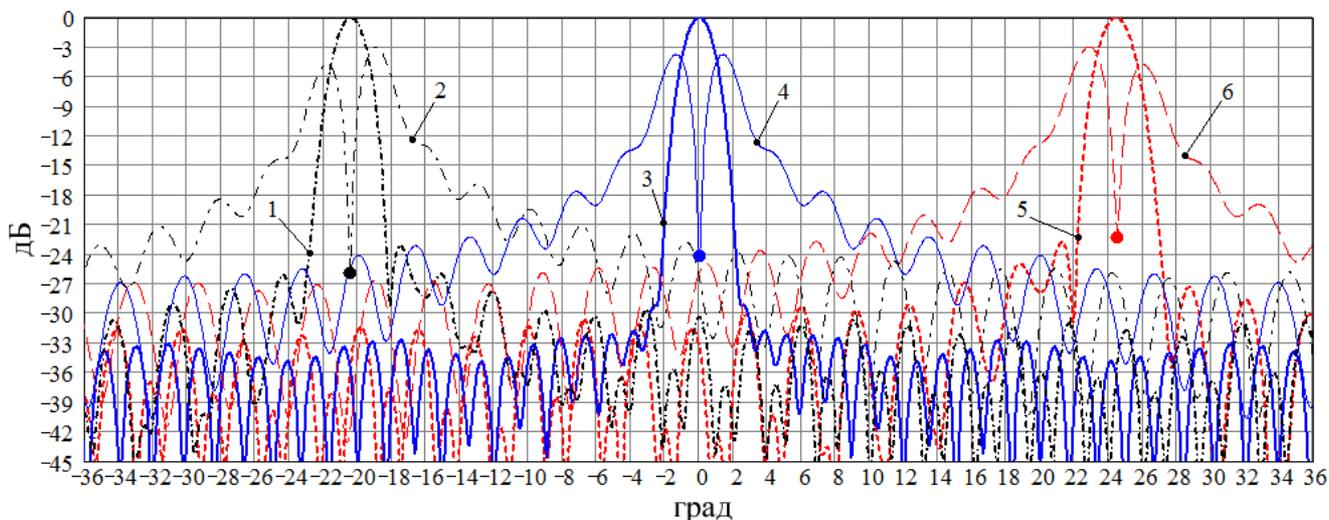


Рисунок 6 – ДН моноимпульсной волноводно-щелевой АРЧС в плоскости частотного сканирования, восстановленные по АФР ДОС до компенсации ошибок АФР.

После компенсации ошибок АФР в рабочей полосе частот АРЧС (5%) достигнуты следующие характеристики: УБЛ суммарной ДН не более  $-30$  дБ, глубина нуля разностной ДН не более  $-33$  дБ, модуль разности амплитуд в максимумах разностной ДН не более  $0,21$  дБ.

Аналогичные исследования также были проведены для моноимпульсной волноводной АРЧС X-диапазона на основе последовательно-параллельной 66-канальной ДОС.

С целью улучшения характеристик разностной ДН в части повышения коэффициента усиления и снижения УБЛ рассмотрены пути реализации волноводной ДОС с независимым

формированием АФР суммарного и разностного каналов. Наиболее рациональный вариант построения такой схемы с учетом предъявляемых технических требований показан на рисунке 7 и представляет собой сопряжение 2-х волноводных линий задержки (этажей) по аналогии с вариантом многолучевой матрицы Бласса [1] с количеством входов  $M = 2$ .

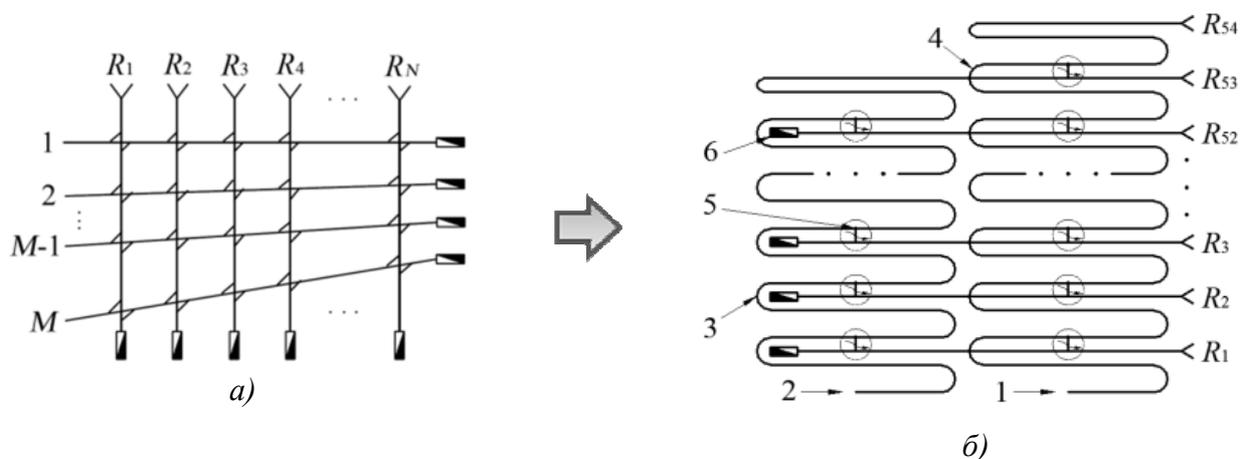
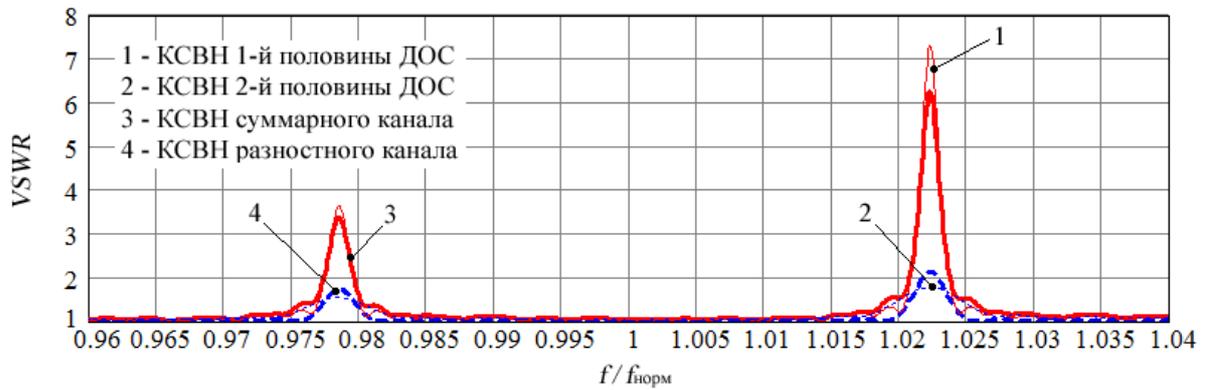


Рисунок 7 – Переход от матрицы Бласса к ДОС с независимым формированием АФР суммарного и разностного каналов: а) – многолучевая ДОС на основе матрицы Бласса; б) – суммарно-разностная ДОС (1 – суммарный вход; 2 – разностный вход; 3 – ЛЗ суммарного канала; 4 – ЛЗ разностного канала; 5 – НО; 6 – балансная нагрузка).

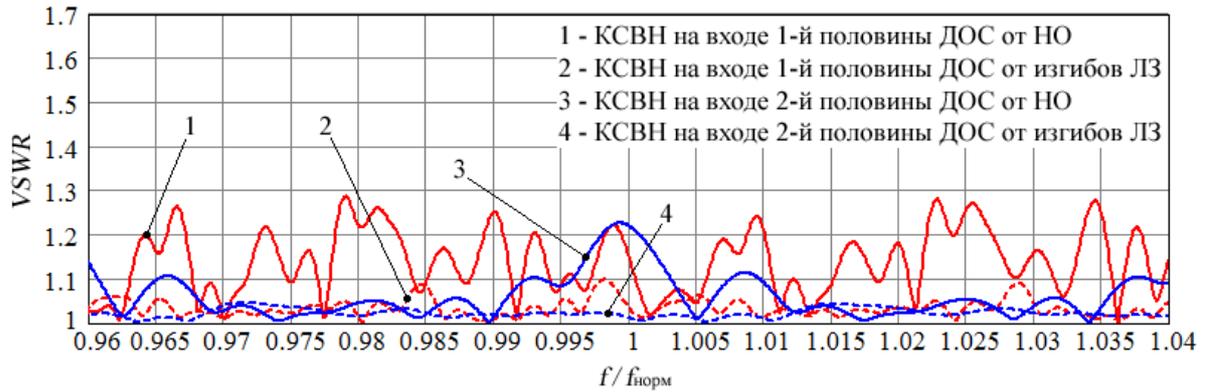
В третьей главе проведено моделирование моноимпульсных АРЧС S- и X-диапазона, которое позволило определить их основные характеристики, и подтвердило целесообразность практического применения разработанных технических решений. Моделирование проводилось в два этапа.

На первом этапе в пакете *MathCAD* был реализован программный алгоритм, предназначенный для численно-экспериментального моделирования частотной характеристики КСВН на входе многоканальной последовательной ДОС АРЧС.

При этом было выявлено, что в условиях широкоугольного частотного сканирования при устранении эффекта «нормали» путем смещения четных и нечетных групп неоднородностей – НО и изгибов ЛЗ (периодов) друг относительно друга на расстояние  $\Lambda_{\text{норм}}/4$  [3], возникает эффект «ослепления» АРЧС на краях рабочей полосы (рисунок 8 а). Данный эффект подобен эффекту «нормали» и также вызван практически синфазным суммированием отражений от неоднородностей на входе АРЧС, что обусловлено фазочастотной характеристикой волновода ЛЗ. Предложен способ оптимизации структуры последовательной и последовательно-параллельной ДОС АРЧС, основанный на автоматизированном итерационном поиске закона распределения элементов связи НО и периодов ЛЗ в схеме, который позволяет полностью подавить эффекты «нормали» и «ослепления» при незначительном увеличении среднего уровня КСВН в рабочем диапазоне частот (рисунок 8 б). Разработаны технические решения по реализации данного способа согласования в ДОС моноимпульсных АРЧС S- и X-диапазона. Оптимизированная структура ДОС АРЧС S-диапазона показана на рисунке 11 (вид Б).



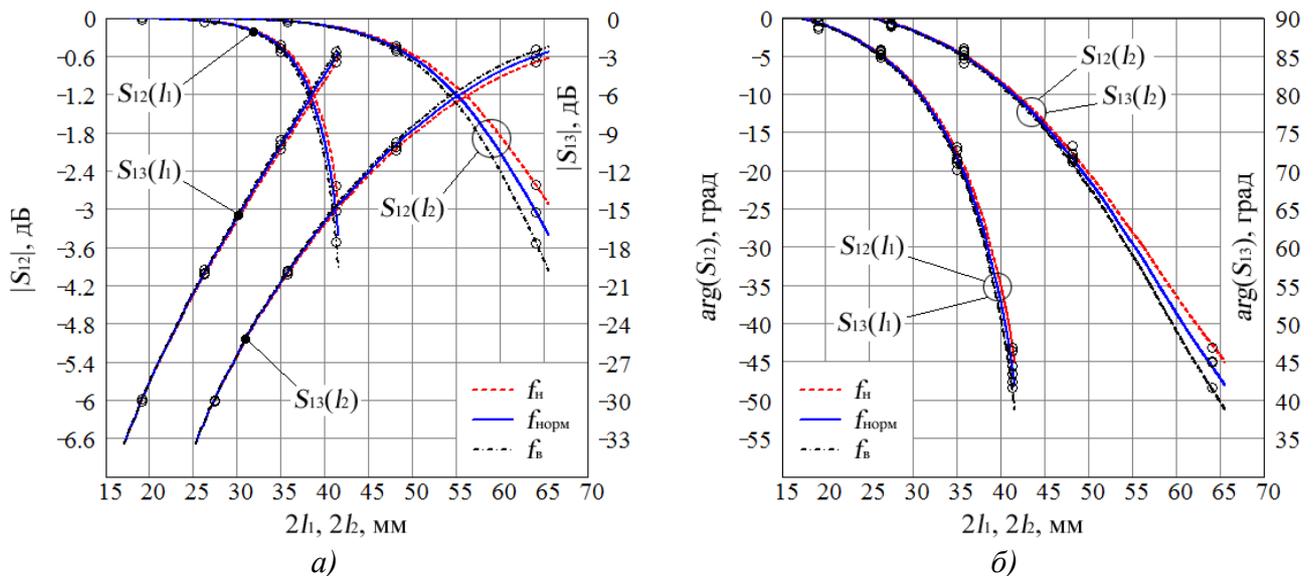
a)



б)

Рисунок 8 – Частотные характеристики КСВН АРЧС  $S$ -диапазона: а) – до оптимизации структуры ДОС; б) – после оптимизации.

Также были проведены численное моделирование, оптимизация и макетирование базового элемента ДОС – волноводного Т-щелевого НО. Основные характеристики НО приведены на рисунке 9.



a)

б)

Рисунок 9 – Зависимости амплитуд и фаз проходящей ( $S_{12}$ ) и ответвленной ( $S_{13}$ ) волн от длин щелей связи  $l_1$  и  $l_2$  (точками показаны результаты измерений): а) –  $|S_{12}|$ ,  $|S_{13}|$  НО  $S$ -диапазона; б) –  $\arg(S_{12})$ ,  $\arg(S_{13})$  НО  $S$ -диапазона.

Установлено, что основным критерием получения оптимальной конфигурации НО является согласование Т-образного окна связи с первичной и вспомогательной волноводными

линиями в полосе рабочих частот, в требуемом диапазоне переходных ослаблений. Выполненные исследования позволили создать технологичную конструкцию НО, интегрируемую с волноводными ДОС в качестве типового элемента распределения мощности.

На основе двух 3-децибельных НО с Т-образным элементом связи (рисунок 10 а) и фазовращателя (ФВ), включенного между ними было разработано широкополосное низкопрофильное волноводное мостовое устройство с регулируемым коэффициентом деления мощности (рисунок 3, 10 б), которое позволяет устранить перепад АР между половинами ДОС.

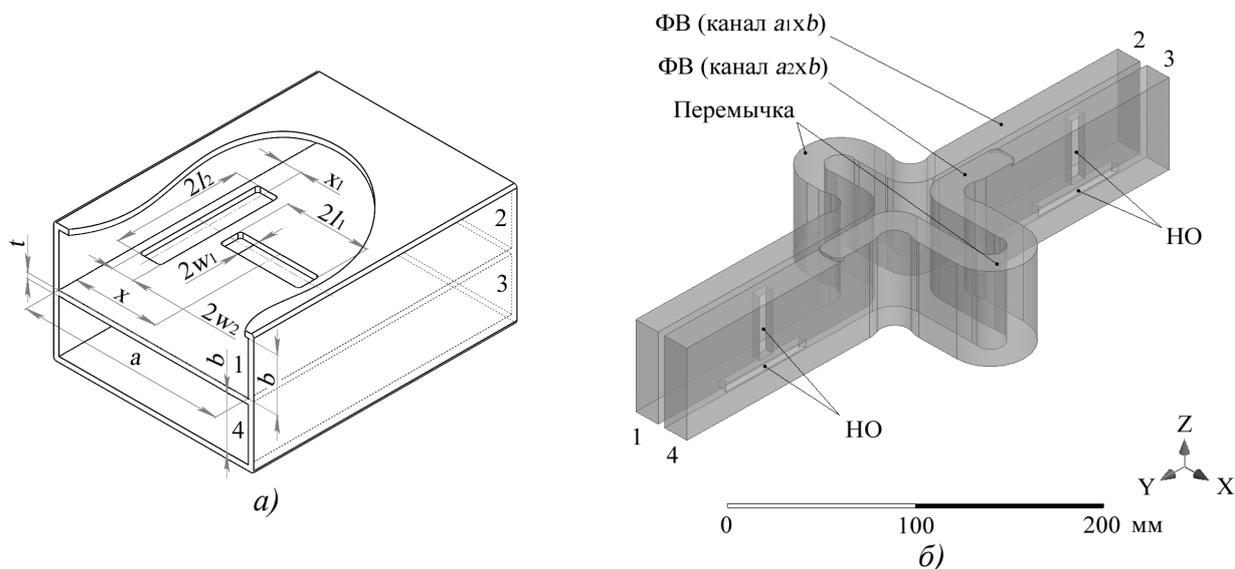


Рисунок 10 – Направленный ответвитель с Т-образным элементом связи (а) и волноводное мостовое устройство с регулируемым коэффициентом деления мощности (б) на его основе.

По результатам первого этапа в пакете *MathCAD* была разработана программа, предназначенная для моделирования восстановления АФР, а также расчета и оптимизации параметров начальной конфигурации модели модифицированной ДОС для строгого электродинамического анализа методом конечных элементов (МКЭ).

На втором этапе на основе МКЭ выполнено полноволновое моделирование и оптимизация ДОС и линейных решеток излучателей. АФР на выходах ДОС и частотные характеристики КСВН суммарного и разностного входов, полученные при моделировании имеют приемлемое совпадение с теоретическим АФР и результатами численно-экспериментального моделирования (рисунок 8). Модель ДОС S-диапазона для численного анализа методом конечных элементов (МКЭ) приведена на рисунке 11.

В заключение проведено численное моделирование полотна АРЧС, предполагающее расчет характеристик направленности путем решения задачи излучения на основе МКЭ с применением периодических граничных условий, при известных амплитудах волн, падающих на линейные решетки излучателей. Результаты моделирования излучающего полотна моноимпульсных АРЧС S- и X-диапазона (рисунок 12) подтвердили эффективность разработанных технических решений в части модификации ДОС и возможность практической реализации требуемых радиотехнических характеристик антенн.

Вид А

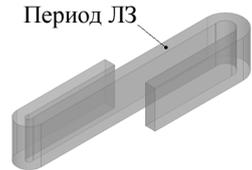
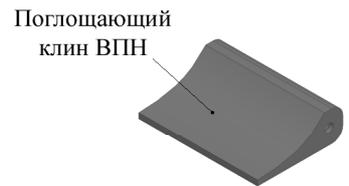
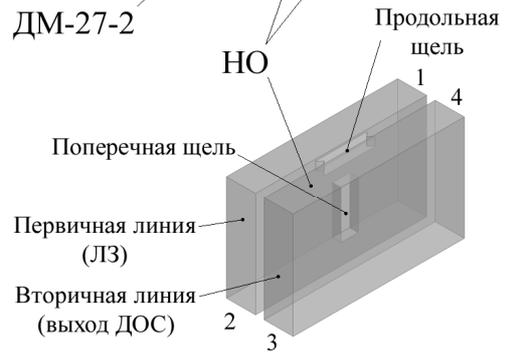
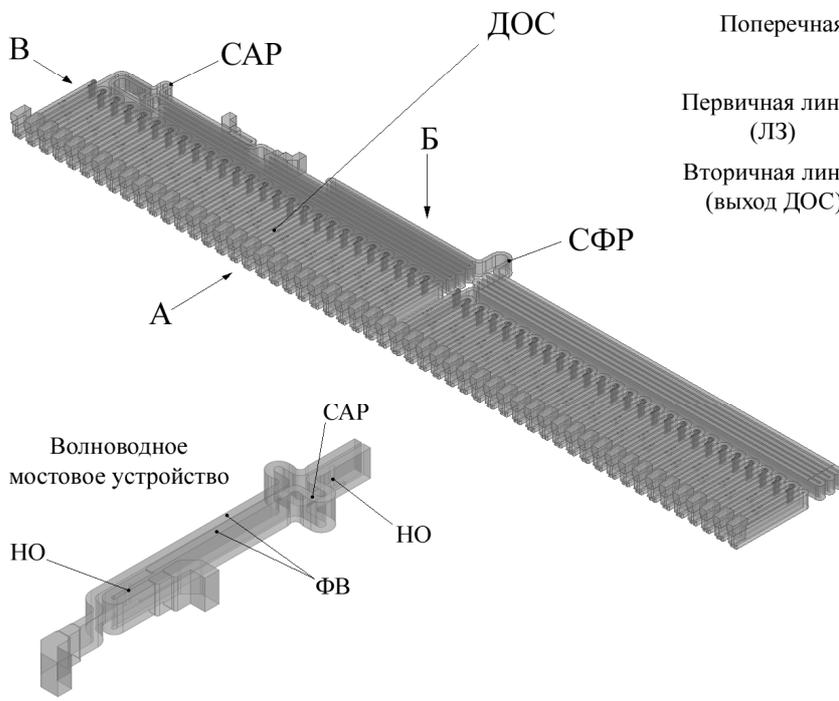
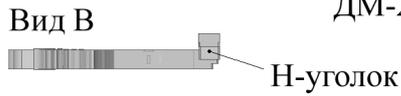
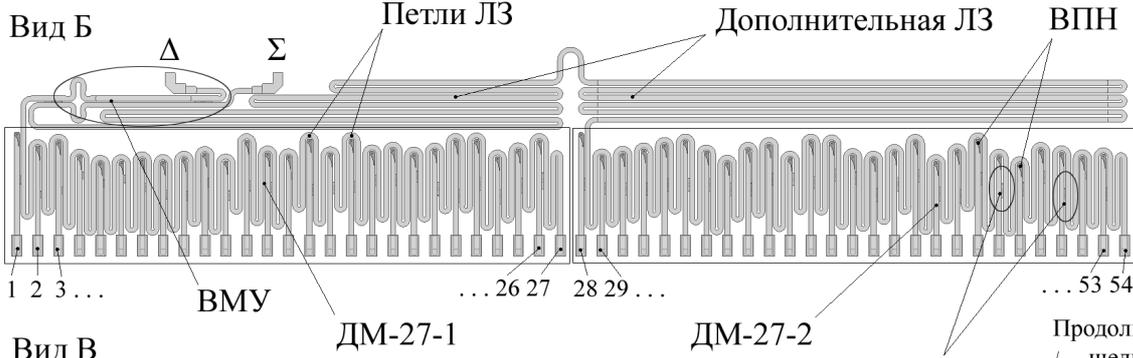


Рисунок 11 – Модель ДОС S-диапазона для численного анализа МКЭ

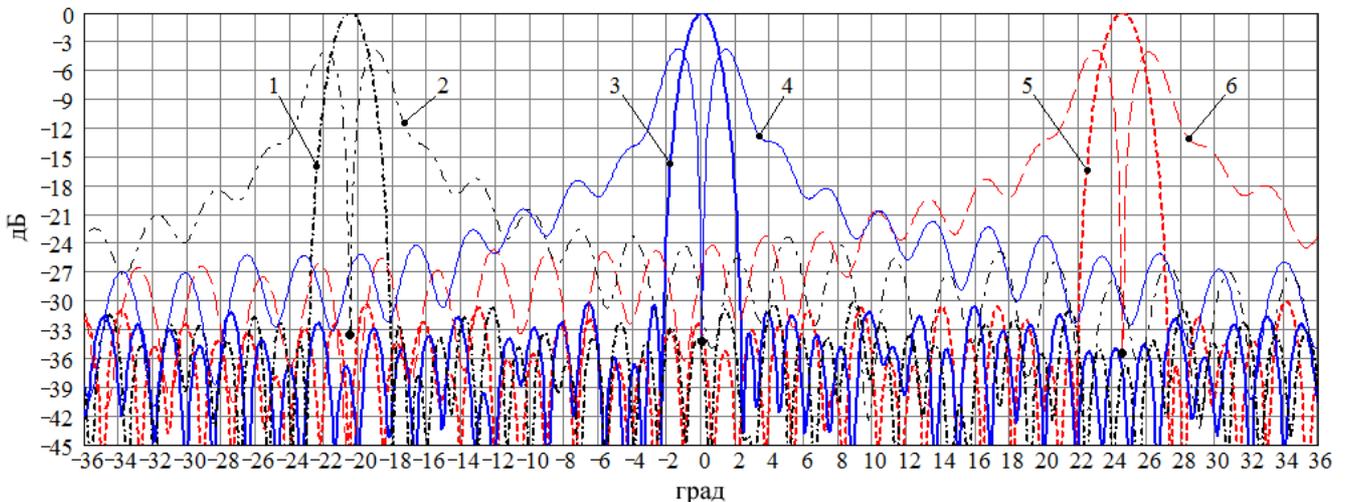


Рисунок 12 – ДН суммарного и разностного каналов АРЧС S-диапазона.

На рисунке 12 приняты следующие обозначения: 1, 2 – суммарная и разностная ДН на частоте  $f_b$ ; 3, 4 – ДН на частоте  $f_{\text{норм}}$ ; 5, 6 – ДН на частоте  $f_n$ .

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик изготовленных опытных образцов моноимпульсной волноводно-щелевой АРЧС  $S$ -диапазона, выполненной на основе ДОС последовательного типа, а также моноимпульсной волноводной АРЧС  $X$ -диапазона с последовательно-параллельной ДОС. Фотографии изготовленных моноимпульсных АРЧС  $S$ - и  $X$ -диапазона показаны на рисунке 13.

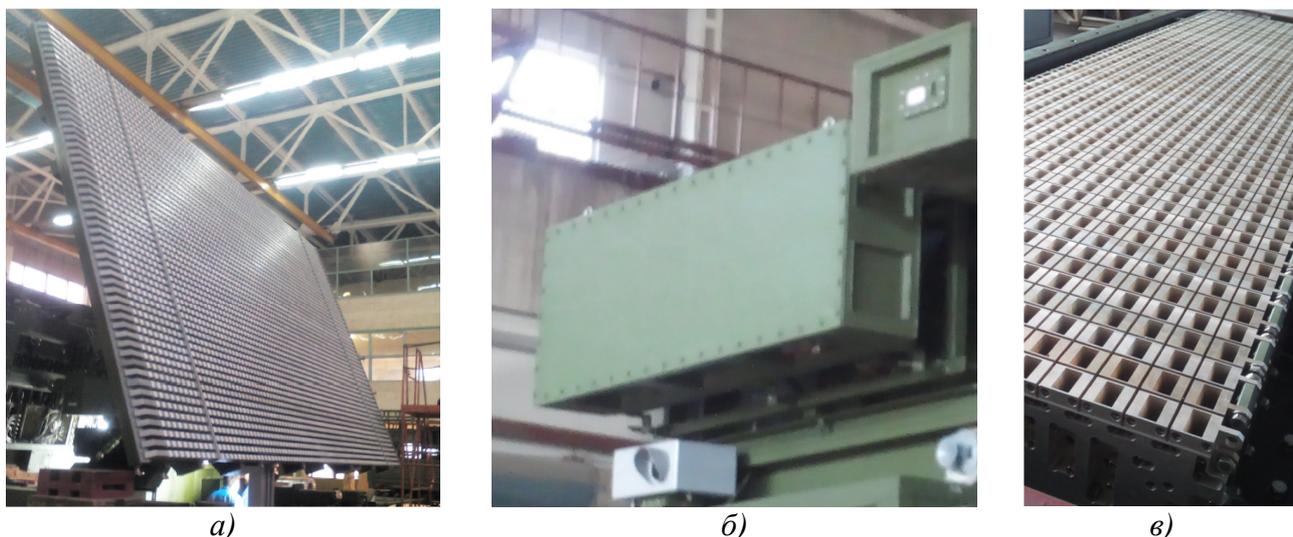


Рисунок 13 – Экспериментальные образцы моноимпульсных АРЧС: а) – антенная система  $S$ -диапазона 125AC51; б) – антенная система  $X$ -диапазона 275AA02; в) – антенная система 275AA02 (без защитной радиопрозрачной панели).

Основные результаты экспериментальных исследований разработанных моноимпульсных АРЧС и некоторые конструктивные параметры приведены в таблице 2. Измерения характеристик ДН АРЧС  $S$ - и  $X$ -диапазона производились на стенде ближнего поля АИВК ЦИВР.464972.001 в относительной полосе частот 5% и 4,5%, соответственно. КСВН суммарного и разностного входов, а также уровень развязки между входами, измерялись с помощью анализатора цепей *Agilent PNA-L N5230C*.

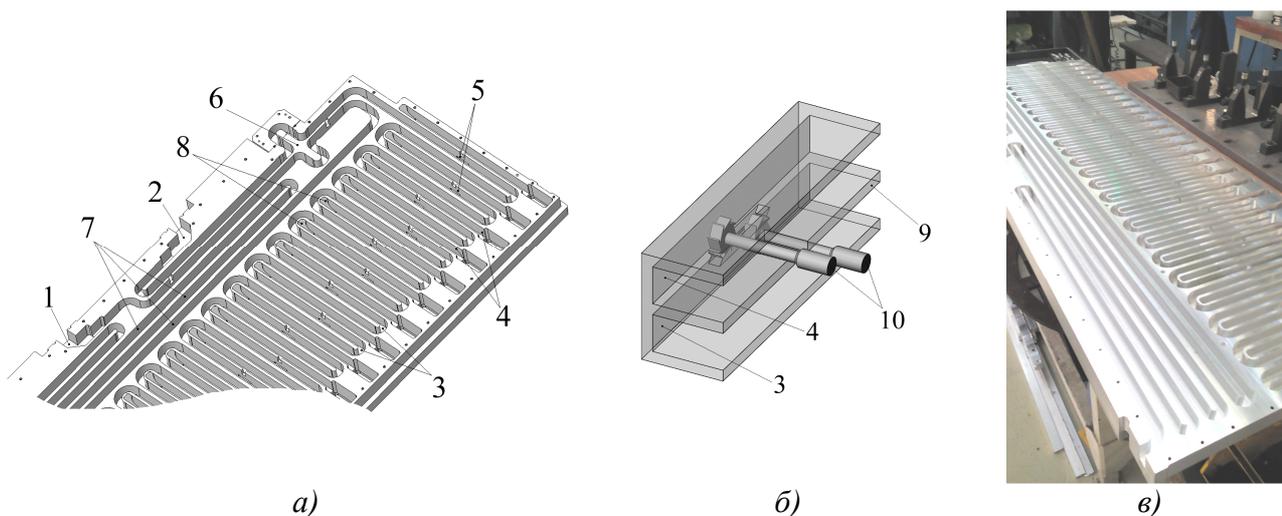
Таблица 2 – Результаты экспериментальных измерений АРЧС  $S$ - и  $X$ -диапазона.

№	Параметр	Значение	
		АРЧС 125AC51	АРЧС 275AA02
1	Параметры ДН в азимутальной плоскости:	$E$ -плоскость	$H$ -плоскость
1.1	Сектор сканирования	360° (механич. ск.)	-15,83°...+19,47°
1.2	Ширина суммарной ДН на уровне минус 3 дБ	1,14±0,05°	1,51±0,07°
1.3	Максимальный УБЛ суммарной ДН	-29,6 дБ	-29,1 дБ
1.4	Средний УБЛ суммарной ДН, не более: в секторе ±15° от максимума за пределами сектора ±15° от максимума	36,4 дБ 41,2 дБ	35,9 дБ 41,6 дБ
1.5	Уровень пересечения суммарной и разн. ДН	-	-4,3±0,12 дБ
1.6	Глубина нуля разностной ДН, не более	-	-31,7 дБ

2	Параметры ДН в угломестной плоскости:	<i>H</i> -плоскость	<i>E</i> -плоскость тип ДН: $\text{cosec}^2(\theta)$
2.1	Сектор сканирования	$-20,46^\circ \dots +24,72^\circ$	$0^\circ \dots +12^\circ$
2.2	Ширина суммарной ДН на уровне минус 3 дБ	$1,86^\circ \pm 0,12^\circ$	$6,1^\circ \pm 0,3^\circ$
2.3	Максимальный УБЛ суммарной ДН	-29,4 дБ	-20,8 дБ
2.4	Уровень пересечения суммарной и разн. ДН	$-4,29 \pm 0,09$ дБ	–
2.5	Глубина нуля разностной ДН, не более	-32,9 дБ	–
3	Уровень кроссполяризации в направлении максимума главного лепестка ДН, не более	-29,3 дБ	-26,4 дБ
4	КУ суммарного канала, не менее	41,12 дБ	32,36 дБ
5	КСВН суммарного и разн. входов, не более	1,37	1,49
6	Развязка между суммарным и разностным входами, не более	-23,6 дБ	-22,3 дБ
7	Габаритные размеры (В×Ш×Г), мм	3749×6448×346	557×1656×269
8	Масса, кг	1476	284

Сравнительный анализ экспериментальных результатов с результатами численного моделирования методом конечных элементов, показал их приемлемое совпадение.

Особое внимание уделено подходам к конструктивно-технологической реализации составных частей АРЧС на базе современных высокотехнологичных методов производства (рисунок 14). Также приведены соображения по конструктивно-технологическому исполнению ДОС с независимым формированием АФР суммарного и разностного каналов в плоскости частотного сканирования.



1 – суммарный вход, 2 – разностный вход, 3 – ЛЗ, 4 – вторичная линия НО, 5 – Т-образный элемент связи, 6 – ВМУ, 7 – дополнительная ЛЗ, 8 – поглощающий клин, 9 – общая стенка волноводов ЛЗ и вторичной линии НО, 10 – грибковая фреза

Рисунок 14 – Конструктивно-технологические особенности: а) – фрагмент ДОС, изготавливаемый на станках с ЧПУ; б) – технология фрезерования щелей НО; в) – фотография изготовленной половины ДОС (ДМ на основе длинной ЛЗ).

Анализируются характерные конструктивно-технологические погрешности и дефекты, допускаемые в процессе изготовления, и выявленные при эксплуатации, представлены их обобщенная классификация и оценка влияния на радиотехнические характеристики антенн. Произведен анализ полученных результатов на статистическую устойчивость с учетом точностных ограничений, накладываемых технологией изготовления и условиями

эксплуатации. ДН, полученные при анализе, не имеют существенных отличий от результатов экспериментальных измерений и характеристик (рисунок 12), рассчитанных при номинальных размерах волноводной топологии моделей.

### 3 Заключение

Диссертация посвящена частотно-сканирующим моноимпульсным антенным решеткам, применяемым в трехкоординатных обзорных РЛС, использующих моноимпульсный метод пеленгации для повышения точности измерения угловых координат воздушных объектов. При исследовании получены следующие основные результаты:

1. Разработаны схемы построения моноимпульсной волноводно-щелевой АРЧС  $S$ -диапазона на основе ДОС последовательного типа и моноимпульсной волноводной АРЧС  $X$ -диапазона с последовательно-параллельной ДОС. Технические решения по модификации последовательной ДОС в части применения  $T$ -щелевых направленных ответвителей, коррекции длин периодов замедляющей системы, исключения оконечных нагрузок в половинах схемы, использования волноводных фазовращателей и волноводного мостового устройства с регулируемым коэффициентом деления, позволяют реализовать низкопрофильную конструкцию антенны на базе высокоэффективной технологии фрезерования на оборудовании с ЧПУ и существенно улучшить технические характеристики моноимпульсных АРЧС в рабочей полосе частот: коэффициент усиления суммарной и разностной ДН, УБЛ суммарной ДН, точность определения угловых координат в плоскости частотного сканирования за счет увеличения глубины нуля и достижения минимального различия уровней сигналов в максимумах разностной ДН.

2. Разработана методика проектирования и оптимизации последовательной ДОС, которая позволила выявить и минимизировать ошибки формируемого АФР, обусловленные особенностями построения, и показала возможность достижения в плоскости частотного сканирования антенны  $S$ -диапазона УБЛ суммарной ДН не более  $-30$  дБ при коэффициенте усиления не менее 41 дБ, а также обеспечения глубины нуля разностной ДН не хуже  $-33$  дБ и модуля разности амплитуд в ее максимумах не более 0,21 дБ в полосе рабочих частот 5%. В АРЧС  $X$ -диапазона в полосе рабочих частот 4,5% коэффициент усиления составил не менее 32 дБ при аналогичном качестве характеристик ДН: УБЛ суммарной ДН не более  $-30$  дБ, глубине нуля разностной ДН не хуже  $-32$  дБ и модуле разности амплитуд в ее максимумах не более 0,23 дБ.

3. Выявлено, что в условиях широкоугольного частотного сканирования при устранении эффекта «нормали» путем смещения четных и нечетных групп неоднородностей – НО и изгибов ЛЗ друг относительно друга на расстояние  $\Lambda_{\text{норм}}/4$ , возникает эффект «ослепления» АРЧС на краях рабочей полосы. Данный эффект вызван практически синфазным суммированием отражений от неоднородностей на входе АРЧС, что обусловлено

фазочастотной характеристикой волновода ЛЗ. Разработана методика итерационной оптимизации структуры последовательной ДОС, которая позволяет подавить эффекты «нормали» и «ослепления» при незначительном увеличении среднего уровня КСВН в рабочем диапазоне частот. Показаны технические решения по практической реализации данного способа согласования в ДОС моноимпульсных АРЧС  $S$ - и  $X$ -диапазона.

4. Исследованы характеристики волноводных направленных ответвителей с Т-образным элементом связи в части: диапазонных свойств, переходных ослаблений, направленности, согласования, предельно-допустимого уровня мощности, фазовых ошибок. Установлено, что основным критерием получения оптимальной конфигурации НО является согласование Т-образного окна связи с первичной и вспомогательной волноводными линиями в полосе рабочих частот, в требуемом диапазоне переходных ослаблений. Проведенные исследования позволили создать технологичную конструкцию НО, интегрируемую с волноводными ДОС в качестве типового элемента распределения мощности.

5. Выведены расчетные соотношения для фазовращателя, который представляет собой два полых волновода прямоугольного сечения, и обеспечивает в рабочей полосе частот требуемое значение разности фаз между выходами этих волноводов. Включение такого фазовращателя между двумя Т-щелевыми направленными ответвителями с переходным ослаблением 3 дБ позволило реализовать низкопрофильное волноводное мостовое устройство с регулируемым коэффициентом деления. Применение волноводных фазовращателей и мостового устройства в составе последовательной ДОС позволило минимизировать ошибки АФР.

6. Представлен вариант построения ДОС с независимым формированием АФР суммарного и разностного каналов антенны в плоскости частотного сканирования на основе двухлучевой матрицы Бласса. Данный вариант предполагает возможность частичного заимствования технических и решений, реализованных в модифицированных ДОС последовательного и последовательно-параллельного типов. Численный анализ характеристик АРЧС на основе разработанной программы показал возможность снижения максимального УБЛ разностной ДН до  $-25$  дБ и повышения коэффициента усиления разностного канала на 1,5 дБ при сохранении достигнутых характеристик суммарной ДН.

7. Проработаны ключевые вопросы конструктивно-технологического исполнения моноимпульсных АРЧС, обеспечивающие необходимую точность изготовления и, соответственно, требуемое качество и повторяемость технических характеристик антенн при серийном производстве. Эффективность разработанного комплекса технических решений подтверждается положительными результатами экспериментальных измерений опытных и первых серийных образцов моноимпульсных АРЧС  $S$ - и  $X$ -диапазона. Практическое применение разработанных антенн позволило улучшить тактико-технические и эксплуатационные характеристики трехкоординатных РЛС.

## 4 Цитированная литература

1. Hansen R.C. Phased array antennas. 2d edition. — Hoboken, New Jersey: John Wiley & sons, inc., 2009. — 547 p.
2. Плетенский А.Ю., Корнеев А.Н. Принципы построения и технические характеристики унифицированного автоматического радиолокационного комплекса. Книга 1. — М.: АО «НПО «ЛЭМЗ», 2013 — 369 с.
3. Johnson R.C., Jasik H. Antenna engineering handbook. 3d edition. New York: McGraw-Hill book company, 1993. — 1511 p.
4. Патент № 2490760 C1 (RU), МПК H01Q 3/00. Моноимпульсная антенна с частотным сканированием / Н.Д. Бородин, М.В. Исаков; ОАО «НПП «Салют». — № 2012111088/08; заявл. 23.03.2012; опубл. 20.08.2013. — Бюл. № 23.

## 5 Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

### В изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Сучков А.В. Моноимпульсная волноводно-щелевая антенная решетка с частотным сканированием // Труды МАИ. 2016. №86. [http://mai.ru/upload/iblock/0cf/suchkov\\_rus.pdf](http://mai.ru/upload/iblock/0cf/suchkov_rus.pdf)
2. Ефремов В.С., Винников В.И., Сучков А.В. Частотно-сканирующая моноимпульсная антенная решетка трассовой РЛС. Часть 1. Схема построения, оценка параметров и моделирование // Антенны. 2016. №10. С. 34-43.
3. Сучков А.В. Диаграммообразующая схема моноимпульсной частотно-сканирующей антенной решетки // Вестник концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2016. №1. С. 76-88.
4. Ефремов В.С., Винников В.И., Сучков А.В. Частотно-сканирующая моноимпульсная антенная решетка трассовой РЛС. Часть 2. Конструктивно-технологическое исполнение, экспериментальные характеристики // Антенны. 2016. №12. С. 3-11.
5. Сучков А.В. Частотно-сканирующие антенные решетки трехкоординатных РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. №1. С. 63-73.
6. Сучков А.В. Имитационное моделирование эффекта нормали в антенных решетках с частотным сканированием // Труды МАИ. 2017. №92. [http://www.mai.ru/upload/iblock/504/suchkov\\_rus.pdf](http://www.mai.ru/upload/iblock/504/suchkov_rus.pdf).
7. Сучков А.В. Волноводная система питания моноимпульсной антенны с частотным сканированием // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. №1. С. 17-23.
8. Сучков А.В. Моноимпульсная антенная решетка с частотным сканированием для аэродромной РЛС X-диапазона // Журнал радиоэлектроники. 2017. №5. <http://jre.cplire.ru/jre/may17/2/text.pdf>.
9. Патент на изобретение № 2623418 C1 (RU), МПК H01Q 25/02 (2006.01). Моноимпульсная волноводная антенная решетка с частотным сканированием / В.И. Винников, В.С. Ефремов, А.В. Сучков; заявитель и патентообладатель: АО «НПО «ЛЭМЗ». № 2016131320; заявл. 28.07.2016; опубл. 26.06.2017. Бюл. № 18.
10. Патент на полезную модель № 176974 U1 (RU), МПК H01Q 21/00 (2006.01). Антенная решетка с широкоугольным частотным сканированием / В.И. Винников,

В.С. Ефремов, А.В. Сучков; заявитель и патентообладатель: Министерство обороны Российской Федерации. № 2017123149; заявл. 29.06.2017; опубл. 05.02.2018. Бюл. № 4.

**В других изданиях:**

11. Сучков А.В. Волноводный направленный ответвитель с Т-образным элементом связи // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 6-12 сентября 2015). Севастополь: Оргкомитет КрыМиКо'2015, КНТЦ им. Попова. 2015. С. 558-559.

12. Сучков А.В. Волноводное мостовое устройство с регулируемым коэффициентом деления // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 6-12 сентября 2015). Севастополь: Оргкомитет КрыМиКо'2015, КНТЦ им. Попова. 2015. С. 566-568.

13. Сучков А.В. Моноимпульсная волноводно-щелевая антенная решетка с частотным сканированием // 7-й межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, 17 ноября 2015). Москва: МАИ. 2015. С. 176-178.

14. Сучков А.В. Подход к проектированию линейной волноводно-щелевой антенной решётки с низким уровнем боковых лепестков // 42-я Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2016» (Москва, 12-15 апреля 2016). Т. 1. Москва: МАИ. 2016. С. 487-488.

15. Сучков А.В. Многоканальный делитель мощности моноимпульсной антенной решетки с частотным сканированием // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 4-10 сентября 2016). Севастополь: Оргкомитет КрыМиКо'2016, КНТЦ им. Попова. 2016. С. 1173-1179.

16. Сучков А.В. Волноводная скрутка с изгибом в Е/Н-плоскости на основе двойного Т-моста // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 4-10 сентября 2016). Севастополь: Оргкомитет КрыМиКо'2016, КНТЦ им. Попова. 2016. С. 1291-1297.

17. Сучков А.В. Делитель мощности бегущей волны Х-диапазона на базе Т-щелевых направленных ответвителей // 13-я Международная научно-практическая конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (Сочи, 1-10 октября 2016). Сочи: Оргкомитет конференции ИНФО-2016. 2016. С. 546-549.

18. Сучков А.В. Имитационное моделирование эффекта нормали в антенных решетках с частотным сканированием // 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2016» (Москва, 14-18 ноября 2016). Москва: МАИ. 2016. С. 367-368.

19. Сучков А.В. Моноимпульсная антенная решетка с частотным сканированием для аэродромной РЛС Х-диапазона // 4-я Всероссийская микроволновая конференция (Москва, 23-25 ноября 2016). Москва: JRE – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2016. С. 150-154.

20. Сучков А.В. Схемы построения моноимпульсных антенных решеток с частотным сканированием // 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 10-16 сентября 2017). Севастополь: Оргкомитет КрыМиКо'2017, КНТЦ им. Попова. 2017. С. 623-629.