

На правах рукописи

**МИЛОСЕРДОВ МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ**

**БОРТОВАЯ СКАНИРУЮЩАЯ ШИРОКОПОЛОСНАЯ  
ЛИНЕЙНАЯ АР ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Москва – 2014**

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

кандидат физ.-мат. наук, в.н.с.  
Лось Валерьян Федорович

Ведущая организация: НПО «Лианозовский Электромеханический  
Завод»

Защита диссертации состоится «30» сентября 2014 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 [ma.i.ru](http://ma.i.ru) и в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 года.

Ученый секретарь М.И. Сычев  
диссертационного совета  
Д 212.125.03, д.т.н., доцент

М.И. Сычев

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Введение

**Актуальность темы исследования:** Разработка многофункциональных бортовых комплексов с активными фазированными антенными решетками (АФАР), использующими единую систему излучения в интересах нескольких радиотехнических систем - важная проблема, стоящая на повестке дня. Решение такой задачи требует разработки принципов построения и технических решений фазированных антенных решеток (ФАР) с широкой полосой частот (до октавы и более), которая перекрывает частотные полосы используемых систем и обеспечивает требуемые характеристики согласования и направленности в широком диапазоне углов сканирования  $\pm(45-60^\circ)$ . При этом, к бортовым ФАР, предъявляются жесткие массогабаритные требования, необходимость учета влияния элементов конструкции и условий эксплуатации.

Антенны, в частности ФАР, относятся к элементам существенно определяющим локационную заметность ЛА, поэтому при разработке ФАР помимо энергетических и полевых характеристик требуется проводить оценку и применять меры для снижения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) ФАР.

Расширение полосы рабочих частот ФАР с широкоугольным сканированием обеспечит существенное продвижение в создании нового поколения многофункциональных радиотехнических комплексов, выполняющих функции РЛС, радиотехнической разведки, радиоэлектронной борьбы, государственного опознавания, радионавигации и радиосвязи.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью расширения полосы рабочих частот линейной ФАР дециметрового диапазона с широкоугольным сканированием, расположенной в ограниченном объеме (площадь элемента  $0.25\lambda_{\max} \times 0.25\lambda_{\max}$ ) под радиопрозрачным обтекателем в передней кромке отклоняемого носка крыла.

**Целью работы** является разработка малогабаритной широкополосной ФАР дециметрового диапазона с рабочей полосой частот 1-1.6 ГГц, сканирующей в секторе углов  $\pm 45^\circ$ , размещаемой в ограниченном объеме и предназначенной для антенной системы, выполняющей функции РЛС и государственного опознавания.

## Основные задачи диссертации

В соответствии с указанной целью в работе ставятся и решаются следующие задачи:

1. Выбор принципа построения широкополосной ФАР и её излучающих элементов.
2. Разработка технических решений снижения габаритных размеров печатных логопериодического и монополюсного излучателей.
3. Оптимизация структуры малогабаритных печатных логопериодического и монополюсного излучателей в составе ФАР при размещении под радиопрозрачным обтекателем вблизи проводящих элементов конструкции крыла.
4. Моделирование характеристик направленности и согласования конечной 12-ти элементной широкополосной ФАР на основе малогабаритных печатных логопериодических излучателей, размещенной в ограниченном объеме под радиопрозрачным обтекателем в передней кромке отклоняемого носка крыла при сканировании в секторе углов  $\pm 60^\circ$ .
5. Моделирование характеристик направленности и согласования конечной 12-ти элементной широкополосной ФАР на основе монополюсных излучателей, размещенной в ограниченном объеме под радиопрозрачным обтекателем в передней кромке отклоняемого носка крыла при сканировании в секторе углов  $\pm 60^\circ$ .
6. Оценка влияния объекта-носителя на характеристики конечной 12-ти элементной ФАР на основе печатных логопериодического и монополюсного излучателей.
7. Оценка диаграммы обратного рассеяния (ДОР) конечной 12-ти элементной ФАР из печатных логопериодических элементов и печатных треугольных двухрезонансных монополюсных элементов, в передней кромке отклоняемого носка крыла.
8. Сравнение ФАР на основе рассмотренных элементов по совокупности параметров и выбор наилучшего решения по интегральному признаку методом весовых коэффициентов.

**Научная новизна** обусловлена предложенным и разработанным комплексом технических решений (снижение габаритных размеров, оптимизация параметров с учетом взаимного влияния излучателей и элементов конструкции), позволившим обеспечить требуемые технические характеристики ФАР дециметрового диапазона, расположенной в ограниченном пространстве в переднем отсеке отклоняемого носка подвижной консоли крыла.

### **Методология и методы исследования**

Для решения поставленных задач используются: методы конечных разностей во временной области, конечных элементов и гибридный для расчета излучающих элементов (одиночных и в составе полотна линейной ФАР).

Метод глобальной оптимизации (генетический алгоритм) использовался для поиска глобального минимума оптимизируемой невыпуклой и многопараметрической целевой функции (оптимизационного функционала) для поиска параметров излучателей полотна ФАР.

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

1. Предложенный и разработанный комплекс технических решений (снижение габаритных размеров, оптимизации параметров с учетом взаимного влияния излучателей и элементов конструкции) обеспечивает сканирование ФАР из печатных логопериодических элементов, расположенных в ограниченном пространстве (площадь элемента  $0.25\lambda_{\max} \times 0.25\lambda_{\max}$ ) в переднем отсеке отклоняемого носка подвижной консоли крыла, в секторе углов  $\pm 45^\circ$  по уровню КСВН  $\leq 3$  в рабочей полосе частот 1..1.6 ГГц.
2. Предложенный и разработанный комплекс технических решений (снижение габаритных размеров, оптимизации параметров с учетом взаимного влияния излучателей и элементов конструкции) обеспечивает сканирование ФАР из печатных монополюсных элементов, расположенных в ограниченном пространстве (площадь элемента  $0.25\lambda_{\max} \times 0.25\lambda_{\max}$ ) в переднем отсеке отклоняемого носка подвижной консоли крыла, в секторе углов  $\pm 45^\circ$  по уровню КСВН  $\leq 2.8$  в рабочей полосе частот 1..1.6 ГГц.
3. Численное моделирование на основе метода конечных разностей во временной области, гибридного метода и алгоритмов глобальной оптимизации позволило определить основные энергетические и полевые характеристики и подтвердить правильность заложенных технических решений построения 12-ти элементной ФАР на основе печатных логопериодических и двухрезонансных монополюсных излучателей с учетом особенностей размещения.

**Теоретическая и практическая значимость** результатов работы состоит в следующем:

- Произведен расчет и получены характеристики согласования и направленности конечной 12-ти элементной ФАР на основе печатных логопериодических излучателей, размещенной в ограниченном пространстве в переднем отсеке отклоняемого носка крыла под радиопрозрачным обтекателем.
- Произведен расчет и получены характеристики согласования и направленности конечной 12-ти элементной ФАР на основе печатных двухрезонансных монополюсных излучателей, размещенной в ограниченном пространстве в переднем отсеке отклоняемого носка крыла под радиопрозрачным обтекателем.

- Проведена оценка диаграммы обратного рассеяния конечных 12-ти элементных ФАР на основе печатных логопериодических и двухрезонансных монополярных излучателей.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке бортовых широкополосных антенных систем дециметрового диапазона.

**Достоверность полученных результатов** обусловлена корректным выбором моделей антенных систем и постановкой соответствующих электродинамических задач; использованием апробированных численных методов решения поставленных задач; проведение численного моделирования различными методами и сопоставление полученных результатов; тестированием алгоритмов моделирования на модельных задачах.

### **Реализация и внедрение результатов**

Результаты диссертационного исследования, оформленные в виде акта о внедрении, вошли в эскизный технический проект составной части опытно-конструкторской разработки «Разработка электродинамической модели и численное моделирование широкополосной системы излучения ФАР на основе широкополосных излучателей», шифр «Подкова-М1», проведенной НИИ приборостроения им. Тихомирова (г. Жуковский) в рамках выполнения ОКР «Подкова» ФЦП «ЭКБ» Министерства промышленности и торговли Российской Федерации (Государственный контракт №11411.1006800.11.089 от 04.08.2011г. между ОАО «НИИП» и Минпромторгом).

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на:

- 7-ой и 8-ой молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций РТ-2011, 2012», Севастополь, Украина, 2011, 2012 гг.
- 10-ой и 11-ой международной конференции «Авиация и космонавтика - 2011, 2012», Москва, 2011, 2012 гг.
- 10-ой и 11-ой научно-практической конференции молодых ученых и студентов МАИ – «Инновации в авиации и космонавтике – 2011, 2012», Москва, 2011, 2012 гг.

**Публикации.** По основным результатам выполненных в диссертации исследований опубликовано 11 печатных работ, из них 5 научных статей (3 в журналах, рекомендуемых ВАК) и 6 тезисов докладов.

## **Структура и объем работы:**

Диссертационная работа изложена на 168 машинописных страниц и состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников. Иллюстративный материал представлен в виде 89 рисунков и 15 таблиц. Список литературы включает 76 наименований.

## **Содержание работы**

**Первый раздел** диссертации содержит аналитический обзор по материалам отечественных и зарубежных источников по тематике, связанной с принципами построения полотна широкополосной ФАР, широкополосными излучающими элементами для сканирующих антенных решеток и особенностями размещения линейной широкополосной ФАР в переднем отсеке отклоняемого носка крыла. Рассматриваются вопросы совмещения нескольких систем на одном антенном полотне, проводится выбор принципа построения широкополосного полотна ФАР и типов излучателей.

Во **втором разделе** рассматриваются особенности размещения линейной ФАР на основе печатного логопериодического излучателя в ограниченном объеме под радиопрозрачным обтекателем в переднем отсеке отклоняемого носка крыла вблизи проводящих элементов конструкции.

Выбор печатной логопериодической вибраторной антенны (ЛПВА) обусловлен несколькими причинами: вертикальная поляризация, легко перекрывает полосу 1...1.6 ГГц, удобство размещения под обтекателем (антенна сужается к концу, повторяя форму отведенной под неё полости). Обсуждается решение ряда технических проблем: уменьшение габаритных размеров, учёт влияния элементов конструкции крыла и выбор способов питания излучателя.

*Особенности питания печатной ЛПВА.* Логопериодическая антенна возбуждается со стороны самого короткого вибратора. В условиях решаемой задачи антенна размещается в носке крыла. Приёмо-передающий модуль АФАР находится за металлической перегородкой, которая располагается со стороны наибольшего вибратора. Поэтому, практическое осуществление питания возможно, как минимум, двумя способами: непосредственное подключение радиочастотного кабеля и питание с помощью симметричной полосковой линии. Из-за ограниченных габаритных размеров выбрано питание печатной ЛПВА с помощью радиочастотного кабеля.

*Способы сокращения габаритных размеров.* Вертикальный и продольный размеры антенны в свободном пространстве примерно в два раза превышают размер переднего отсека отклоняемого носка подвижной консоли крыла самолета. Для сокращения размеров

печатной ЛПВА использованы следующие технические решения: помещение печатного элемента в симметричный диэлектрический слой (ламинирование подложки), заполнение примыкающего к антенне объема диэлектрическим пенокомпанудом; создание фрактальной геометрии логопериодического печатного излучателя, меандровой и других конфигураций.

*Влияние элементов конструкции крыла.* Передний отсек отклоняемого носка подвижной консоли крыла самолета состоит из несущей балки и двух металлических пластин, образуя П-образный металлический профиль (далее П-образный профиль). Размещение вибратора в непосредственной близости от П-образного профиля изменяет резонансную длину вибратора (как правило, в сторону уменьшения нижней граничной частоты диапазона), а также значение сопротивления излучения на резонансной частоте. В логопериодической антенне как антенне с активным питанием, рассчитанной для работы в свободном пространстве, это приводит к нарушению амплитудно-фазового распределения токов в вибраторах. Иными словами, логопериодическая антенна, рассчитанная для работы в свободном пространстве, практически неработоспособна вблизи упомянутого П-образного профиля и подлежит настройке и оптимизации.

В ходе численного моделирования было установлено, что конкретный П-образный профиль, являющийся элементом конструкции крыла, резонирует в области нижней границы рабочей полосы частот ЛПВА. Резонанс по уровню половины мощности имеет полосу 20% относительно центральной частоты 900 МГц. В следствии этого П-образный профиль выполняет функции низкочастотного резонансного отражателя.

Для учета влияния всех элементов конструкции крыла и радиопрозрачного обтекателя была проведена оптимизация печатной ЛПВА в составе линейной ФАР на основе генетического алгоритма. Оптимизация генетическим алгоритмом проводилась при числе генерируемых популяций равном 128, вероятность скрещивания составила 85%, а вероятность мутации – 20%. Диапазон изменения длин вибраторов составил 5%, а диапазон изменения расстояний между ними составил  $\pm 2$  мм. В результате проведенной оптимизации структуры ЛПВА на верхней и на нижней частотах снизился уровень КСВ. При этом КНД антенны увеличился на верхней частоте на 0,5 дБ, оставаясь неизменным на других частотах диапазона.

*Конструкция логопериодического излучающего элемента, размещенного в консоли крыла самолета, для ФАР с рабочей полосой частот 1.0...1.6 ГГц показана на рисунке 1.*



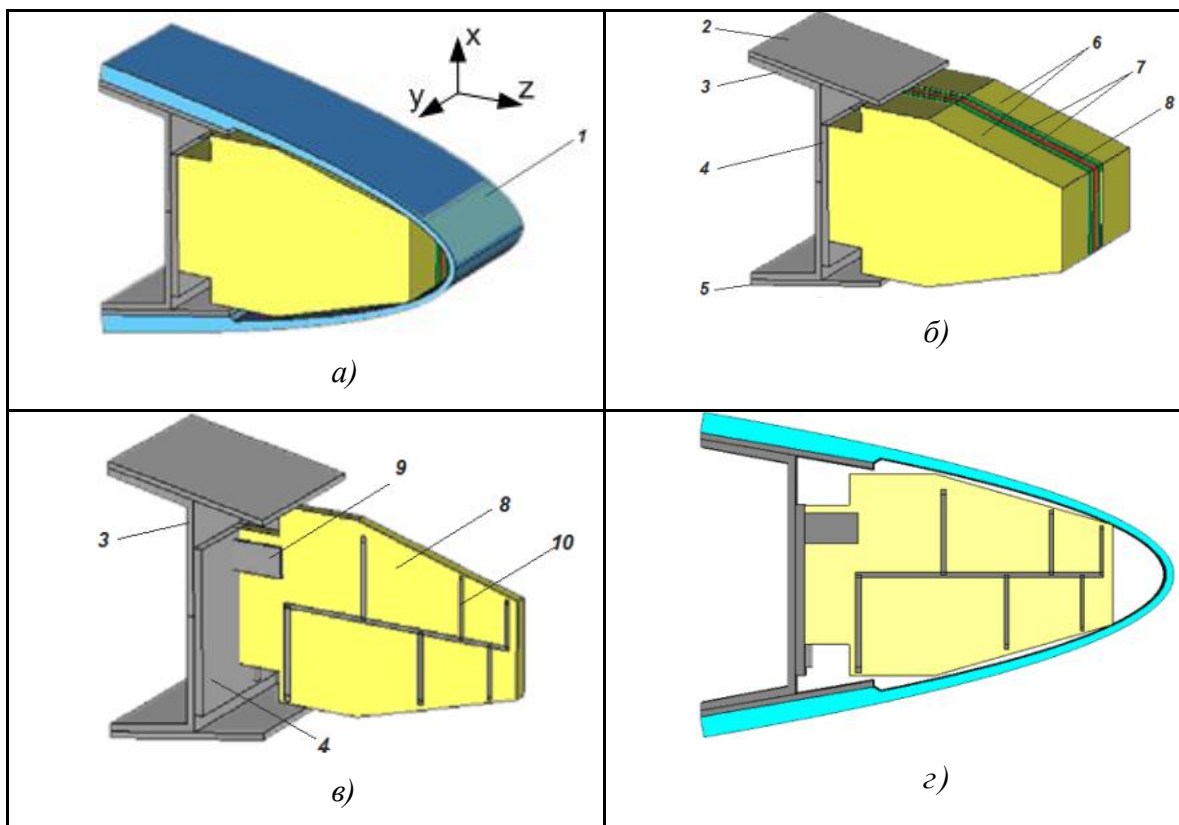


Рисунок 1 – Конструкция печатной ЛПВА в составе линейной ФАР, размещенной в консоли крыла самолета.

Излучатель состоит из металлического основания 4, двухслойной печатной платы 8 и диэлектрических пластин 7. Внутренний объем излучателя заполнен диэлектрическим вспененным наполнителем 6. На внешних слоях металлизации 10 платы 8 сформирована логопериодическая полосковая структура, включающая ленточную двухпроводную линию и систему вибраторов. Диэлектрические пластины 7 служат для сокращения размеров вибраторов, повышения электропрочности конструкции и защиты проводников. 2, 3, 5 – металлические элементы конструкции консоли крыла. Излучатель закрыт от внешних воздействий диэлектрическим обтекателем 1.

Электродинамическая модель системы излучения включает излучающие элементы и фрагмент носка подвижной консоли крыла. В ходе моделирования методом конечных разностей во временной области были получены характеристики согласования и направленности 12-ти элементной ФАР, размещенной под радиопрозрачным обтекателем в передней кромке крыла. На рисунке 2 показаны графики КСВ во всех 12-ти элементах решетки при синфазном возбуждении и при отклонении луча на  $45^\circ$ . На рисунках 3 и 4 для примера представлены ДН на крайних частотах диапазона в плоскости сканирования линейной 12-ти элементной ФАР, размещенной в носке крыла, при синфазном возбуждении и при отклонении луча на  $45^\circ$ .

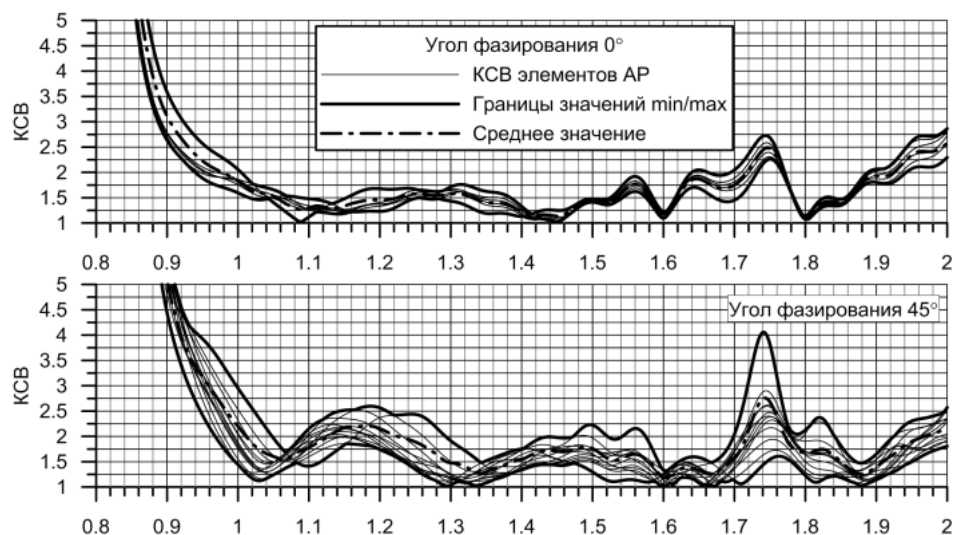


Рисунок 2 – КСВ в тракте питания всех излучающих элементов 12-элементной ФАР (1E × 12H) в полосе частот для углов фазирования 0° и 45°.

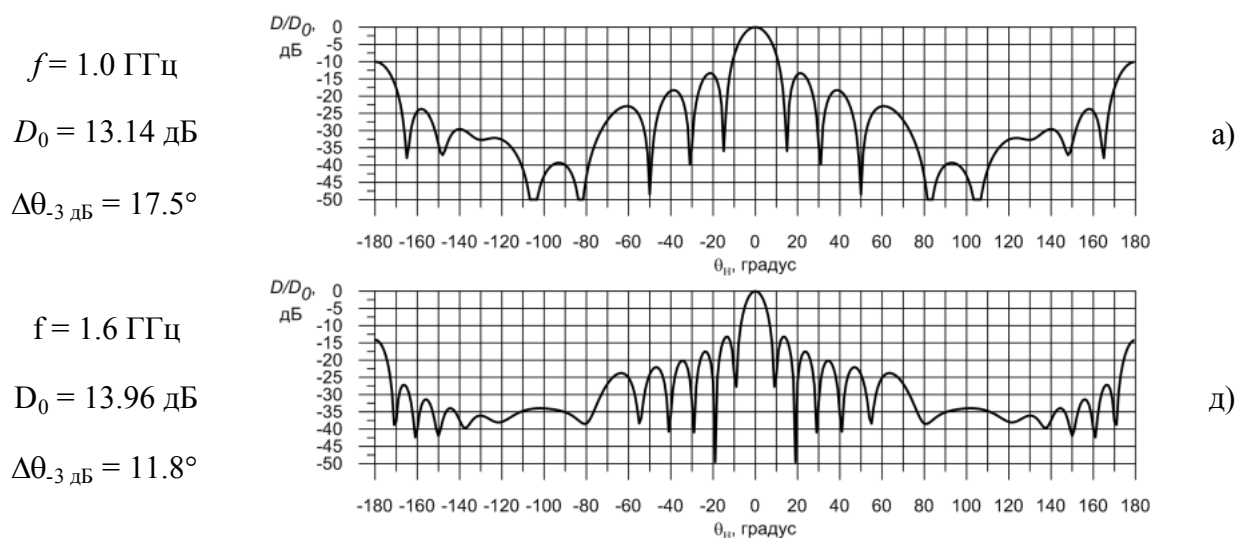


Рисунок 3 – ДН 12-элементной ФАР на основе логопериодических излучателей в плоскости  $yz$  при синфазном возбуждении. Система координат указана на рисунке 1а.

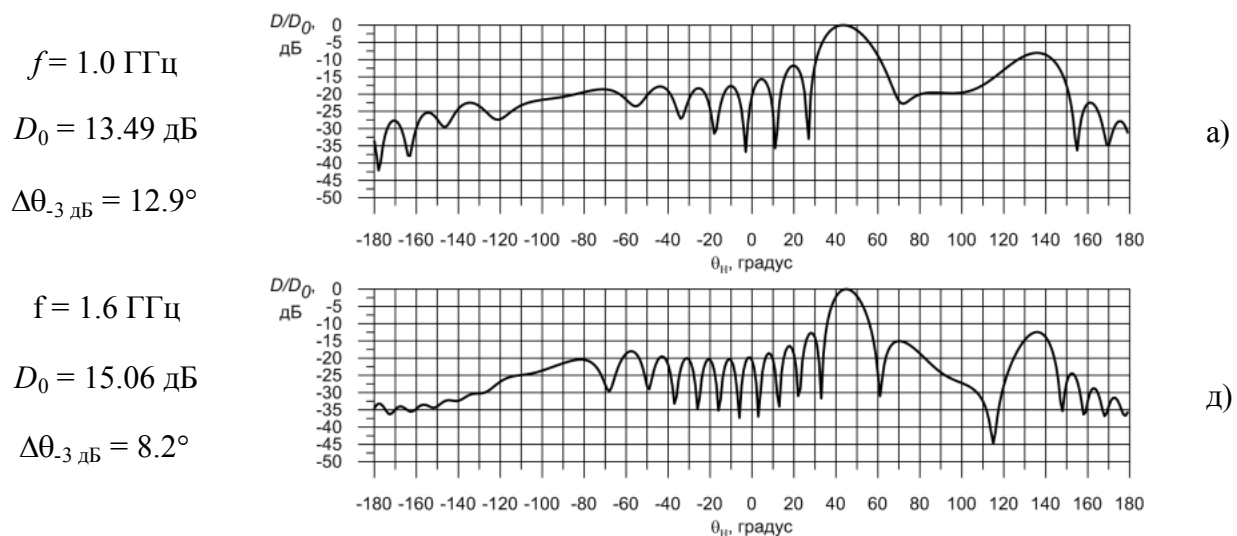


Рисунок 4 – ДН 12-элементной ФАР на основе логопериодических излучателей в плоскости  $yz$  при фазировании в направлении 45°.

Предложенный и разработанный комплекс технических решений позволяет обеспечить сканирование ФАР из печатных логопериодических элементов, расположенных в ограниченном пространстве (площадь элемента  $0.25\lambda_{\max} \times 0.25\lambda_{\max}$ ) в переднем отсеке отклоняемого носка подвижной консоли крыла, в секторе углов  $\pm 45^\circ$  по уровню КСВН  $\leq 3$  в рабочей полосе частот 1..1.6 ГГц.

**Третий раздел** посвящен особенностям размещения линейной ФАР на основе печатных монополюсных излучателей в ограниченном объеме под радиопрозрачным обтекателем в переднем отсеке отклоняемого носка крыла вблизи проводящих элементов конструкции. Габаритные размеры печатного монополюсного излучателя близки к выделенному под антенну пространству. Однако, за это приходится расплачиваться, прежде всего, стабильностью характеристик направленности.

Существует множество типов печатных широкополосных монополей. Чтобы сразу отсеять большой класс монополей, не подходящих для широкополосных ФАР, необходимо рассмотреть принципы расширения полосы. Широкополосность большинства печатных монополей обеспечивается за счет создания двух режимов работы. На низких частотах диапазона излучатель работает как обычный монополь. С повышением частоты начинается излучение через щель, образованную между экранирующей плоскостью и профилем монополя. При смене режимов работы, ДН скачком поворачивается на  $90^\circ$ , что не применимо для широкополосных ФАР. Из оставшихся, можно выделить как минимум два подходящих принципа расширения полосы: прорезание щели в экспоненциально расширяющемся профиле и использование двухрезонансного монополя.

За счет экспоненциального профиля монополя (без дополнительных технических решений) возможно получить полосу 20...30%. Для расширения полосы в профиле монополя прорезается продольная щель, разделяющая его на две части (верхнюю и нижнюю). Нижняя часть монополя перекрывает диапазон верхних частот. Верхняя часть совместно с нижней работает на втором резонансе и перекрывает нижний диапазон частот. При использовании такого принципа расширения полосы возникает две проблемы: увеличивается вертикальный размер излучателя почти до  $0.5 \lambda$  (требуется применять меры для уменьшения габаритных размеров) и ДН излучателя изменяет направление максимума в пределах  $30^\circ$  в зависимости от частоты.

Широкополосность двухрезонансного монополя обеспечивается за счет расположения геометрически подобных структур на разных слоях металлизации диэлектрической подложки в условиях сильной взаимосвязи, что обеспечивает необходимую ширину полосы рабочих частот. После численного моделирования и

сравнения характеристик двух излучателей для дальнейшего исследования был однозначно выбран двухрезонансный монополь.

Структура излучателя расположена на двух сторонах диэлектрической подложки. На нижнем слое металлизации расположен низкочастотный резонансный элемент и земляная плоскость с треугольным согласующим вырезом. На верхнем слое металлизации расположен высокочастотный резонансный элемент и полосок микрополосковой линии передачи. Слои металлизации соединены между собой при помощи металлизированного отверстия.

Как и в случае с логопериодической антенной, помещение двухрезонансного монополя в резонансную полость отклоняемого носка крыла сильно влияет на характеристики излучателя. Чтобы получить оптимальные параметры монополя использовался метод глобальной оптимизации – генетический алгоритм. В ходе оптимизации удалось снизить уровень КСВ в рабочей полосе частот до уровня 2. При этом, полоса сместилась в область нижних частот на 200 МГц.

*Конструкция излучающего элемента* на основе двухрезонансного монопольного излучателя, размещенного в консоли крыла самолета, для ФАР с рабочей полосой частот 1.0...1.6 ГГц показана на рисунке 5.

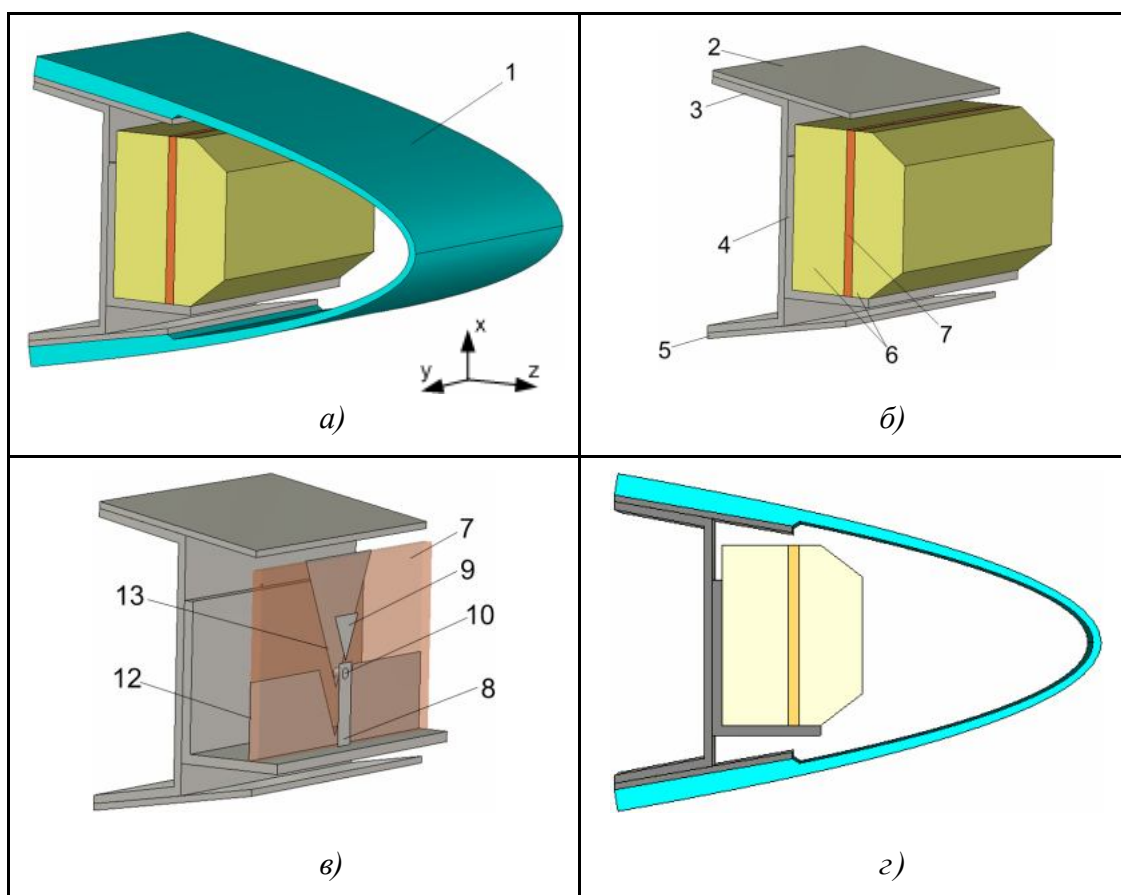


Рисунок 5 – Конструкция монопольного излучателя, размещенного в отклоняемом носке крыла под радиопрозрачным обтекателем.

Излучатель состоит из металлического основания 4, выполненного в форме уголка, и двухслойной печатной платы 7. Внутренний объем излучателя заполнен диэлектрическим вспененным наполнителем 6. На верхнем (относительно рисунка) слое металлизации платы 7 сформирован полосок 8 микрополосковой линии передачи и малый излучающий монополюс 9. На нижнем слое сформирована земляная плоскость 12 микрополосковой линии с треугольным согласующим вырезом и большой излучающий монополюс 13. Переход от полоска 8 питающей линии, расположенного на верхнем слое, к большому излучающему вибратору 13 осуществляется через металлизированное отверстие 10. Излучатель закрыт от внешних воздействий диэлектрическим обтекателем носка крыла 1, 2, 3 – металлические элементы конструкции консоли крыла.

Электродинамическая модель системы излучения включает излучающие элементы и фрагмент носка подвижной консоли крыла. В ходе моделирования методом конечных разностей во временной области были получены характеристики согласования и направленности 12-ти элементной ФАР на основе монополюсных излучателей, размещенной под радиопрозрачным обтекателем в передней кромке крыла. На рисунке 6 показаны графики КСВ во всех 12-ти элементах решетки при синфазном возбуждении и при отклонении луча на  $45^\circ$ . На рисунках 7 и 8 для примера представлены ДН на крайних частотах диапазона в плоскости сканирования линейной 12-ти элементной ФАР, размещенной в носке крыла, при синфазном возбуждении и при отклонении луча на  $45^\circ$ .

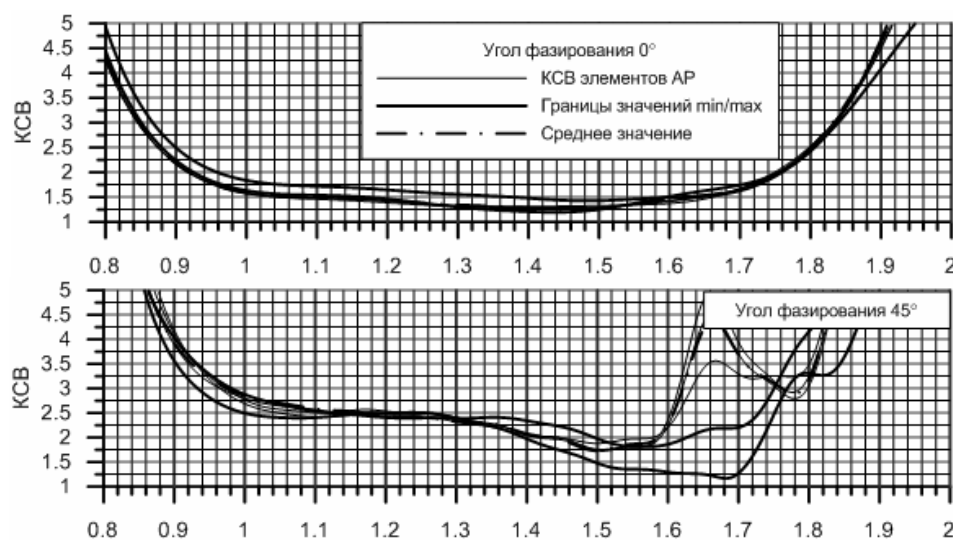


Рисунок 6 – КСВ в тракте питания всех излучающих элементов 12-элементной ФАР (1E × 12H) в полосе частот для ряда углов фазирования.

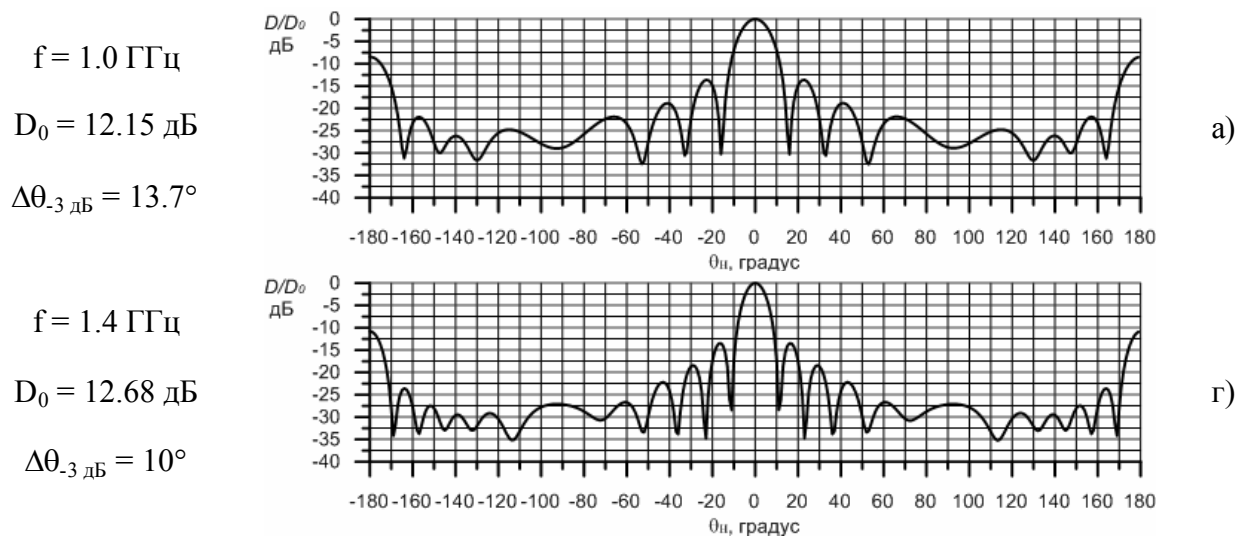


Рисунок 7 – ДН 12-элементной ФАР на основе монополярных излучателей в плоскости уз при синфазном возбуждении. Система координат указана на рисунке 5а.

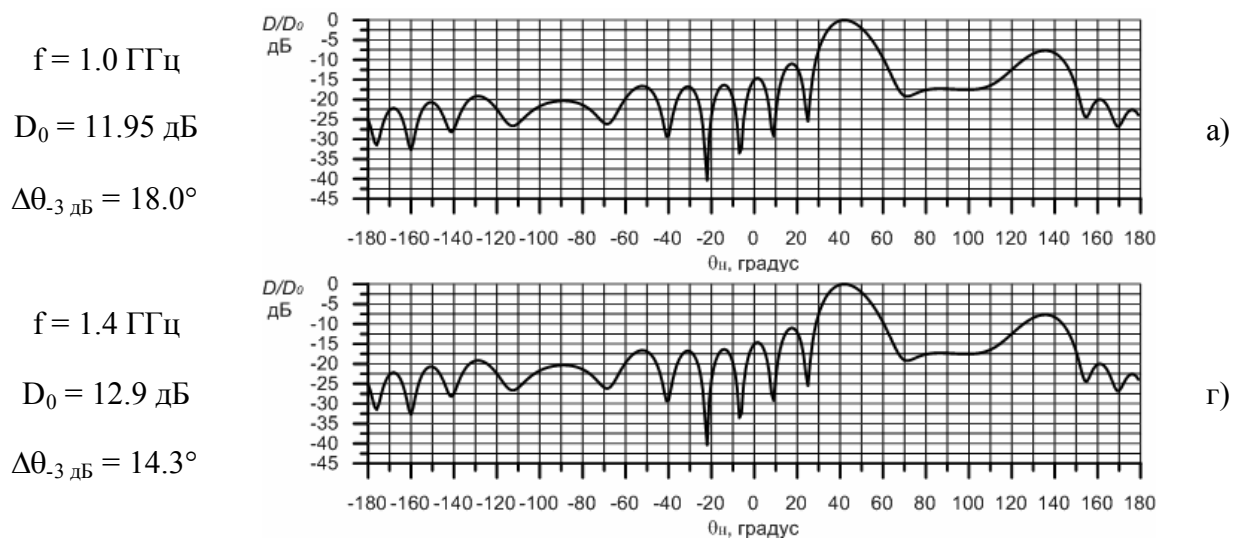


Рисунок 8 – ДН 12-элементной ФАР на основе монополярных излучателей в плоскости уз при фазировании в направлении  $45^\circ$ .

Из полученных зависимостей видно, что предложенный и разработанный комплекс технических решений позволяет обеспечить сканирование ФАР из печатных двухрезонансных монополярных элементов, расположенных в ограниченном пространстве (площадь элемента  $0.25\lambda_{\max} \times 0.25\lambda_{\max}$ ) в переднем отсеке отклоняемого носка подвижной консоли крыла, в секторе углов  $\pm 45^\circ$  по уровню КСВН  $\leq 2.8$  в рабочей полосе частот 1..1.6 ГГц.

**Четвертый раздел** посвящен вопросам связанными с оценкой влияния объекта-носителя на характеристики ФАР и оценкам эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) решетки, размещенной в носке крыла.

Обсуждается гибридный метод численного моделирования, объединяющий метод моментов – метод физической оптики (ММ-ФО), предназначенный для моделирования

сложных структур большой размерности. При этом метод моментов (ММ), требующий существенных вычислительных затрат (но достаточно строгий) используется для моделирования резонансных объектов структуры (12-элементной ФАР для полосы 1..1.6 ГГц с учетом взаимного влияния излучателей, радиопрозрачного обтекателя и конструктивных элементов), а метод физической оптики – для моделирования объектов структуры большой размерности, например крыла и фюзеляжа. Основная идея метода сводится к следующему.

В операторном виде рассеянные поля в гибридном методе определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}\mathbf{H}_S &= \mathbf{L}_J^H(\mathbf{J}_S^{MM}) + \mathbf{L}_J^H(\mathbf{J}_S^{\Phi O}), \\ \mathbf{E}_S &= \mathbf{L}_J^E(\mathbf{J}_S^{MM}) + \mathbf{L}_J^E(\mathbf{J}_S^{\Phi O}), \\ S_0 &= S_{MM} + S_{\Phi O}\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{J}_S^{MM}$ ,  $\mathbf{J}_S^{\Phi O}$  – вектора плотности поверхностных токов, определяемые на поверхности  $S_{MM}$  методом моментов, а на поверхности  $S_{\Phi O}$  – методом физической оптики;

$$\mathbf{L}_J^H\{\mathbf{J}_s(\mathbf{r}')\} = \frac{1}{2\pi} \oint_{S_0} \left( \mathbf{n} \times (\dots) \times \nabla' \frac{e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \right) ds' \quad (2)$$

– магнитный линейный интегро-дифференциальный оператор ( $k = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ ,  $\mathbf{n}$  – внешняя нормаль по отношению к поверхности  $S_0$ ), определяющий при заданном внешнем магнитном поле  $\mathbf{H}^{cm}(\mathbf{r})$  интегральное уравнение магнитного типа относительно  $\mathbf{J}_s(\mathbf{r})$ :

$$\mathbf{J}_s(\mathbf{r}) = 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}^{cm}(\mathbf{r}) + \mathbf{L}_J^H\{\mathbf{J}_s(\mathbf{r}')\}, \quad \mathbf{r}, \mathbf{r}' \in S_0. \quad (3)$$

Соответственно,

$$\mathbf{L}_J^E\{\mathbf{J}_s(\mathbf{r}')\} = \mathbf{n} \times \oint_{S_0} \left\{ ik\eta(\dots)G + \frac{\eta}{ik} [\nabla' \cdot (\dots)] \nabla' G \right\} ds' \quad (4)$$

– электрический линейный интегро-дифференциальный оператор ( $\eta = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ ,  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  – функция Грина), определяющий при заданном внешнем электрическом поле  $\mathbf{E}^{en}(\mathbf{r})$  интегральное уравнение электрического типа относительно  $\mathbf{J}_s(\mathbf{r})$ :

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E}^{en}(\mathbf{r}) = \mathbf{L}_J^E\{\mathbf{J}_s(\mathbf{r}')\}, \quad \mathbf{r}, \mathbf{r}' \in S_0. \quad (5)$$

В соответствии с ММ-ФО решение для токов в (3) и (5) на проводящей поверхности  $S_{MM}$  ищется в виде:

$$\mathbf{J}_S^{MM} = \sum_{n=1}^{N^{MM}} \alpha_n \mathbf{f}_n, \quad (6)$$

где  $\alpha_n$  – неизвестные константы,  $\mathbf{f}_n$  – базисные векторные функции.

Используя далее (5) и стандартную процедуру нахождения коэффициентов  $\alpha_n$  определяем ток  $\mathbf{J}_S^{MM}$ , который создаёт в каждой точке пространства, включая поверхность  $S_{\phi O}$ , дополнительно к полю сторонних источников рассеянное поле  $\mathbf{H}^{pac} = \mathbf{L}_J^H(\mathbf{J}_S^{MM})$ . Соответственно, наводимый на поверхность  $S_{\phi O}$  ток  $\mathbf{J}_S^{\phi O}$  должен удовлетворять интегральному уравнению типа (3) для магнитного поля, в котором  $\mathbf{H}^{cm}$  заменяется на полное магнитное поле  $(\mathbf{H}^{cm} + \mathbf{H}^{pac})$ . Формально в соответствии с ММ решение для токов на проводящей поверхности  $S_{\phi O}$  находится аналогично (6) в следующем виде:

$$\mathbf{J}_S^{\phi O} = \sum_{n=N^{MM}+1}^{N^{\phi O}} \beta_n \mathbf{f}_n, \quad (7)$$

где  $\beta_n$  – неизвестные константы.

Однако при использовании приближения физической оптики полностью пренебрегают эффектом взаимодействия, описываемым интегральным членом уравнения (3) на освещённой части поверхности рассеивателя  $S_{\phi O}$ , и предполагают, что в области тени взаимная интерференция полностью гасит падающее поле. Тогда неизвестные константы  $\beta_n$  в (7) можно считать известным в терминах коэффициентов  $\alpha_n$ , поскольку  $\mathbf{H}^{pac} = \mathbf{L}_J^H(\mathbf{J}_S^{MM})$ :

$$\begin{cases} \mathbf{J}_S^{\phi O}(\mathbf{r}) = 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}^{cm}(\mathbf{r}) + \sum_{n=1}^{N^{MM}} 2\alpha_n \mathbf{n} \times \mathbf{L}_J^H(\mathbf{f}_n) & \text{в освещенной области,} \\ \mathbf{J}_S^{\phi O}(\mathbf{r}) = 0 & \text{в зоне тени.} \end{cases} \quad (8)$$

Ток  $\mathbf{J}_S^{\phi O}(\mathbf{r})$  создаёт в каждой точке пространства, включая поверхность  $S_{MM}$ , дополнительно к внешнему электрическому полю рассеянное поле  $\mathbf{E}^{pac} = \mathbf{L}_J^H(\mathbf{J}_S^{\phi O})$ . Рассеянное на  $S_{\phi O}$  поле наводит токи на  $S_{MM}$ , что искажает первоначально рассчитанное поле. В результате требуется некоторая итерационная процедура для согласования граничных условий на поверхностях.

Для оценки погрешности, времени счёта, вычислительных ресурсов проведено тестирование метода на объекте «металлический куб–вибратор». Например, для куба с размером стороны  $5\lambda$  время расчета и количество используемой оперативной памяти



(относительно ММ) сократились в 250 раз, а относительная погрешность при расчете ДН составила 0.2%.

Расчет 12-ти элементной ФАР, размещенной в носке крыла под радиопрозрачным обтекателем, совместно с крылом объекта-носителя показал, что при синфазном возбуждении различия ДН наблюдаются на уровне -25 дБ, а при отклонении луча на 45° на уровне -15 дБ.

Второй вопрос, рассматриваемый в четвертом разделе, - оценка ЭПР ФАР. Под *эффективной поверхностью рассеяния* (в англоязычной транскрипции “radar cross section” – RCS) в случае гармонических полей понимается площадь такого плоского эквивалентного отражателя, который, равномерно рассеивая падающую на него мощность волны с направления  $(\theta_0, \phi_0)$ , создаёт в произвольной точке с координатами  $(r, \theta, \phi)$  в дальней зоне рассеивателя такую же плотность потока мощности, что и реальный рассеиватель. При  $\theta = \theta_0, \phi = \phi_0$  ЭПР называют однопозиционной (моностатической), при  $\theta \neq \theta_0, \phi \neq \phi_0$  – двухпозиционной (бистатической). Зависимость моностатической ЭПР от угловых координат называют диаграммой направленности рассеянного поля (диаграммой обратного рассеяния – ДОР)  $F^S(\theta_0, \phi_0)$ .

Грубая оценка ЭПР ФАР проводится в соответствии с выражением  $\sigma = 4\pi A_e^2 |\Gamma_a|^2 / \lambda^2$  ( $\Gamma_a$  коэффициент отражения антенны), либо с помощью приближенных аналитических соотношений, а для проверки алгоритмов численного моделирования ЭПР (ДОР) ФАР проведен расчет ДОР квадратной (сторона  $a = \lambda$ ) и круглой ( $D = 1.12\lambda$ ) металлических пластин методом конечных разностей во временной области (FDTD в англоязычной терминологии) и методом конечных элементов (FEM в англоязычной терминологии). В частности, в секторе углов до 30° наблюдается удовлетворительное совпадение результатов (численное моделирование не выявляет глубоких "нулей", более 10...15 дБ, в области боковых лепестков ДОР). В секторе углов более 30° аналитические выражения дают заниженный уровень боковых лепестков, поскольку не учитывают дифракцию на ребрах пластин. Результаты численного моделирования (FDTD, FEM) совпадают между собой в секторе углов до 35...45° и совпадают в среднем практически до 90°.

Оценка ДОР 12-ти элементной ФАР, размещенной в носке крыла, проводилась в диапазоне углов равном 45°. Угол  $\alpha$ , который определяет стреловидность крыла, принят равным 49°. Угол  $\beta$  отсчитывается от строительной оси ЛА и изменяется в диапазоне – 7.5°...+37.5°, угол  $\gamma$  отсчитывается от нормали к крылу и изменяется в диапазоне

+56.5°...+11.5°. Углы в этом диапазоне с точки зрения стратегии ведения боя считаются наиболее опасными. Рассматриваемый диапазон углов условно разделен на три сектора, шириной 15° градусов каждый.

При моделировании ДОР методом FDTD количество излучающих элементов  $N = 8$  было ограничено с учетом требуемых вычислительных ресурсов, шаг между элементами равен  $0.36\lambda_d$ , где  $\lambda_d$  - длина волны на нижней частоте диапазона. Поляризация облучающей плоской волны Х - диапазона частот (8.5...12.5 ГГц) совпадает с плоскостью Е элементов ФАР. Значение шага по  $\angle\gamma$  ( $\angle\beta$ ) выбрано равным 1° исходя из компромисса между точностью интерполяции ДОР и требуемым количеством расчетов. Результатом однократного численного расчета является ЭПР излучающей системы во всем секторе углов во всей полосе частот электродинамического моделирования. Для ряда выбранных частот (8.5, 9.4, 10.5, 11.5, 12.5 ГГц) определяется значение ДОР. Выполняется сплайн-аппроксимация ДОР по  $\angle\gamma$ . Цифра в кружке под осью  $\gamma$  обозначает номер и место (угловое положение) соответствующего так называемому дифракционному порядку Брэгга.

На рисунке 9 для примера показаны графики ДОР для линейной ФАР на основе логопериодических излучателей, работающей в диапазоне 1...1.6 ГГц при облучении частотами 9.4, 10.5 и 11.5 ГГц.

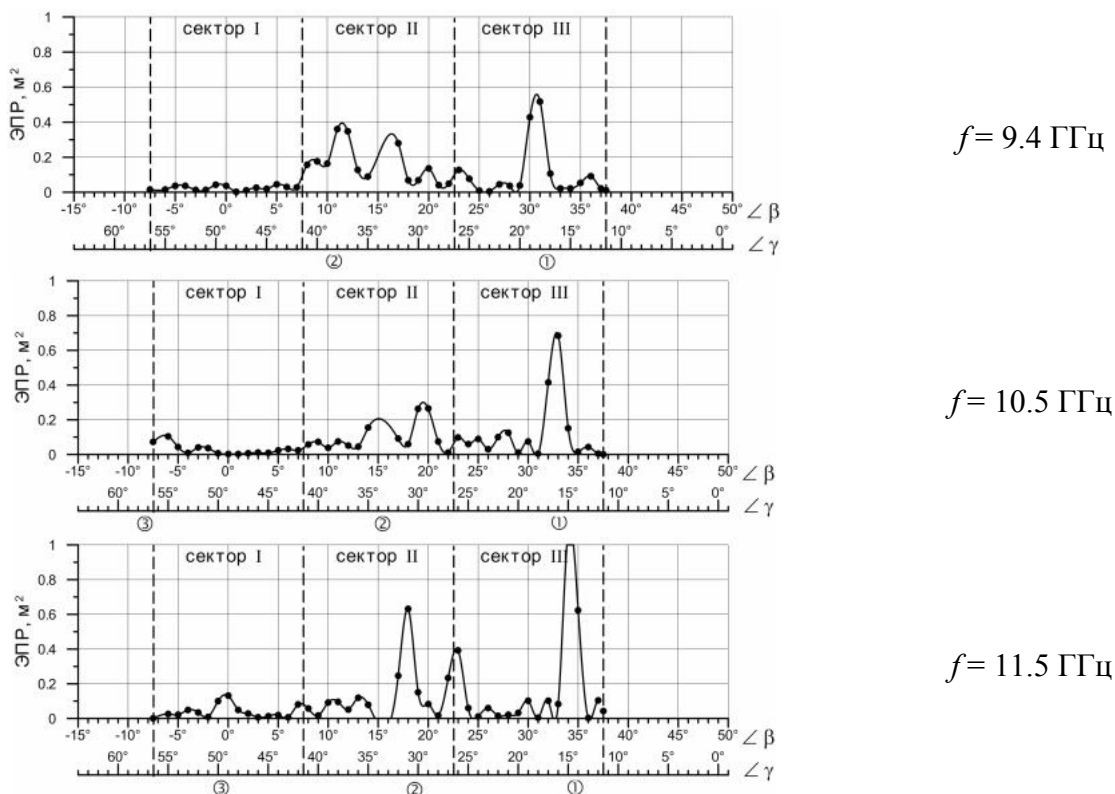


Рисунок 9 – Диаграмма обратного рассеяния АР на основе печатного логопериодического вибраторного излучателя.

## Заключение

Диссертация посвящена особенностям размещения широкополосной ФАР дециметрового диапазона с широкоугольным сканированием в ограниченном пространстве в переднем отсеке отклоняемого носка крыла.

В результате исследований, проведенных в рамках поставленных задач, получены следующие основные результаты:

1. Определен принцип построения широкополосного излучающего полотна линейной бортовой широкополосной многофункциональной сканирующей ФАР и сформулированы технические требования к ней.
2. Проведен аналитический обзор излучающих элементов ФАР, удовлетворяющих заданным требованиям. Показано, что традиционные печатная логопериодическая антенна и металлодиэлектрический неоднородный излучатель превышают выделенный размер и требуют дополнительных мер по снижению габаритов. Габаритные размеры монопольного излучателя сопоставимы с выделенным пространством и требуют незначительной корректировки в меньшую сторону.
3. Предложены меры снижения габаритных размеров печатного логопериодического излучателя: использование вибраторов сложной формы для наращивания пути тока, помещение печатной антенны в симметричный диэлектрический слой (ламинирование подложки).
4. Проведено численное моделирование бесконечной и конечной 12-ти элементной линейной АР на основе логопериодических излучателей в рабочей полосе 1..1.6 ГГц, размещенной в переднем отсеке отклоняемого носка крыла ЛА с учетом взаимного влияния излучающих элементов, конструктивных (несущих) и аэродинамических элементов крыла (П-образного резонансного короба, образованного несущими балками, и радиопрозрачного диэлектрического обтекателя). Получены характеристики согласования и направленности конечной решетки.
5. Исследовано влияние П-образного металлического короба, образованного несущими балками крыла ЛА и элементов крепления подложки, которые используются для управления уровнем взаимной связи между печатными ЛПВА и элементами конструкции крыла, на характеристики антенны. Показано что П-образный короб работает совместно с логопериодическим излучателем как длинноволновый широкополосный рефлектор сложной формы и смещает нижнюю границу рабочей полосы частот на 300-400 МГц.
6. Проведена оптимизация на основе генетического алгоритма структуры ЛПВА, размещенной в ограниченном пространстве в переднем отсеке отклоняемого носка крыла.

Показано, что полоса оптимальной ЛПВА расширяется на 200 МГц, КНД на верхней частоте возрастает на 0,5 дБ, оставаясь неизменным на других частотах диапазона.

7. Разработана конструкция логопериодической антенны, размещенной в ограниченном пространстве в переднем отсеке отклоняемого носка крыла.

8. Показано, что антенная решетка из печатных логопериодических элементов, расположенная в ограниченном пространстве (площадь элемента примерно  $0.25\lambda_{\max} \times 0.25\lambda_{\max}$ ) в переднем отсеке отклоняемого носка подвижной консоли крыла летательного аппарата, обеспечивает сканирование в секторе  $\pm 45$  по уровню КСВН  $\leq 3$  в рабочей полосе частот 1..1.6 ГГц.

9. Проведено численное моделирование бесконечной и конечной 12-ти элементной линейной АР на основе монополюсных излучателей в рабочей полосе 1..1.6 ГГц, размещенной в переднем отсеке отклоняемого носка крыла ЛА с учетом взаимного влияния излучающих элементов, конструктивных и аэродинамических элементов крыла (П-образного резонансного короба, образованного несущими балками, и радиопрозрачного диэлектрического обтекателя). Получены характеристики согласования и направленности конечной решетки.

10. Исследовано влияние П-образного металлического короба на характеристики антенны. Разработана конструкция монополюсного излучателя, размещенного в ограниченном пространстве в переднем отсеке отклоняемого носка крыла.

11. Показано, что антенная решетка из печатных монополюсных элементов, расположенная в ограниченном пространстве (площадь элемента примерно  $0.25\lambda_{\max} \times 0.25\lambda_{\max}$ ) в переднем отсеке отклоняемого носка подвижной консоли крыла, обеспечивает сканирование в секторе  $\pm 45$  по уровню КСВН  $\leq 2.8$  в рабочей полосе частот 1..1.6 ГГц.

12. Проведено тестирование гибридного метода ММ-ФО на модельной задаче (вибратор, размещенный над кубом). Показано, что погрешность метода при расчете модельной задачи не превышает 1 % для наихудшего случая и снижается до 0,2 % с ростом размерности задачи, а времени вычисления и затраты оперативной памяти сокращаются в 7 раз, если длина стенки куба равна длине волны, и в 250 раз, если длина стенки куба равна пяти длинам волн.

13. Проведена оценка влияния объекта-носителя на характеристики выбранных ФАР на основе логопериодических и монополюсных печатных излучателей. Показано, что влияние крыла объекта-носителя не превышает уровня -25 дБ при синфазном возбуждении ФАР и уровня -15 дБ при отклонении луча на  $45^\circ$ .

14. Рассмотрены особенности оценки моностатической и бистатической ЭПР ФАР. Проведено тестирование численных алгоритмов и представлена диаграмма обратного рассеяния ФАР из логопериодических и монополюсных излучателей дециметрового диапазона с рабочим диапазоном частот 1...1.6 ГГц при облучении волной сантиметрового диапазона в полосе 8.5...12.5 ГГц.

15. Проведено сравнение по совокупности параметров ФАР на основе излучателей трех типов: печатный логопериодический вибраторный излучатель, двухрезонансный треугольный монополюсный излучатель и металлодиэлектрический неоднородных излучатель (МНИ). Для выбранных весовых коэффициентов наилучшим излучателем оказался двухрезонансный треугольный монополь.

### **Публикации по теме диссертации**

1. Ильин Е.В., Милосердов М.С., Темченко В.С. Печатная логопериодическая фазированная антенная решетка L-диапазона, размещенная в ограниченном объеме. // Антенны №3, М.: Радиотехника, 2013, стр. 14 – 21.
2. Милосердов М.С., Гиголо А.И. Малогабаритный логопериодический печатный излучатель для линейной бортовой антенной решетки. // Информационно-измерительные и управляющие системы, №10, М.: Радиотехника, 2012, стр. 62 – 67.
3. Милосердов М.С., Гиголо А.И. Гибридные методы расчета электродинамических задач большой размерности. // Информационно-измерительные и управляющие системы №4, изд. Радиотехника, Москва 2012, стр. 38 – 46.
4. Милосердов М.С. Балина И.А. Бортовая линейная антенная система с электронным управлением лучом на основе логопериодических элементов. // Коллективная монография. под ред. Ю.И. Белого. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2013-2015. М.: Радиотехника, 2013, стр. 186-194.
5. Е.В. Ильин, М.С, Милосердов, В.С. Темченко. Печатная логопериодическая фазированная антенная решетка L-диапазона, размещенная в ограниченном объеме. // Коллективная монография под ред. А.Ю. Гринева. Научно-технические серии: Антенные системы локации, навигации и радиосвязи, М.: Радиотехника, 2013, стр. 126-132.
6. Милосердов М.С., Бронников Д.В. Монополюсный широкополосный печатный излучатель. / Труды 11-ой международной конференции «Авиация и космонавтика - 2012», 13 – 15 ноября 2012 г., стр. 246-247.
7. Милосердов М.С., Гиголо А.И. Влияние П-образного металлического профиля на характеристики малогабаритного логопериодического излучателя. / Труды 8-ой

молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций РТ-2012», 23-27 апреля 2012 г., Севастополь, Украина, стр. 214.

8. Милосердов М.С. Логопериодический печатный излучатель для бортовой антенной решетки  $L$ -диапазона. / Труды научно-практической конференции молодых ученых и студентов МАИ «Инновации в авиации и космонавтике - 2012», 17-20 апреля 2012 г., стр. 106 –107.

9. Милосердов М.С. Малогабаритный логопериодический излучатель для линейной антенной решетки. / Труды 10-ой международной конференции «Авиация и космонавтика - 2011», 8 – 10 ноября 2011 г., стр. 201-202.

10. Милосердов М.С., Гиголо А.И. – Гибридные методы расчета электродинамических задач большой размерности. / Труды научно-практической конференции молодых ученых и студентов МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2011», 26 – 30 апреля 2011г, Москва, стр. 58-59.

11. Милосердов М.С., Балина И.А., Волков А.П. Широкополосная антенная решетка дециметрового диапазона. / Труды 7-ой молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций РТ-2011», 11-15 апреля 2011 г., Севастополь, Украина, стр. 216.