

На правах рукописи



Овчинникова Елена Викторовна

**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ С ШИРОКИМ  
СЕКТОРОМ ОБЗОРА**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**Воскресенский Дмитрий Иванович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Кирпанёв Алексей Владимирович**

доктор технических наук, профессор  
**Курочкин Александр Петрович**

доктор технических наук, профессор  
**Нечаев Евгений Евгеньевич**

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Защита состоится « 19 » декабря 2017 г. в 14 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.125.03 Московского авиационного института

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Отзыв, заверенный печатью, просим направлять по адресу:  
125993, ГСП – 3, А – 80, Москва, Волоколамское шоссе, д.4. Ученый Совет МАИ.

Автореферат разослан « 18 » сентября 2017 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,

Доктор технических наук, профессор



Сычев М.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В последнее время наметилась тенденция к комплексированию радиотехнических систем и созданию многофункциональных радиоэлектронных комплексов. Одной из актуальнейших проблем антенной техники является расширение функциональных возможностей радиотехнических комплексов, путем применения в них широкополосных и многодиапазонных антенных систем с широкоугольным электрическим сканированием, расширенным сектором обзора, а в некоторых случаях и моноимпульсным режимом работы. Антенные системы мобильных радиоэлектронных комплексов радиолокации и связи также должны обладать высоким энергетическим потенциалом. Решение этих проблем способствует созданию нового поколения бортовых радиоэлектронных систем (РЭС) с интегрированием функций.

В последнее десятилетие интенсивно развивалась теория и техника фазированных антенных решеток (ФАР). Написаны монографии, разработаны системные электродинамические модели и созданы антенные решетки стрельбовых комплексов (С-300, С-300В, Patriot) и бортовых РЛС трех сантиметрового диапазона (Жук, Сокол и др.).

Существующая теория ФАР и активных фазированных антенных решеток (АФАР) позволяет рассчитать ожидаемые характеристики таких систем, однако, дальнейшее развитие антенной техники требует создания конкурентоспособных РЭС с новыми характеристиками. В частности, к таким средствам можно отнести интегрированные бортовые комплексы, работающие одновременно на нескольких частотах или осуществляющие электрическое сканирование в секторе, превышающем  $\pm 60^\circ [1^*]$ . Для расширения сектора сканирования и рабочей полосы частот применяются различные выпуклые, а также комбинированные антенные решетки. Возможно также применение купольных схем построения, сочетающих в

конструкции плоскую и неплюскую антенную решетку из волноводных или диэлектрических линз, расширяющих сектор сканирования [2<sup>\*</sup>-7<sup>\*</sup>].

Для совмещения функций различных радиосистем ФАР должна обеспечивать приемлемые характеристики направленности в широкой полосе. Использование второго диапазона позволяет улучшить точностные характеристики и повысить помехозащищенность системы [8<sup>\*</sup>-10<sup>\*</sup>].

Особо остро стоит вопрос по созданию ФАР и АФАР миллиметрового диапазона. Целый ряд проблем, связанных с формированием антенного полотна и осуществлением управления лучом в коротковолновой части миллиметрового диапазона рассмотрен в работах [11<sup>\*</sup>-16<sup>\*</sup>].

В соответствии с общими задачами в антенной технике, возникает необходимость расширения рабочей полосы, уменьшения УБЛ, повышения помехозащищенности. Эти проблемы в свою очередь приводят к увеличению шага излучателей, который в решетке ограничен условием реализации однолучевого режима, а в коротковолновой части миллиметрового диапазона – условиями практической реализации [17<sup>\*</sup>,18<sup>\*</sup>].

Из литературы известны широкополосные и совмещенные многофункциональные АР [19<sup>\*</sup>,20<sup>\*</sup>]. Однако рассматриваемые антенны имеют сложную распределительную систему и не обеспечивают необходимые в настоящее время технические характеристики. Применение выпуклых ФАР (ВФАР), позволяет расширить рабочую полосу частот и увеличить расстояние между элементами без потери коэффициента усиления (КУ), уменьшить уровень коммутационных боковых лепестков и упростить согласование излучателей в антенной решетке [21<sup>\*</sup>]. Отмеченные в монографии [21<sup>\*</sup>] сложности практической реализации в настоящее время можно достаточно просто преодолеть, используя современную элементную базу. В процессе развития ВФАР были предложены и исследованы различные варианты размещения элементов: на цилиндрических, конических,

сферических поверхностях, но ВФАР по-прежнему имеют большие габариты и число элементов существенно превышающее минимально необходимое.

Перспективным направлением создания бортовых антенных систем являются АФАР с пространственным размещением элементов и цифровым диаграммообразованием. В таких решетках упрощается схема формирования диаграммы направленности, а также создание ДН специальной формы.

В современных бортовых антенных системах уровень бокового и обратного излучения не должен превышать  $-20\text{дБ}$  при достаточно жестких требованиях к энергетическим и массогабаритным характеристикам. Размеры раскрытия таких систем определяются размерами поперечного сечения летательного аппарата (ЛА). Использование спадающего амплитудного распределения для уменьшения УБЛ приводит к сильному уменьшению усиления АР. Известны различные законы изменения амплитудно-фазового распределения (АФР), а также широко применяется синтез АФР для получения требуемого УБЛ при минимальном падении усиления. Для решения задач синтеза наиболее эффективными оказываются численные методы оптимизации, такие, например, как генетический алгоритм [22\*]. Однако, численные методы оптимизации применимы при работе антенной системы в узкой полосе частот. Поэтому целесообразно использовать комбинированные методы синтеза амплитудно-фазового распределения и пространственного размещения элементов АР. Для таких структур необходимо определить характеристики направленности и энергетические характеристики и провести сравнение этих характеристик с существующими АР.

Таким образом, основными направлениями развития бортовых антенных систем являются:

а)повышение функциональных возможностей за счет расширения рабочей полосы и сектора сканирования;

б)изыскание путей построения и разработка математических и электродинамических моделей антенн с широкоугольным сканированием, широкой рабочей полосой или специальной формой диаграммы направленности;

в)разработка методик синтеза различных структур построения антенного полотна с плоским и пространственным размещением элементов, а также оценка допусков при изготовлении.

При реализации указанных направлений развиваются основы теоретического исследования бортовых антенных решеток и разрабатываются их электродинамические модели с учетом условий эксплуатации. Применение методов статистического анализа характеристик позволяет определить возможности практической реализации моделей, а также ряд требований к технологии производства бортовых антенных решеток.

### **Объекты и предметы исследований**

К объектам диссертационных исследований относятся антенные решетки с пространственным размещением элементов и широкоугольным сканированием, а также антенные решетки бортовых телекоммуникационных и радиолокационных систем со специальными формами диаграмм направленности. Предметами исследований являются электродинамические модели антенных решеток с плоской и пространственной структурой антенного полотна.

### **Цель и задачи работы**

Целью диссертационной работы является разработка методов анализа и синтеза характеристик антенных решеток с широким сектором обзора и построение электродинамических моделей антенных систем мобильных комплексов со специальными формами диаграмм направленности.

**Для достижения указанной цели** в рамках общей проблемы разработки и создания широкополосных антенных систем с широкоугольным сканированием развит новый подход к решению задач антенной техники, отличающийся применением пространственных структур для расширения рабочей полосы и сектора обзора. В рамках данного подхода в диссертационной работе решаются следующие задачи:

Анализ и разработка методов теории антенных решеток с расширенным телесным сектором сканирования и рабочей полосой частот.

Анализ и разработка методов моделирования волноводных возбuditелей, образованных конформными поверхностями для антенных систем мобильных телекоммуникационных и радиолокационных систем с волной типа Т, обеспечивающих отсутствие дисперсии, минимальные потери и массогабаритные характеристики при моноимпульсной работе и позволяющих преодолеть основные трудности построения конформных АФАР.

Исследование характеристик направленности, рабочей полосы и определение минимального количества излучателей в антенных решетках с пространственной структурой размещения элементов в эквивалентном излучающем раскрыве, обеспечивающее одномерное широкоугольное сканирование.

Разработка теории синтеза и методов, позволяющих уменьшить уровень бокового излучения за счет перераспределения бокового фона и вариации излучающего раскрыва.

Исследование влияния амплитудных и фазовых ошибок на характеристики направленности антенных решеток с пространственной структурой размещения элементов, позволяющее определить допуски на изготовление элементов антенного полотна и распределительной системы.

## **Методы исследования**

Численные методы электродинамики, теории синтеза антенн, численные методы математического анализа, методы статистической теории антенн, численное моделирование характеристик ККАР на ЭВМ и метод собственных функций теории регулярных волноводов.

### **Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:**

- предложен новый способ построения и развиты математические методы исследования антенных систем, обеспечивающих широкий сектор обзора при работе в широкой полосе частот.
- доказаны преимущества пространственного способа размещения элементов в антенных системах с широкоугольным сканированием, позволяющего минимизировать число управляющих элементов в распределительной системе антенной решетки, а также существенно уменьшить взаимодействие элементов за счет возможности их пространственного разнесения.
- предложены системы возбуждения антенных решеток с широким сектором обзора в виде конформных поверхностей с азимутально симметричной структурой и основной волной типа Т, обеспечивающие недисперсионную работу в широкой полосе частот и азимутально симметричное возбуждение элементов антенной системы при широкоугольном сканировании.
- разработаны методы расчета характеристик систем возбуждения антенных решеток с широким сектором обзора в виде конформных поверхностей с волной типа Т.
- разработаны методы синтеза характеристик направленности антенных решеток с широкоугольным сканированием, обеспечивающие требуемый уровень бокового излучения.

- Разработан способ оценки влияния технологических погрешностей, возникающих при изготовлении антенного полотна и распределительной системы на характеристики направленности, позволяющий определить допуски на изготовление отдельных элементов антенной системы.

### **Практическая значимость результатов работы**

Разработанные в диссертации методы синтеза и статистического анализа характеристик направленности антенных решеток реализованы в виде прикладных программ и направлены на решение широкого круга задач, в частности, для получения исходных данных при создании макетов антенного полотна и распределительной системы антенной решетки с широкоугольным сканированием.

На основе разработанных электродинамических моделей выполнены опытные образцы антенны телекоммуникационной системы, мобильной бортовой двухдиапазонной радиолокационной антенной системы, антенной решетки бортовой РЛС, устанавливаемой на вертолете, и вертолетной РЛС морского базирования «Минога», низкопрофильного антенного модуля спутниковой связи сантиметрового диапазона волн с широкоугольным механическим сканированием «Вига».

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

- Принципы построения кольцевых концентрических антенных решеток, основанные на теории выпуклых антенн, обеспечивающие широкоугольное сканирование в секторе  $360^\circ$  в азимутальной плоскости, расширение рабочей полосы и минимизацию числа элементов и управляющих устройств за счет пространственной структуры размещения элементов в антенном полотне.
- Системы возбуждения антенных решеток, построенные на основе теории коаксиального, радиального и сферического волноводов, позволяющие

уменьшить потери на порядок по сравнению с фидерными распределительными системами, устранить дисперсию и минимизировать массогабаритные характеристики антенных решеток с широкоугольным сканированием за счет использования волноводных систем с волной типа Т и азимутально симметричной структурой.

- Модели антенных решеток большой размерности, разработанные с использованием специализированных программных средств, применяемых для электродинамического моделирования антенн и устройств СВЧ и позволяющие определить характеристики антенной системы с учетом взаимного влияния элементов.
- Методология синтеза антенных решеток с широкоугольным сканированием, обеспечивающая требуемый УБЛ при изменении положения луча в широком секторе углов.
- Модели бортовых антенных решеток радиолокационных систем, а также систем спутникового телевидения и спутниковой связи, выполненных с применением новых технологий, позволяющих минимизировать массогабаритные характеристики.

#### **Достоверность полученных результатов подтверждается:**

- применением прошедших апробацию методов общей и статистической теории антенн;
- использованием специализированных компьютерных программ, позволяющих проводить анализ структуры антенного полотна и распределительной системы численными электродинамическими методами;
- проверкой полученных результатов вычислительными экспериментами и экспериментальными исследованиями;
- использованием разработанных моделей в опытных образцах радиоэлектронных средств.

## **Реализация и внедрение результатов работы**

Электродинамические модели и результаты анализа характеристик антенных систем использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию антенных решеток радиолокационных комплексов и телекоммуникационных систем в различных организациях: АО «Корпорация «Фазотрон – НИИР»», АО «Московский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский радиотехнический институт» (АО МНИРТИ), ОАО «НПО „Лианозовский электромеханический завод“» (НПО «ЛЭМЗ»), НПО «Энергия».

## **Апробация результатов работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXVIII Международной конференции «Теория и техника антенн», (Москва, 1998 г.), Международной конференции «Шестой научный обменный семинар. Радиотехнические средства и устройства СВЧ» (Москва, 1999 г.), Международной конференции «СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии», (Севастополь, 2000 г., 2001 г., 2003 г., 2004 г., 2005 г., 2007 г., 2014 г., 2015 г., 2016 г.), Всероссийской конференции «Излучение и рассеяние ЭМВ», (Таганрог, июнь 18-23. 2001 г.), MİKON 15<sup>th</sup> International Conference of Microwaves, Radar and Wireless Communications, Poland, (Warszawa, May 17<sup>th</sup> -18<sup>th</sup>, 2004), Всероссийской научно-технической конференции «Информационные и телекоммуникационные технологии», (Сочи, сентябрь 19-26. 2004 г.), 18 – ой Научно-технической конференции в НИИП, (Жуковский, февраль. 2004 г.), Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн», (Таганрог, 2005 г.), НТК «Инновации в авиации и космонавтике-2011», (Москва, МАИ, 2011г.), 11-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012», (Москва, МАИ, 13-14 ноября 2012г.), IEEE Xplore Antennas and Propagation (Eu-CAP), 2014 8th

European Conference on., 2-й Международной конференции "Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования земли" ОАО НИИЭМ, (г. Истра, 2014 г.), Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2015». Москва, 21-23 апреля 2015г., 4-й Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования земли». Москва, 19 мая 2016 г., 15-й Международной конференции «Авиация и космонавтика». Москва, 14-18 ноября 2016 г, 5-й Международной конференции "Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования земли" АО «Корпорация «ВНИИЭМ»», 25 мая 2017 г., Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», г. Муром, 27-29 июня 2017г.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 100 работ из них 2 монографии, 23 статьи в центральной научной печати (включая журналы «Радиотехника», «Антенны», «Труды МАИ», «Информационно-измерительные системы», «Электросвязь», «Успехи современной радиоэлектроники»), 65 докладов в трудах Международных и Всероссийских конференций и семинаров. Материалы диссертационной работы использованы при подготовке раздела в коллективной монографии «Бортовые цифровые антенные решетки и их элементы», опубликованной в издательстве «Радиотехника». Материалы диссертационной работы также использованы при подготовке 5 учебных пособий в трудах МАИ. По результатам проведённых работ получено 6 патентов.

### **Личный вклад**

В работах, выполненных в соавторстве, выводы основных теоретических соотношений получены автором. Автор принимал участие в разработке бортовых антенных решеток для вертолетов нового поколения, а также для мобильных радиолокационных и телекоммуникационных комплексов. Автором проведено моделирование и оптимизация характеристик направленности антенн с широкоугольным сканированием и пространственным размещением элементов.

### **Объем и структура диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы. Работа содержит 276 страниц машинописного текста, основное содержание диссертации изложено на 253 страницах. Список литературы включает 143 наименования на 13 страницах.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении к диссертации обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели, задачи и методы исследований, изложены научная новизна и практическая значимость. Приводятся основные научные положения, выносимые на защиту и дается краткое содержание каждой из глав диссертационной работы.

**В первой главе «Состояние и проблемы бортовых антенных систем»** рассматриваются сканирующие антенные решетки, применяемые в современных телекоммуникационных и радиолокационных системах. Определяются основные проблемы, возникающие при расширении функциональных возможностей радиотехнических систем. Обсуждаются пути построения антенных систем, позволяющих преодолеть отмеченные проблемы.

В процессе создания многофункциональных радиотехнических систем возникает необходимость работы остронаправленных сканирующих антенн в широкой полосе или в нескольких диапазонах частот. Как известно, существующие плоские ФАР и АФАР узкополосны, что затрудняет их применение для создания интегрированных радиолокационных и телекоммуникационных систем, устанавливаемых на мобильных объектах. Размещение излучателей в решетке с малым шагом также исключает применение плоских антенных решеток. Таким образом, требования, предъявляемые к современным антенным системам, реализуются путем расширения сектора сканирования и рабочей полосы частот. Для улучшения отмеченных характеристик в настоящее время предложены конформные антенные решетки и различные их модификации. Однако, из-за сложности практической реализации распределительной системы, они имеют ограниченное применение.

Совершенствование элементной базы распределительных систем, разработка ППМ и цифровых систем формирования и управления лучом, определяют новые направления развития антенной техники. Наиболее перспективными схемами построения при широкоугольном сканировании широкополосной работе являются конформная и пространственная схемы построения антенного полотна. Поэтому на современном этапе развития теории антенн, актуальна проблема разработки методов расчета и синтеза характеристик направленности таких схем построения.

При ограниченном секторе обзора пространства актуальна проблема разработки антенных систем с моноимпульсной и косекансной формой диаграмм направленности, работающих в одном или нескольких диапазонах частот.

**Во второй главе «Бортовые ФАР с круговым обзором»** излагаются особенности работы и методы исследования, предложенных ранее и

получивших дальнейшее развитие, кольцевых concentрических антенных решеток (ККАР) с широкоугольным сканированием.

Кольцевые concentрические антенные решетки рис.1 обеспечивают широкоугольное сканирование в пределах  $360^\circ$  в азимутальной плоскости, практически без искажения характеристик при сканировании, но в отличие от цилиндрических антенных решеток, управление лучом может быть выполнено только с помощью фазовращателей без коммутаторов. Возможны и другие варианты практической реализации ККАР, например, дисковые антенны рис.2, из которых можно строить антенны с пространственной структурой размещения элементов любой конфигурации.

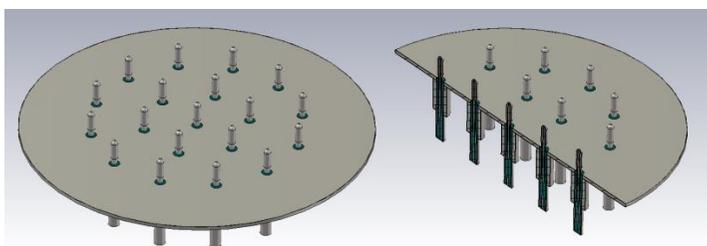


Рис.1. Общий вид ККАР.

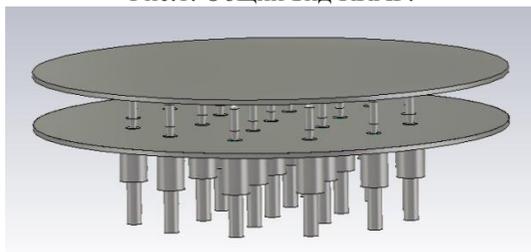


Рис.2. Модель кольцевой concentрической антенной решетки, размещенной между двумя проводящими дисками

Кольцевые concentрические антенные решетки позволяют существенно уменьшить минимально необходимое число фазовращателей. В силу центральной симметрии, в эквивалентной апертуре имеет место постоянное амплитудное распределение и ее ДН практически не искажается

при сканировании в широком секторе углов. Она обладает широкой полосой и допускает работу в диапазоне.

В сравнении с плоской решеткой в ККАР существенно изменяется взаимодействие, устраняется эффект «ослепления» и при сканировании суммарный импеданс всей системы остается постоянным. Кольцевые концентрические антенные решетки могут иметь значительный шаг между излучателями  $(2-3)\lambda$  при формировании однолучевого режима работы. На рис.3 приведена зависимость шага излучателей от ширины луча ККАР и таблица с параметрами антенных решеток.

Таблица 1

Число излучателей	Ширина луча	Шаг излучателей
347	1°	3λ
121	3°	1,75λ
61	6°	1,25λ
31	12°	0,9λ

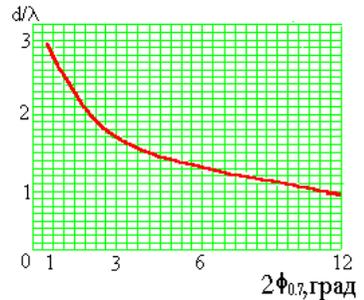


Рис.2. Зависимость шага излучателей от ширины луча ККАР.

Применение в ФАР минимально необходимого числа управляемых излучателей приводит формированию заданной ширины луча с одновременным возрастанием уровня бокового излучения. В отличие от плоских ФАР, УБЛ в простейших ККАР не убывает с ростом угловой координаты и наблюдается обратное излучение (в направлении, противоположном формированию главного максимума).

Минимизация УБЛ в ККАР возможна известными методами, как и в плоских ФАР, а также оптимизацией размещения колец и излучателей на них. Выбор методов синтеза характеристик направленности зависит от технических требований, предъявляемых к антенной системе.

Задача синтеза ДН в плоскости решетки при известных фазах возбуждения элементов сводится к трехмерной задаче поиска радиусов колец, углового шага излучателей и амплитудного распределения, необходимых для получения заданного УБЛ. Размерность задачи можно снизить, если перейти от дискретных элементов, расположенных по концентрическим окружностям к системе непрерывных излучающих колец, обеспечивающих формирование максимума в плоскости кольца. Для этого необходимо представить в замкнутом виде ДН непрерывного кольцевого излучателя с требуемым фазовым распределением. Переходя от суммы, определяющей ДН, к интегралу, получаем:

$$f(\phi) = \int_0^{2\pi} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}R(\cos\phi' - \cos(\phi - \phi'))} d\phi' = 2\pi J_0\left(2kR \sin\frac{\phi}{2}\right) \quad (1)$$

Из общей теории синтеза известны ограничения, накладываемые на функцию  $F(\phi)$ , поэтому желательно искать заданную ДН в классе функций  $L^2$ . Из теории круглых раскрывов удобно брать ДН в виде цилиндрических функций  $\Lambda_p(x)$ . При синтезе ДН в виде  $\Lambda_p$ -функции, с уменьшением УБЛ происходит одновременное расширение луча по сравнению с ранее рассчитанными характеристиками. Зависимость основных характеристик от порядка цилиндрической функции приводится в таблице 2.

Таблица 2

p	$2\phi 0,7, \text{град.}^*$	УБЛ, дБ	N/Nmin
0	$44 \frac{\lambda}{2R_{\max}}$	-7,95	$\frac{3R_{\max}}{\lambda} + 0,76$
1	$62 \frac{\lambda}{2R_{\max}}$	-18	$\frac{4,3R_{\max}}{\lambda} + 1,08$
2	$73 \frac{\lambda}{2R_{\max}}$	-24,4	$\frac{5R_{\max}}{\lambda} + 1,27$

3	$84 \frac{\lambda}{2R_{\max}}$	-30	$\frac{5,8R_{\max}}{\lambda} + 1,46$
4	$95 \frac{\lambda}{2R_{\max}}$	-36	$\frac{6,5R_{\max}}{\lambda} + 1,65$
5	$106 \frac{\lambda}{2R_{\max}}$	-40	$\frac{7,3R_{\max}}{\lambda} + 1,84$

При разложении заданной функции в ряд Фурье-Бесселя число колец определяется максимальным радиусом решетки  $R_{\max}$  и равно числу положительных корней функции Бесселя первого рода  $J_p(x)$ , попадающих в интервал  $[0 < x \leq \frac{4\pi R_{\max}}{\lambda}]$ , где  $\lambda$ - длина волны. В отличие от разложения в ряд Шлемильха, при разложении в ряд Фурье-Бесселя кольца располагаются с переменным шагом, который с ростом числа колец приближается к постоянной величине.

Уменьшение УБЛ может быть достигнуто также регулировкой амплитудного распределения в эквивалентной апертуре при минимальном числе элементов. Следует отметить, что синтез проведен для сканирующей антенны и при сканировании не происходит изменения формы синтезированной ДН.

Важнейшей задачей, возникающей при практической реализации антенной решетки, является определение влияния погрешностей изготовления на характеристики направленности. Поэтому все расчеты характеристик направленности были проведены с учетом влияния амплитудных и фазовых ошибок, распределение которых по раскрытию приведено на рис.3.

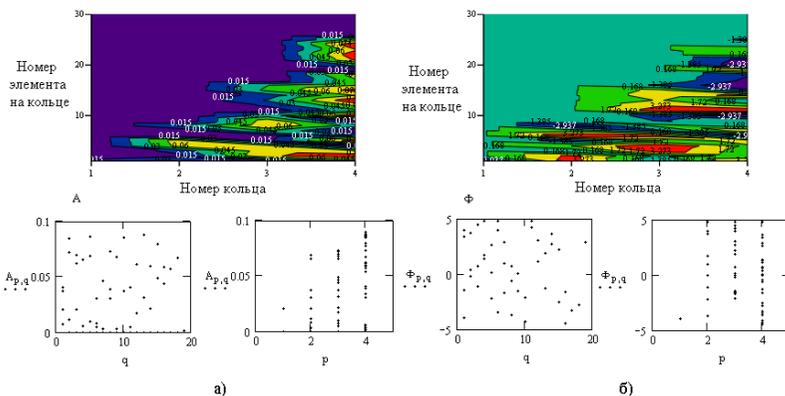


Рис.3. Зависимости амплитудной (а) и фазовой ошибок (б) от номера элемента.

Плоское расположение излучателей позволяет обеспечить двумерное сканирование, кроме перемещения луча по азимуту можно перемещать луч по углу места. Кольцевые концентрические антенные решетки представляют собой неэквидистантную структуру с одной стороны и регулярную структуру с другой стороны. При этом необходимое число излучателей для сканирования в заданном пространственном секторе согласуется с ранее приведенными соотношениями и определяется по формуле:

$$N = \left( \frac{\Delta\phi_{СК}}{2\phi_{0.7}} + 1 \right) \left( \frac{\Delta\theta_{СК}}{2\theta_{0.7}} + 1 \right) \quad (2)$$

Однако, при сканировании в двух плоскостях происходит изменение ширины ДН в вертикальной плоскости, пропорциональное изменению эквивалентной апертуры. Принцип построения ККАР с широкоугольным сканированием применим к антенным решеткам с произвольной геометрией размещения элементов, например к решеткам с прямоугольным раскрывом и гексагональной структурой размещения элементов..

Таким образом, во второй главе предложены и исследованы характеристики направленности ККАР как антенн с широкоугольным

сканированием. Найдены зависимости ширины ДН и УБЛ от относительных размеров решетки и числа элементов. Определены зависимости КНД ККАР от числа и направленности элементов.

Выявлены диапазонные и широкополосные свойства ККАР, которые существенно превышают аналогичные характеристики плоских антенн. Полоса в ККАР ограничена не частотным смещением луча, а ростом УБЛ и уменьшением КНД.

Предложены схемы возбуждения: фидерные и с помощью радиального волновода.

Приведены антенны с двумерным сканированием, которое реализуется на ККАР, а так же набором дисковых антенн.

**В третьей главе «Волноводные распределительные системы с волной типа Т»** приводятся характеристики различных типов распределительных систем с волной типа Т, определяются их частотные свойства и требования к габаритным размерам для практической реализации.

Одним перспективных направлений является построение распределительных систем на основе линий с волной типа Т. Такие возбуждающие системы могут быть выполнены в виде коаксиальных делителей, радиальных или концентрических сферических волноводов (КСв), обеспечивающих возможность возбуждения конформных решеток.

В работе разработаны распределительные системы в виде коаксиального рис.4 и радиального волноводов рис.5, который удобен для возбуждения бортовых ФАР с широкоугольным сканированием и моноимпульсным возбуждением. Рассматриваемые в диссертационной работе широкополосные многоканальные делители мощности, позволяют повысить энергетические характеристики. Особенностью, таких возбудителей является сочетание способов фидерного и оптического возбуждения, позволяющее минимизировать потери. Кроме того, все рассматриваемые

распределительные системы имеют малые продольные габариты, что немаловажно при использовании антенных систем на мобильных носителях. В работе проведено исследование таких распределительных систем и определены структуры полей.

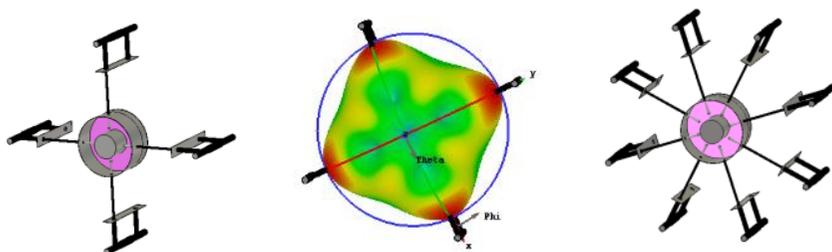


Рис.4. Коаксиальный многоканальный делитель

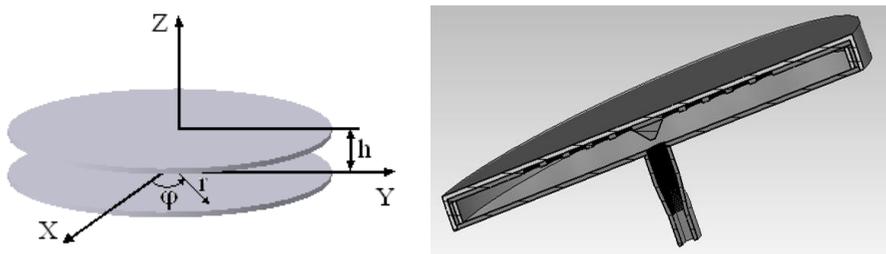


Рис.5. Распределительная система на радиальном волноводе

Такие возбуждители обладают преимуществами фидерного способа возбуждения, но в отличие от него имеют значительно меньшее затухание, так как используют практически свободное пространство. В отличие от пространственного возбуждения радиальный волновод обладает компактностью, экранированием и большим коэффициентом использования. Однако, практическое использование волноводов требует определение допусков возбуждающей системы плоской формы. В ряде случаев радиальный волновод должен иметь определенный радиус кривизны для

размещения ККАР на поверхности сферы. В связи с этим возникает вопрос о распространении волн в КСв.

Для решения этой задачи в работе подробно рассмотрено решение уравнений Максвелла в сферической системе координат для КСв.

Электромагнитное поле волн в прямом волноводе произвольного поперечного сечения обычно классифицируют по наличию или отсутствию продольных составляющих векторов электрического и магнитного полей. При определении структуры поля в КСв необходимо также разделить волны на два типа. В данном случае в качестве компоненты разделения удобно выбрать радиальную компоненту.

Задача решена методом Фурье (метод разделения переменных). В работе приведены выражения для компонент поля типа Е.

Если воспользоваться граничными условиями, то для простейшей волны типа Т должны выполняться условия:

$$E_{\theta} = 0, E_{\phi} = 0 \text{ (при } r = R_1; r = R_2 \text{)} \quad (3)$$

где  $R_1$ - радиус внутренней полусферы,  $R_2$ - радиус внешней полусферы.

Применив граничные условия (3) к полученным компонентам поля  $E_{\theta}$  и  $E_{\phi}$ , получаем уравнение, из которого определяется порядок функций Бесселя и Неймана при  $r = R_1; r = R_2$ :

$$\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{d}{dr} [c_1 j_n(kr) + c_2 n_n(kr)] = 0 \quad (4)$$

где  $j_n(kr), n_n(kr)$ - сферические функции Бесселя и Неймана.

Из граничных условий получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} c_1 j'_n(kR_1) + c_2 n'_n(kR_1) &= 0 \\ c_1 j'_n(kR_2) + c_2 n'_n(kR_2) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Из уравнений (5) можно выразить отношение констант Р:

$$P = \frac{c_1}{c_2} = -\frac{n'_n(kR_1)}{j'_n(kR_1)} = -\frac{n'_n(kR_2)}{j'_n(kR_2)} \quad (6)$$

и порядок сферических функций Бесселя и Неймана:

$$n'_n(kR_1)j'_n(kR_2) - j'_n(kR_1)n'_n(kR_2) = 0 \quad (7)$$

Уравнение (7) может быть приведено к виду:

$$T_{n_s}(kR_1, kR_2) = 0 \quad (8)$$

где  $T_{n_s}(kR_1, kR_2)$  - большой сферический тангенс. Из этого уравнения определяется последовательность корней  $n_1, n_2, n_3, \dots$ . Каждому из корней соответствует свой тип волн. Графиков сферических функций пока не имеется. Применение КСв как возбудителя ФАР требует расчета поля основной волны типа Т.

Решение трансцендентных уравнений вида (7) в математике отсутствует, но при  $(kR_1, kR_2 \gg 1)$  цилиндрические функции имеют асимптотики, которые применены для решения трансцендентных уравнений (8). При  $kR_1, kR_2 \gg 1$  функции Бесселя и Неймана в (4) можно заменить их асимптотическими приближениями. После замены цилиндрических функций асимптотическими приближениями граничные условия примут вид:

$$\frac{d}{dr} \left[ c_1 \sin \left( kr - \frac{\pi n}{2} \right) - c_2 \cos \left( kr - \frac{\pi n}{2} \right) \right] = 0 \quad (9)$$

Из (9) получаем систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} c_1 \cos \left( kR_1 - \frac{n\pi}{2} \right) + c_2 \sin \left( kR_1 - \frac{n\pi}{2} \right) &= 0 \\ c_1 \cos \left( kR_2 - \frac{n\pi}{2} \right) + c_2 \sin \left( kR_2 - \frac{n\pi}{2} \right) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

(10)

Однородная система уравнений (10) имеет нетривиальное решение, если ее определитель равен нулю:

$$c_1 c_2 \cos\left(kR_1 - \frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(kR_2 - \frac{n\pi}{2}\right) + c_1 c_2 \sin\left(kR_1 - \frac{n\pi}{2}\right) \cos\left(kR_2 - \frac{n\pi}{2}\right) = 0 \quad (11)$$

Из (11) можно определить условие, при котором система уравнений (12) имеет нетривиальное решение:

$$(R_2 - R_1) = \frac{m\lambda}{2} \quad (12)$$

где  $m=0,1,2,3,\dots$ . Каждому из полученных значений  $m$  соответствует волна типа Е. Из решения системы уравнений (10) определяется порядок  $n$ :

$$n \approx \frac{k(R_1 + R_2)}{\pi} \quad (13)$$

При  $kR_1, kR_2 \gg 1$ , с учетом асимптотик, выражения для компонент поля простейшей волны принимают вид:

$$E_r = -\frac{k^2 \sqrt{2} A_2 c_2}{\sqrt{k(R_1 + R_2) \sin(\theta)}} e^{-j \frac{k(R_1 + R_2)}{\pi} \theta} \quad (14)$$

$$H_\phi = \frac{k(R_1 + R_2) \sqrt{2} A_2 c_2 (\cos(\theta) - 1)}{\sqrt{k(R_1 + R_2) \sin(\theta)}} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} e^{-j \frac{k(R_1 + R_2)}{\pi} \left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)} \quad (15)$$

На рис.6 и 7 показаны зависимости амплитуды и фазы вектора напряженности электрического поля простейшей волны от координаты  $k\theta$ .

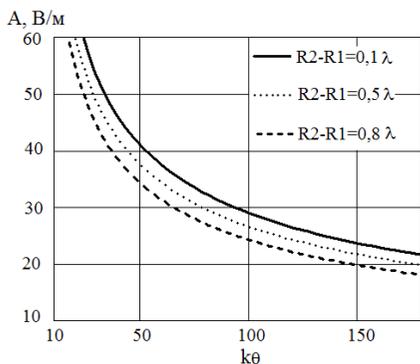


Рис.6. Зависимости амплитуды вектора напряженности электрического поля простейшей волны от координаты  $k\theta$  при больших значениях  $k\theta$ .

На рис.8 и 9 показаны зависимости амплитуды и фазы вектора напряженности магнитного поля простейшей волны от координаты  $k\theta$ .

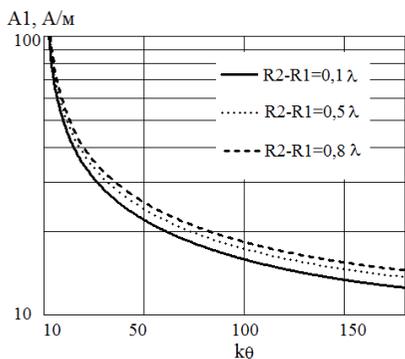


Рис.8. Зависимости амплитуды фазы вектора напряженности магнитного поля простейшей волны от координаты  $k\theta$  при больших значениях  $k\theta$ .

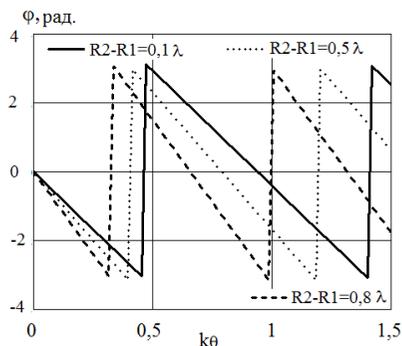


Рис.7. Зависимости фазы вектора напряженности электрического поля простейшей волны от координаты  $k\theta$

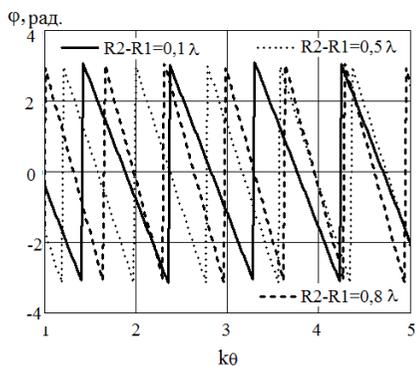


Рис.9. Зависимости фазы вектора напряженности электрического поля простейшей волны от координаты  $k\theta$  при больших значениях  $k\theta$ .

Рассматриваемые в диссертационной работе широкополосные многоканальные делители мощности были внедрены в производство при модернизации телекоммуникационной системы с широким сектором обзора, устанавливаемой на Останкинской башне.

Широкополосные распределительные системы также использовались при построении антенного модуля, вторичного обзорного радиолокатора. На рис.10-11 показаны фотографии антенной системы модуля вторичного радиолокатора на стадии сборки и изменений. На рис.12-14 приведены расчетные и экспериментальные результаты исследования характеристик направленности двухдиапазонной антенной решетки.

Радиальный волновод был внедрен в разработку антенной решетки мобильной телекоммуникационной системы с широкоугольным механическим сканированием. Экспериментальные и расчетные характеристики, а также фотографии антенны на измерительном стенде приведены на рис.15-22.



Рис.10. Антенная система модуля вторичного радиолокатора, стадия сборки.



Рис.11. Испытательный стенд с элементом модуля вторичного радиолокатора

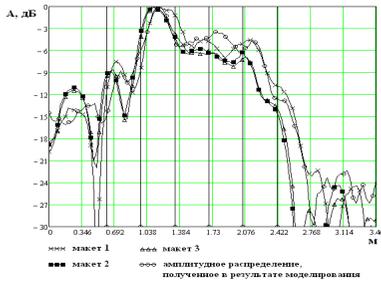


Рис.12. Косекансная диаграмма антенной решетки

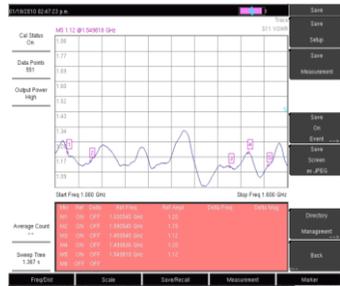


Рис.13. Зависимость КСВ от частоты, полученная экспериментально.

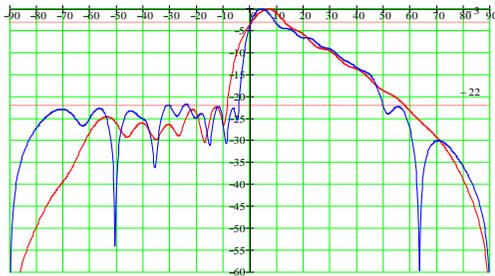


Рис.14. ДН линейного излучателя с косекансной ДН на средних частотах 1-ого и 2-ого диапазонов



Рис.15. Фотография антенной решетки



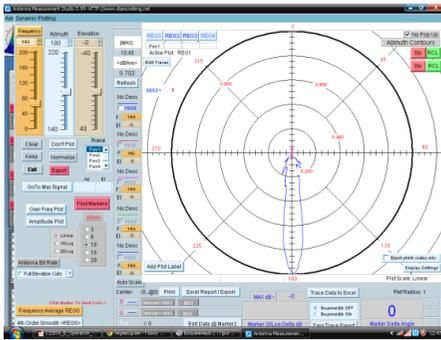


Рис.17. Диаграмма направленности кольцевой концентрической антенной решетки, полученная экспериментально

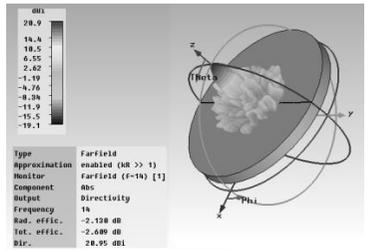


Рис.18. Пространственная ДН антенной решетки на радиальном волноводе на частоте 14 ГГц.

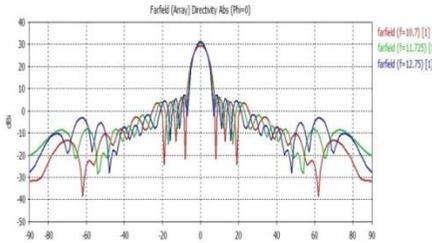


Рис.19. ДН антенной решетки, работающей на приём, в горизонтальной плоскости

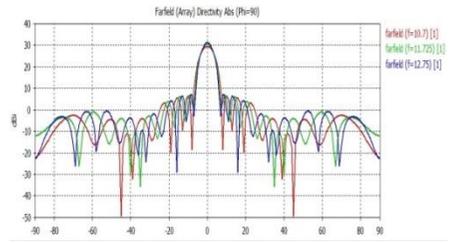


Рис.20. ДН антенной решетки, работающей на приём, в вертикальной плоскости.

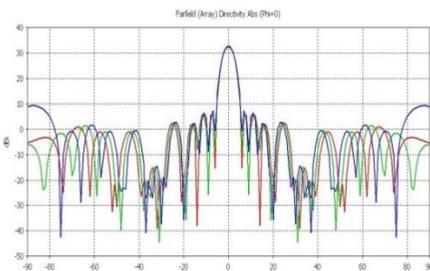


Рис.21. ДН антенной решетки, работающей на передачу, в горизонтальной плоскости

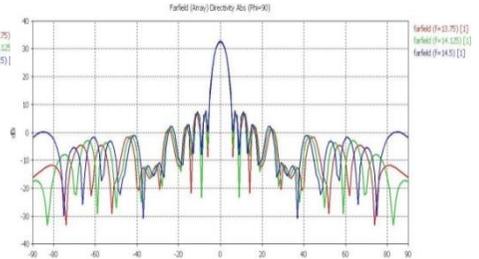


Рис.22. ДН антенной решетки, работающей на передачу, в вертикальной плоскости.

Таким образом, в третьей главе развита теория и приведены характеристики распределительных систем с волной типа Т в виде коаксиального, радиального и концентрического сферического волноводов.

Методом Фурье решена электродинамическая задача для концентрического сферического волновода, представляющего равномерно изогнутый радиальный волновод большого радиуса. Определена структура поля волны типа Е. Найдены условия существования волн высших типов в концентрическом сферическом волноводе и простейшей волны типа Т.

Определено распределение поля в волноводе для простейшей волны типа Т, приведены результаты строгого и приближенного расчета зависимостей амплитуд и фаз полей от пространственных координат при различном значении расстояния между проводящими полусферами.

Показана возможность практического применения распределительных систем с волной типа Т для построения ФАР и АФАР с широкоугольным сканированием. Выполнены опытные образцы и проведено экспериментальное исследование антенных решеток, возбуждаемых радиальным волноводом и многоканальным коаксиальным делителем.

**В четвертой главе «Бортовые антенные решетки для радиолокационных и телекоммуникационных систем, выполненные по технологии гальванопластики»**

Перспективным направлением для построения антенн с широкоугольным обзором является применение технологии гальванопластики. С помощью этой технологии была выполнена телекоммуникационная антенна совместно с корейской фирмой LG. Её модель и фотография приведены рис.23-26. Использование технологии гальванопластики позволяет реализовывать альтернативные варианты построения бортовых антенных решеток с меньшими потерями в распределительной системе. Реализация антенны на стандартных элементах

волноводного тракта с использованием фланцевых соединений и крепежа не удовлетворяет требованиям к массогабаритным характеристикам бортовых антенн. Поэтому этот вариант подходит только при изготовлении антенной системы методами гальванопластики. На рис.27-28 приведены результаты электродинамического моделирования рупорной антенной решетки для вертолетной РЛС X-диапазона.

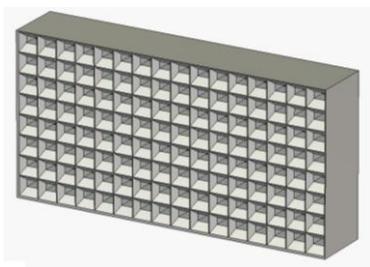


Рис.23. Модель антенного полотна и приемной антенной решетки спутникового телевидения, работающей в диапазоне частот 10,70-12,75 ГГц



Рис.24. Фотография антенного полотна системы приемной антенной решетки спутникового телевидения, выполненной по технологии гальванопластики

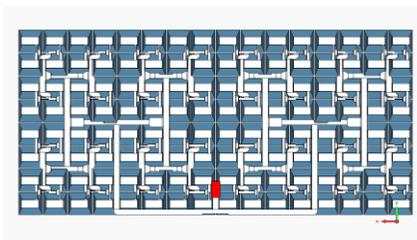


Рис.25. Модель распределительной системы приемной антенной решетки спутникового телевидения, работающей в диапазоне частот 10,70-12,75 ГГц



Рис.26. Фотография распределительной системы приемной антенной решетки спутникового телевидения, выполненной по технологии гальванопластики

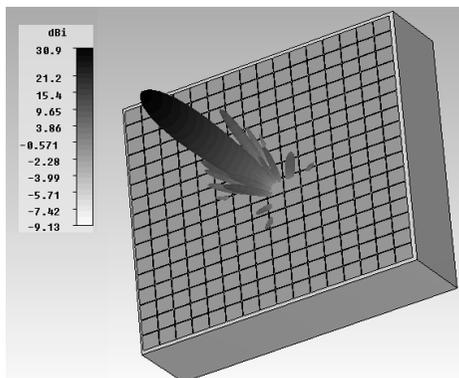


Рис.27. Пространственная ДН, построенная на частоте  $f=9,3$  ГГц

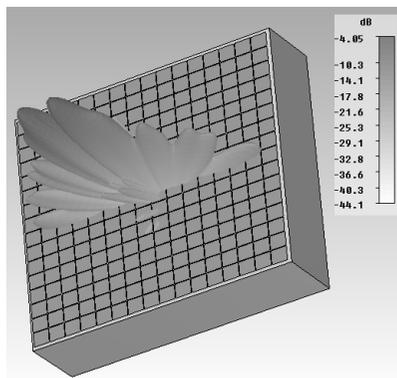


Рис.28. Пространственная разностная ДН рупорной антенной решетки

С использованием той же технологии выполнена разработка МНИРТИ – антенная решетка с широкоугольным механическим сканированием рис.29-30.



Рис.29. Модель низкопрофильного антенного модуля спутниковой связи сантиметрового диапазона волн с широкоугольным механическим сканированием.

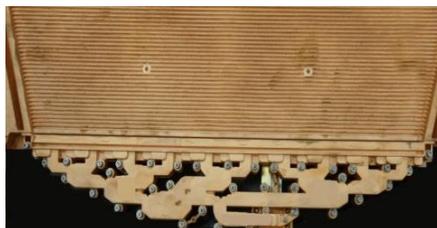


Рис.30. Модель низкопрофильного антенного модуля спутниковой связи сантиметрового диапазона волн с широкоугольным механическим сканированием

Таким образом, в четвертой главе представлены варианты построения антенных решеток радиолокационных и телекоммуникационных

систем. Определены характеристики направленности и частотные характеристики.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В диссертационной работе предложена и разработана теория антенных решеток с расширенным телесным сектором сканирования и рабочей полосой частот.

Выявлена возможность согласования излучателей в ФАР при сканировании в пределах сектора  $360^\circ$  в азимутальной плоскости в широкой полосе частот, а также устранения дифракционных максимумов за счет схемы построения антенного полотна.

Развит класс волноводных возбуждителей, образованных конформными поверхностями для бортовых антенных систем с волной типа Т, обеспечивающих отсутствие дисперсии, минимальные потери и массогабаритные характеристики при моноимпульсной работе и позволяющих преодолеть основные трудности построения конформных АФАР.

Разработаны компьютерные модели больших антенных систем позволяющие оценить характеристики направленности с учетом погрешностей изготовления элементов антенного полотна и возбуждающего устройства.

Предложены варианты построения современных ФАР, АФАР и ЦАФАР и соответствующая элементная база с целью существенного уменьшения числа излучателей в разы, обеспечивающая широкоугольность сканирования, широкополосность и уменьшение УБЛ.

Рассмотрены широкополосные и двухдиапазонные многослойные излучатели.

Разработаны методы, позволяющие уменьшить УБЛ в антенных решетках с широкоугольным сканированием при допустимом изменении характеристик направленности в секторе сканирования.

Предложены схемы построения бортовых конформных АР для перспективных РЭК. Проведено исследование влияния амплитудных и фазовых ошибок на характеристики направленности антенных решеток с пространственной структурой размещения элементов.

Результаты диссертационной работы внедрены в разработки бортовой РЛС «Сокол», многофункциональной вертолетной РЛС и вертолетной РЛС морского базирования «Минога», низкопрофильного антенного модуля спутниковой связи «ВИГА», антенной телекоммуникационной системы «Ожерелье» и др., в целом внедрены на 10 предприятиях, опубликованы в 100 статьях, 2 монографиях, 6 патентах, доложены на 18 конференциях и внедрены в учебный процесс.

#### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1\*. Вапнэ Т.М. Антенны с электрическим сканированием луча для многофункциональных РЛС (зарубежные разработки). Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. М.: ЦНИИ «Электроника», 1982. № 5. 47 с.
- 2\*. Введенский А.В., Захаров Е.В., Скородумов А.И., Харланов Ю.Я. Характеристики антенн со сферическими диэлектрическими линзами // Радиотехника и электроника. 1991. Т.36. № 4. С.680-688.
- 3\*. РЛС SDR с купольной антенной// Радиоэлектроника за рубежом, №2, 1980, с.17.
- 4\*. Увеличение сектора сканирования антенной решетки с помощью купольной линзы// Бубнов Г.Г., Гольберг Б.Х., Коростышевский Е.Н. и др.; Сб. научн.-метод. статей по прикладной электродинамике. -М.: Высшая школа, Вып. 6, 1983, с. 162-188.
- 5\*. Антенна в виде куполообразной линзы с широкоугольной фазированной решеткой с переключением режимов приема-передачи// Патент США, №4491845, H01Q19/06,3/46,1/28, 1985.
- 6\*. Медведев Ю.В., Харланов Ю.Я. и др. Купольная линзовая антенна// Патент RU №2201021 C2,04.09.2000, Кл. H01Q15/08.

- 7\*. Литун В.И., Митрохин В.Л., Федоров А.К. Распределение фазовых задержек в купольно-линзовой антенне со смещенной первичной решеткой. Труды 22-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, сентябрь 2012 г.
- 8\*. Пономарев Л.И., Степаненко В.И. Результаты анализа и оптимизации двухчастотной волноводной ФАР// Антенны, вып.34, 1986, с.68-84.
- 9\*. Bond K., Shelley M.W. Dual frequency antenna integration using invisible grating structures// IEE Proc., v.133, №2, 1986, p.137-142.
- Pazin, L., Leviatan, Y.* Effect of amplitude tapering and frequency dependent phase errors on radiation characteristics of radial waveguide fed non-resonant array antenna// IEEE Trans Antennas Propagat, vol. 53, №12, 2005.
- 10\*. Наземная РЛС «САММИТ» миллиметрового диапазона волн для наблюдения малоразмерных объектов в космосе / Ботавин В.П. [и др.] // Вестник Ноу-Хай. 1993. № 3. С. 10-12.
- 11\*. Радиоэлектронные системы коротковолновой части миллиметрового диапазона радиоволн / Н. А. Бей [и др.] // Под ред. Г. П. Слукина. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 75 с.
- 12\*. Быстродействующие ферритовые фазовращатели мм диапазона волн / Н.П. Милевский [и др.]. // Ферритовые СВЧ приборы и материалы. Серия: Электроника СВЧ. Тезисы докладов региональной конф. в 3-х т. Т.3. Москва. 1983. С. 59-60.
- 13\*. Millimeter-wave phase shifting device: pat. 4467292 US / James S. Ajoka, Filed. 30.09.1982; patented 21.08.1984. // google.com/patents: база патентов. Режим доступа: <http://www.google.com/patents/US4467292> (дата обращения 28.09.2009).
- 14\*. Модуль проходной фазированной антенной решетки: пат. 2461930. Россия / Ю.С. Русов [и др.]. Заявл. 30.12.2010; Опубл. 20.09.2012. Бюл. №26 // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интел. собств.
- 15\*. Бей Н.А., Комягин Р.В., Усачев В.А. Фазированные антенные решетки миллиметрового диапазона с высокой степенью интеграции // Вестник МГТУ. Серия «Приборостроение». М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. №3. С. 63-68.
- 16\*. Разработка элементов проходной и отражательной фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона волн с ферритовыми фазовращателями // Комиссарова Е.В. [и др.] / Вестник МГТУ им. Н.Э.

Баумана. Сер. Приборостроение. 2009. Спец. вып. Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов. С. 105-117.

17\* Яковлев А. С. Двухчастотные моноимпульсные антенные решетки. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Москва, 2009, 126 с.

18\* Пономарев Л.И., Степаненко В.И. Сканирующие многочастотные совмещенные антенные решетки. -М.: Изд-во Радиотехника, 2009.

19\* Pazin, L., Leviatan, Y. Uniform amplitude excitation of radiating elements in array antenna pin-fed from radial waveguide// IEE Proc. – Microw. Antennas Propag., Vol. 148, No. 6, Dec. 2001.

20\* D.L. Collinson Passive self-switching dual band array antenna. Патент США № 7215284 В2 опублик. 16.11.2006.

21\* Д. И. Воскресенский, Л. И. Пономарев, В. С. Филиппов. Выпуклые сканирующие антенны.-М.: Сов. радио, 1978.

22\* Abdul-Aziz A. Abdul-Aziz, Hanna A. Kamala. Sector synthesis of antenna array using genetic algorithm. // Journal of theoretical and applied information technology, 2005.- pp. 160-169.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Voskresenskii D. I., Ovchinnikova E. V., Proc. of the XXVIII Moscow International Conference on Antenna theory and technology Russia, Moscow, September, 1998.
2. Д. И. Воскресенский, Е. В. Овчинникова. Широкополосные антенны с широкоугольным неискаженным сканированием. – Антенны, 1999, №1 (42).
3. Д. И. Воскресенский, Е. В. Овчинникова. Характеристики сканирующих антенн сверхкоротких импульсов, основанные на спектральном анализе. – Антенны, 2000, №3(46), с.17-26.
4. Д.И. Воскресенский, Е. В. Овчинникова. Широкополосные фазированные антенные решетки. Материалы всероссийской конференции «Излучение и рассеяние ЭМВ», Таганрог, июнь 18-23. 2001 г.
5. Д.И. Воскресенский, Е. В. Овчинникова. Дискровая антенна. Журнал Радиотехника, №3,2001.
6. Е. В. Овчинникова. Концентрический сферический волновод. Труды молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии», Москва, 2 марта 2003 г.
7. Д.И. Воскресенский, Е. В. Овчинникова. Синтез кольцевых концентрических антенных решеток. Антенны, 2003, Вып. 03-04 (70-71).

8. Voskresenskiy D. I., Ovchinnikova E. V. MIKON 15<sup>th</sup> International Conference of Microwaves, Radar and Wireless Communications, Poland, Warszawa, May 17<sup>th</sup> -18<sup>th</sup>, 2004.
9. Воскресенский Д.И., Гуськов Ю.Н., Емельченков Ф.И., Овчинникова Е.В. Многофункциональная бортовая активная фазированная антенная решетка для РЛС. Труды всероссийской научно-технической конференции «Информационные и телекоммуникационные технологии», г. Сочи, сентябрь 19-26. 2004 г.
10. Воскресенский Д.И., Гуськов Ю.Н., Емельченков Ф.И., Овчинникова Е.В. Многофункциональные полотна активных антенных решеток. Труды 18 – ой научно-технической конференции в НИИП, г.Жуковский, февраль. 2004 г.
11. Д.И. Воскресенский, Е. В. Овчинникова. Моноимпульсные характеристики фазированных антенных решеток с широкоугольным сканированием. Авионика 2002-2004. Сборник статей/ Под ред. А.И. Канащенкова.-М: Радиотехника, 2005.-560с.
12. Д.И. Воскресенский, Е. В. Овчинникова. Синтез кольцевых концентрических антенных решеток.Авионика 2002-2004. Сборник статей/ Под ред. А.И. Канащенкова.-М: Радиотехника, 2005.-560с.
13. Д.И. Воскресенский, Развитие бортовых антенных систем. Материалы международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн»-ИРЭМВ – 2005.Таганрог. Изд-во ТРТУ, 2005.-440с.
14. Д.И. Воскресенский, Ю.В. Котов, Е. В. Овчинникова. Тенденции развития широкополосных фазированных антенных решеток. Журнал Антенны, 2005, №11 (102).
15. Д.И. Воскресенский, Д.И., Гуськов Ю.Н., Ю.В. Котов, Е. В. Овчинникова. Антенные решетки. Состояние. Перспективы развития. Журнал Фазотрон, 2006,№1-2(4).
16. Д.И. Воскресенский, Д.И., Гуськов Ю.Н., Ю.В. Котов, Ю.Я. Харланов, Е. В. Овчинникова. Многофункциональные полотна антенных решеток. Журнал Антенны, 2006, №9 (112)
17. Д.И. Воскресенский, Е. В. Овчинникова, Зо Мое Аунг. Широкополосные мостовые устройства на основе микрополосковой и щелевой полосковых линий. Журнал «Антенны», № 1, 2008 г.
18. Д.И. Воскресенский, Е. В. Овчинникова, Тай За У. Антенны для базовых станций сотовой связи стандарта 3G. Журнал «Антенны», № 6, 2008 г.

19. Е. В. Овчинникова, Тай За У. Широкополосные антенны телекоммуникационных систем с постоянной зоной покрытия. Журнал «Информационно-измерительные системы», №10, 2009 г.
20. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Соколов А.А. Экспериментальное исследование двухдиапазонной антенной решетки с косекансной диаграммой направленности. Труды 20-й международной конференции «СВЧ –техника и телекоммуникационные технологии », Севастополь, сентябрь 8-14, 2010 г.
21. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г. Многофункциональная бортовая антенная решётка интегрированного радиоэлектронного комплекса. Труды 8-й Молодёжной научно-технической конференции "Радиолокация и связь – перспективные технологии", 21-22 октября 2011г.
22. Е. В. Овчинникова, С.Г. Кондратьева. Математическое моделирование излучателя, размещаемого на проводящей конической поверхности. Журнал «Антенны», №3, 2011 г.
23. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А. Бортовые активные антенные решетки с цифровой обработкой сигнала. Перспективы развития. Труды 21-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, сентябрь 12-16, 2011 г.
24. Е. В. Овчинникова, А.А. Соколов. Двухдиапазонная антенная решетка с косекансной диаграммой направленности. Журнал «Антенны», №4, 2011г.
25. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г. Многофункциональная бортовая антенная решётка интегрированного радиоэлектронного комплекса. Труды 8-й Молодёжной научно-технической конференции "Радиолокация и связь – перспективные технологии", 21-22 октября 2011г.
26. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А., Гиголо А.И. Матричный метод цифрового диаграммообразования. Труды 8-й международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2012», Севастополь, 16 — 22 апреля 2012 г.
27. Е. В. Овчинникова, А.М. Рыбаков. Печатная антенная решетка для бортовой РЛС. Электронный журнал «Труды МАИ», 2012г.

28. Д.И. Воскресенский, Е. В. Овчинникова. Бортовые конформные активные фазированные антенные решетки. Состояние и проблемы, пути развития. Журнал Фазотрон, 2012, №1(17)
29. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А. Цифровое формирование ДН матричным методом преобразования Фурье. Труды 22-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, сентябрь 2012 г.
30. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А., Гиголо А.И. Особенности цифрового диаграммообразования в современных АФАР на СВЧ. Тезисы докладов 11-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012», Москва, МАИ, 13-14 ноября 2012г.
31. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А., Гиголо А.И. Многофункциональная бортовая АФАР с цифровым диаграммообразованием. Тезисы докладов 11-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012», Москва, МАИ, 13-14 ноября 2012г.
32. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А. Активная фазированная антенная решетка. Патент на полезную модель №119530 от 20.08.12.
33. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А. Бортовые цифровые антенные решетки и их элементы. Коллективная монография. Под ред. Д.И.Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2013.-208с.
34. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г. Минимизация УБЛ в пространственных антенных решетках с гексагональной структурой размещения излучателей. Труды 23-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, сентябрь 2013 г.
35. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А., Гиголо А.И. Активная фазированная антенная решетка с широкоугольным сканированием. Патент на полезную модель №125397 от 27.02.13.
36. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А. Активная фазированная антенная решетка с широкоугольным сканированием. Патент на полезную модель №126200 от 20.03.13
37. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А. Антенная система бортового интегрированного радиоэлектронного

- комплекса для летательных аппаратов нового поколения. Журнал «Антенны», №9, 2013 г.
38. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А. Минимизация уровня боковых лепестков в антенных решетках с пространственным размещением элементов. Журнал «Антенны», №9, 2013 г.
  39. Овчинникова Е.В., Буй Као Нинь, С.Г. Кондратьева, Суан Кхоа Буй. Двухдиапазонные печатные антенны сотовых телефонов. Сборник тезисов докладов 13-й международной конференции «Авиация и космонавтика - 2014». Москва, 17-21 ноября 2014, С. 18-20.
  40. Ovchinnikova E.V., Kondratieva S.G., Zykov L.S., Shmachilin P.A. The On-Board Wide Angle Scanning Antenna Array. IEEE Xplore Antennas and Propagation (Eu-CAP), 2014 8th European Conference on.
  41. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г. Антенная решетка мобильной системы спутниковой связи. Труды 2-й Международной конференции "Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования земли" ОАО НИИЭМ, 15 мая 2014 г.
  42. Овчинникова Е.В., Васильев О.В., Кондратьева С.Г. Рыбаков А.М. Бортовые антенные системы спутниковой связи (обзор). Журнал «Антенны», №2, 2014 г.
  43. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В. Буй Као Нинь. Широкополосные антенны сотовых телефонов. Журнал «Антенны», №2, 2014 г.
  44. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г. Минимизация УБЛ в антенных решетках мобильных систем. Труды 24-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, сентябрь 2014 г.
  45. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г. Способ снижения уровня бокового излучения антенны. Патент на полезную модель № 2538291 от 27.12.14.
  46. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Буй Као Нинь. Широкополосная микрополосковая антенна. Патент на полезную модель № 157955 от 24.11.15.
  47. Овчинникова Е.В., Васильев О.В., Кондратьева С.Г. Кольцевая концентрическая антенная решетка. Патент на полезную модель №154307 от 23.06.15.
  48. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Буй Као Нинь. Двухдиапазонные микрополосковые антенны сотовой связи. Журнал «Антенны», №1, 2015 г.

49. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Буй Као Нинь, Фам Ван Винь. Методика приближенного расчета характеристик направленности широкополосной микрополосковой антенны сотовой связи. Журнал «Антенны», №6, 2015 г.
50. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Буй Суан Кхоа, Буй Као Нинь, Фам Ван Винь. Трёхдиапазонные микрополосковые антенны сотовой связи. Журнал «Антенны», №7, 2015 г.
51. Овчинникова Е. В., Васильев О.В., Кулястов М.М. Кольцевая концентрическая антенная решетка из волноводных излучателей. Журнал «Антенны», №8, 2015 г.
52. Е.В. Овчинникова. Бортовые ФАР СВЧ диапазона. Монография. Под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: МАИ, 2016.-163с.
53. Овчинникова Е.В., Васильев О.А., Фам Ван Винь, Ниголо А.И., Лисицкий В.В. Антенные решетки систем спутникового телевидения (обзор). Журнал «Антенны» № 4, 2016 г. С. 22-33.
54. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А., Гаджиев Э.В. Исследование характеристик направленности бортовых антенн космических аппаратов на ранней стадии разработки. Журнал «Электросвязь» №7, 2016 г. С. 56-59.
55. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А., Гаджиев Э.В. Методика приближенного расчета характеристик направленности бортовых микрополосковых антенн малых космических аппаратов. Журнал «Успехи современной радиоэлектроники» №8, 2016 г. С. 15-27.

#### **Научно-технические отчеты по материалам диссертации**

56. Котов Ю.В., Воскресенский Д.И., Харланов Ю.Я., Овчинникова Е.В., Разработка методов проектирования интегрированных бортовых радиолокационных систем.- МАИ-ОАО <<Корпорация <<Фазотрон-НИИР>>, отчет по теме № 22110-04100, этап 3, 2003.
57. Котов Ю.В., Воскресенский Д.И., Харланов Ю.Я., Овчинникова Е.В., Разработка перспективных АФАР, - МАИ-ОАО <<Корпорация <<Фазотрон-НИИР>>, отчет по теме № 26610-04100, 2004.