

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.396.67

Романович
Александр Геннадьевич

**СИНТЕЗ КОЛЬЦЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК
ЗАДАННОЙ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ ДИАГРАММЫ
НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.07 -- антенны, СВЧ устройства и их технологии

Минск 2011

Работа выполнена в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь».

Научный руководитель

Калинин Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Кудин Виктор Пантелеевич, доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе – заместитель главного конструктора Республиканского научно-исследовательского унитарного предприятия «Луч»;

Малый Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент факультета радиофизики и компьютерных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет».

Оппонирующая организация

ГУ «НИИ Вооруженных Сил Республики Беларусь».

Защита состоится « 16 » февраля 2012 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, телефон: 293-89-89, e-mail: dissovnet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлек-

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Республике Беларусь, как и во всем мире, в различных радиотехнических системах активно используются конформные антенные решетки. Одним из примеров этому может служить разработанная в нашей стране маловысотная радиолокационная станция «Роса-РБ» с кольцевой фазированной антенной решеткой в ее составе.

Кольцевые антенные решетки (КАР) по сравнению с линейными решетками обладают целым рядом полезных свойств. Среди них можно выделить возможность неискаженного электрического сканирования лучом диаграммы направленности (ДН) в круговом секторе пространства, расширение рабочей полосы частот, снижение уровня бокового излучения (УБИ), совмещение излучающего полотна антенны с поверхностью различных объектов и др. Вопросы теоретического и практического исследования КАР достаточно полно описаны в литературе. Однако практика построения таких антенн по заданным требованиям, т.е. синтез КАР, в силу различного рода причин требует дополнительных исследований и разработки специальных методов их решения.

Диссертация посвящена разработке метода синтеза КАР по заданным требованиям к ДН с учетом направленных свойств ее излучающих элементов. Под синтезом понимается расчет такого амплитудно-фазового распределения (АФР) токов в ее раскрыве, которое обеспечивает формирование ДН с заданными свойствами или близкой к ней по некоторому критерию. При этом вопрос построения конкретной конструкции, воспроизводящей требуемое АФР, составляет предмет отдельных исследований и в работе не рассматривается.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

1. Работа выполнена в соответствии с перечнем направлений исследований в Вооруженных Силах Республики Беларусь для определения тематики диссертационных исследований адъюнктов и докторантов на 2009–2010 годы, определенным командованием ВВС и войск ПВО, согласно пункту № 282 «Разработка численной модели цилиндрической фазированной антенной решетки».

2. Результаты диссертационной работы использовались при выполнении ОКР (шифр «Роса-РБ» № 25/62013 от 24.05.2006 г.) в ОАО «КБ Радар».

3. Материалы диссертации использованы в НИР «Синтез кольцевой антенной решетки и анализ влияния дестабилизирующих факторов на ее направленные свойства» (шифр «Кольцо РБ 2011» № 1336/11), утвержденной приказом начальника УО «Военная академия Республики Беларусь» № 222/02-11 от 18.02.2011 г.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности решения задачи синтеза кольцевых антенных решеток при формировании диаграмм направленности заданной формы с использованием дополнительной информации о направленных свойствах излучающих элементов. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие *основные задачи*:

1. Разработать метод синтеза кольцевых антенных решеток, обеспечивающий учет направленных свойств излучающих элементов.
2. Разработать методику численного расчета амплитудно-фазового распределения в пределах заданного активного сектора кольцевой антенной решетки, которая учитывает направленные свойства элементов и обеспечивает формирование требуемой диаграммы направленности.
3. Разработать экспериментальную модель цифровой кольцевой антенной решетки и методику измерения ее характеристики направленности. Провести экспериментальные исследования модели цифровой кольцевой антенной решетки.

Объект исследования – кольцевые антенные решетки.

Предмет исследования – методы решения задачи синтеза кольцевых антенных решеток, учитывающие направленные свойства излучающих элементов.

Выбор объекта и предмета исследования обусловлен актуальностью разработки радиосистем с конформными антенными решетками, обладающими рядом полезных свойств, отсутствующих у линейных и плоских излучающих систем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод синтеза кольцевых антенных решеток, отличающийся возможностью учета направленных свойств элементов в составе излучающей системы и позволяющий за счет этого повысить эффективность решения задачи синтеза таких антенн по критерию среднеквадратической близости синтезированной и требуемой диаграмм в 2 раза по сравнению с синтезом систем изотропных излучателей.
2. Методика численного расчета амплитудно-фазового распределения в пределах заданного активного сектора кольцевой антенной решетки, отличающаяся использованием метода наименьших квадратов и регуляризации решения задачи синтеза, позволяющая проводить учет направленных свойств излучающих элементов и обеспечивающая относительную среднеквадратическую ошибку отклонения синтезируемой диаграммы направленности от требуемой не более 5 %.
3. Методика измерения характеристики направленности кольцевых антенных решеток с цифровым диаграммообразованием, отличающаяся применением в составе решетки только одного активного элемента в окружении пассивных, позволяющая заменить обработку одномоментно принятых сигналов всех элементов решетки на обработку последовательности сигналов единственного активного элемента при последовательном его

расположении на месте очередного пассивного элемента и обеспечивающая на этапе проектирования таких антенн идентичность приемопередающих модулей и снижение затрат.

Личный вклад соискателя

Основные результаты диссертации, полученные автором самостоятельно: методика численного расчета амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве кольцевой антенной решетки в пределах заданного активного сектора; аналитическое решение задачи синтеза кольцевого излучателя; экспериментальная модель и методика испытания кольцевой решетки.

Совместно с научным руководителем получены: метод синтеза кольцевых антенных решеток заданных конструкций, учитывающий направленные свойства излучающих элементов; рекомендации по разработке кольцевых антенных решеток, сформулированные на основании численных, статистических, и экспериментальных исследований.

Апробация результатов диссертации

Теоретические и практические результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 44 – 47-й научно-технических конференциях аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 2008–2011 гг.); X военно-научной конференции ВАРБ (Минск, 2009 г.); 3-й Международной студенческой научно-технической конференции «Новые направления приборостроения» (Минск, БНТУ, 2010 г.); X Международной межвузовской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (Гомель, ГГТУ, 2010 г.); 11-м Белорусско-Литовском семинаре «Измерительные и информационные системы СВЧ диапазона» (Минск, Институт физики НАНБ, 2011 г.); Международной военно-научной конференции ВАРБ «Актуальные аспекты инновационного развития вооруженных сил с учетом характера войн будущего» (Минск, 2011 г.); Республиканском научно-техническом семинаре ВАРБ «Актуальные вопросы современной теории и техники антенн» (Минск, 2011 г.); 5-й Международной научной конференции по военно-техническим проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (Минск, 2011 г.).

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе: 7 статей, общим объемом 2,4 авторских листа, в научных рецензируемых журналах и сборниках, 3 публикации в сборниках тезисов докладов международных научно-технических конференций, 2 публикации в сборниках тезисов докладов военно-научных конференций, 1 отчет о НИР.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений, введения, общей характеристики работы, основной части из четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе проведен аналитический обзор научной литературы по теме диссертационного исследования, дана классификация задач синтеза антенн и дана краткая характеристика основных методов их решения. На основе обобщения результатов определены вопросы, требующие дальнейшего разрешения. Во второй главе изложена суть разработанного метода синтеза кольцевой антенной решетки, учитывающего направленные свойства элементов в составе излучающей системы. Получены численное и аналитическое решения задачи синтеза таких антенн, а также предложена методика численного синтеза. Продемонстрированы примеры решения задач синтеза кольцевых решеток при формировании диаграмм направленности специальной формы. Третья глава посвящена исследованию влияния различных дестабилизирующих факторов на характеристики и параметры синтезированных чебышевских кольцевых антенных решеток. Приведены статистические характеристики искажений диаграммы направленности при различных типах неидентичностей излучающих модулей. В четвертой главе рассмотрены особенности применения разработанного в главе 2 метода синтеза антенн для решения задач синтеза цифровых антенных решеток. Предложена экспериментальная модель цифровой кольцевой антенной решетки и методика измерения ее характеристик направленности. Приведены результаты экспериментальных исследований 21-элементной кольцевой антенной решетки с цифровым формированием диаграммы направленности.

Полный объем диссертационной работы составляет 144 страницы, из которых 80 страниц текста, 64 рисунка на 35 страницах, 10 таблиц на 3 страницах, 5 приложений на 14 страницах, список использованных источников из 132 наименований на 10 страницах, список публикаций автора из 13 наименований на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показана необходимость разработки специальных методов синтеза кольцевых антенных решеток, определены основные направления исследований.

В первой главе диссертации приведен очерк значимых этапов развития научных представлений в области теории синтеза излучающих систем. Дана краткая характеристика основных методов синтеза антенн. Проведен обзор и анализ научных публикаций и материалов, посвященных различным проблемам синтеза. Дана классификация основных задач теории синтеза антенн и вы-

явлен круг вопросов, требующих дополнительных исследований. Диссертационные исследования посвящены одному из наиболее актуальных и перспективных направлений синтеза в настоящее время – синтезу криволинейных, в частности кольцевых антенных решеток (КАР). В качестве объекта исследований выбраны КАР, а проведенный анализ научно-технической информации позволил сформулировать цель и задачи диссертационных исследований.

Во второй главе диссертации разработан метод синтеза КАР, учитывающий направленные свойства элементов в составе излучающей системы. Упрощенный вид конструкции кольцевых антенных решеток показан на рисунке 1. Как видно из рисунка, КАР представляет собой антенную систему, составленную из N одинаковых излучателей, равномерно распределенных по окружности некоторого радиуса R . Как правило, на практике излучающие элементы КАР расположены над проводящим цилиндрическим экраном. В этом случае при формировании ДН в требуемом направлении из-за экранирующего действия проводящей поверхности необходимо использовать лишь часть элементов (активный сектор $2\psi_c$), т.е. дуговую антенную решетку (ДАР). Поэтому в работе принято различать синтез кольцевых и синтез дуговых антенных решеток.

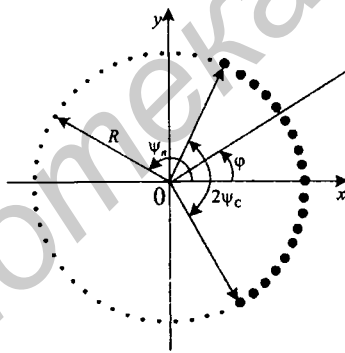


Рисунок 1 – Конструкция кольцевой антенной решетки

Комплексная диаграмма направленности КАР описывается выражением

$$F(\varphi) = N^{-1} \sum_{n=1}^N A_n F_{1n}(\varphi) \exp[ikR \cos(\varphi - \psi_n)], \quad (1)$$

где A_n , ψ_n – комплексные амплитуды возбуждения и угловое положение n -го излучателя;

$F_{1n}(\varphi)$ – диаграмма направленности n -го излучателя в составе КАР.

Под решением задачи синтеза КАР понимается расчет таких комплексных амплитуд возбуждения излучателей A_n (амплитудно-фазовое распределение (АФР) в раскрыве), которые обеспечат формирование ДН с требуемыми

свойствами. При этом считается известной конструкция КАР ($R, N, 2\psi_c, \psi_n$), а также длина волны λ и ДН излучающих элементов $F_{1n}(\varphi)$.

По аналогии с методом парциальных диаграмм (МПД) в работе было предложено представить АФР КАР в виде разложения в ряд Фурье:

$$A_n = \sum_{l=0}^{\infty} \{a_l \sin[l(\varphi_0 - \psi_n)] + b_l \cos[l(\varphi_0 - \psi_n)]\}, \quad (2)$$

где a_l, b_l – комплексные коэффициенты данного разложения;

φ_0 – требуемое направление формирования главного лепестка ДН.

После подстановки (2) в (1) и выполнения преобразований получено выражение для диаграммы направленности КАР в виде

$$\bar{F}(\varphi) = \sum_{l=0}^L [a_l Zs_l(\varphi) + b_l Zc_l(\varphi)], \quad (3)$$

где L характеризует точность разложения в ряд Фурье;

$Zs_l(\varphi), Zc_l(\varphi)$ – базисные функции, описываемые следующими соотношениями:

$$Zs_l(\varphi) = N^{-1} \sum_{n=1}^N \sin[l(\varphi_0 - \psi_n)] F_{1n}(\varphi) \exp[-ikR \cos(\varphi - \psi_n)], \quad (4)$$

$$Zc_l(\varphi) = N^{-1} \sum_{n=1}^N \cos[l(\varphi_0 - \psi_n)] F_{1n}(\varphi) \exp[-ikR \cos(\varphi - \psi_n)]. \quad (5)$$

Выражения (1)–(5) являются развитием известных методов синтеза антенн, которые в основном применяются для синтеза линейных систем изотропных излучателей в приложении к решению задач синтеза кольцевых антенных решеток. Как видно из соотношения (3), суть метода заключается в представлении требуемой ДН в виде разложения в ряд Фурье по системе функций $Zs_l(\varphi)$ и $Zc_l(\varphi)$, отыскании коэффициентов a_l, b_l и подстановке их в формулу (2) для расчета комплексных амплитуд возбуждения n -го излучателя. Принципиальной отличительной чертой предложенного метода является использование базисных функций специального вида. Они, как видно из выражений (4) и (5), содержат в себе информацию о конструктивных особенностях КАР и направленных свойствах ее излучающих элементов. Расчеты показали, что функции $Zs_l(\varphi)$ являются всегда нечетными, в то время как $Zc_l(\varphi)$ – всегда четные. Это, в свою очередь, обеспечивает выполнение условия их взаимной ортогональности:

$$\int_{\Omega}^{2\pi} Zs_k(\varphi) Zc_m(\varphi) d\varphi \rightarrow 0 \text{ при } \forall k \text{ и } m. \quad (6)$$

Однако условие «внутренней» ортогональности каждой из систем функций:

$$\int_{\Omega}^{2\pi} Zs_k(\varphi) Zs_m(\varphi) d\varphi \rightarrow 0 \text{ при } k \neq m;$$

$$\int_{\Omega}^{2\pi} Zc_k(\varphi) Zc_m(\varphi) d\varphi \rightarrow 0 \text{ при } k \neq m,$$

выполняется только для случая полного кольца, т.е. $2\psi_c = 360^\circ$. Поэтому в самом общем случае предложенный метод синтеза представляет собой разложение требуемой ДН по системе неортогональных базисных функций.

На основе предложенного метода синтеза и критерия минимума среднеквадратической меры близости требуемой и синтезированной ДН получено численное решение задачи синтеза КАР. С использованием метода наименьших квадратов была составлена система уравнений для определения коэффициентов разложения, которая, ввиду выполнения условия (6), сводится к двум независимым системам линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Коэффициенты a_i и b_i находятся путем решения соответствующих СЛАУ в матричном виде.

Основная сложность при вычислении коэффициентов a_i и b_i заключается в необходимости обращения квадратных матриц ядер интегральных уравнений. При этом для случая ДАР (КАР с активным сектором $2\psi_c < 360^\circ$) из-за «внутренней» неортогональности базисных функций $Z_s(\varphi)$ и $Z_c(\varphi)$ матрицы ядер интегральных уравнений оказываются плохо обусловленными. Поэтому для решения задачи синтеза таких антенн предложено использовать метод регуляризации. Его суть заключается в добавлении к главным диагоналям матриц ядер интегральных уравнений малых чисел γ . Параметр регуляризации γ должен обеспечивать сбалансированный компромисс между близостью решения к исходной задаче по заданному критерию и приемлемой обусловленностью. Расчеты показали, что для практически важных задач синтеза ($2\psi_c = 120 \dots 160^\circ$) значение γ находится в пределах от 0,0001 до 0,01.

Предложена методика численного синтеза кольцевых антенных решеток, включающая следующую последовательность операций:

1. Диаграмма направленности $F_{\text{н}}(\varphi)$ представляется в виде аналитической функции, отвечающей заданным требованиям.
2. Диаграмма направленности n -го излучателя формируется из ДН $F_1(\varphi)$, полученной одним из известных способов. В зависимости от постановки задачи синтеза $F_1(\varphi)$ может характеризовать направленные свойства n -го излучателя как в свободном пространстве, так и с учетом взаимного влияния элементов КАР.
3. На основании метода наименьших квадратов для нахождения значений коэффициентов a_i и b_i составляются две независимые СЛАУ.
4. Проводится решение СЛАУ относительно a_i и b_i .
5. Для случая синтеза ДАР выполняется регуляризация решения.
6. Рассчитываются требуемые комплексные амплитуды возбуждения излучателей активного сектора КАР. Для этого a_i и b_i подставляются в ряд (2).
7. Проводится формирование ДН КАР путем подстановки A_n в (1).
8. Оценивается эффективность решения задачи синтеза по одному из известных критериев.

Проведен синтез КАР разных волновых размеров. Рассмотрены варианты формирования ДН сложной формы, таких как оптимальные, в частности чебы-

шевские, многолучевые и косеконовые. Достоверность полученного решения задачи синтеза проверена методом интегральных уравнений (МИУ) с использованием тонкопроволочной модели кольцевых антенных решеток. Элементы активного сектора КАР возбуждались токами с комплексными амплитудами, рассчитанными в соответствии с предложенной методикой синтеза, а пассивные элементы нагружались на согласованные нагрузки. Учет направленных свойств излучающих элементов осуществлялся с помощью функции $F_1(\varphi)$, полученной МИУ для случая КАР с одним активным элементом, когда пассивные элементы нагружены на согласованные нагрузки, и развернутой на угол ψ_n . При этом считалось, что ДН всех элементов в составе КАР $F_{1n}(\varphi)$ идентичны по форме и отличаются лишь направлением главного излучения ψ_n . В основе этого допущения лежит одно из свойств КАР – все ее элементы находятся в условиях практически одинакового взаимного влияния, так как n -ый излучатель окружен $N - 1$ идентичными элементами.

На рисунке 2 представлены некоторые результаты выполненных исследований, в частности ДН и вид тонкопроволочной модели 21-элементной КАР ($kR = 11,7$; $2\psi_c = 190^\circ$). Кривая 1 характеризует требуемую ДН, заданную в виде полинома Чебышева с параметрами $F_6 = -25$ дБ и $2\varphi_{0,5} = 22^\circ$. Кривые 2 и 3 описывают полученные МИУ диаграммы направленности модели КАР, активный сектор которой возбуждался комплексными амплитудами, рассчитанными в соответствии с вышеизложенной методикой, а пассивные элементы нагружались на согласованные нагрузки. Кривая 2, в отличие от кривой 3, была получена при решении задачи синтеза без учета направленных свойств излучающих элементов КАР, т.е. для случая изотропных излучателей. Как видно из рисунка 2 (кривые 2 и 3), учет направленных свойств элементов КАР на этапе решения задачи синтеза обеспечивает лучшее приближение синтезированной ДН к требуемой.

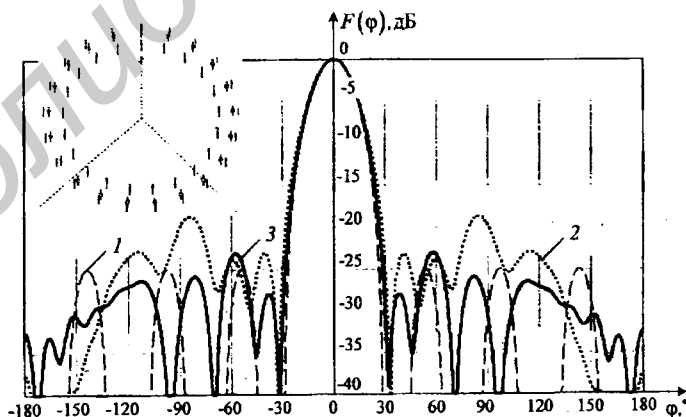
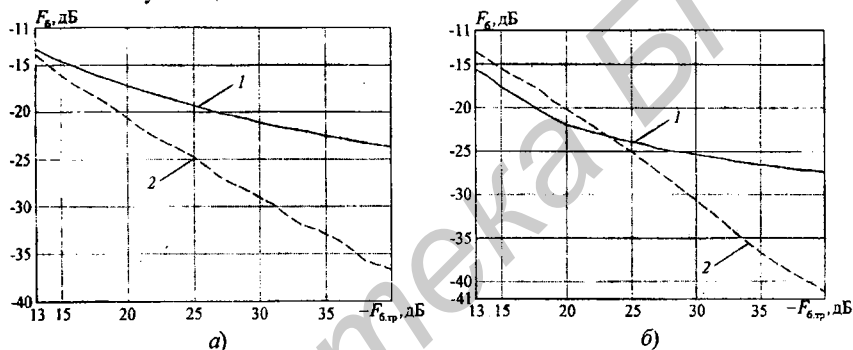


Рисунок 2 – Диаграммы направленности 21-элементной КАР

В работе показано, что значение среднеквадратической меры близости синтезированной и требуемой диаграмм направленности, рассчитанное с учетом направленных свойств излучающих элементов КАР, оказывается в 2 раза меньше по сравнению со случаем изотропных излучателей.

Получены зависимости уровней боковых излучений (УБИ) синтезированной КАР от их заданных значений (обозначенных $F_{6, \text{тп}}$) для чебышевских ДН решеток различных волновых размеров. На рисунке 3 представлены результаты исследования 60- и 180-элементной КАР ($kR = 30$ и 90 соответственно; $2\psi_c = 160^\circ$; $\Delta l = 0,5 \lambda$). Кривые 1 (рисунок 3) характеризуют поведение УБИ кольцевых антенных решеток, синтезированных без учета направленных свойств их элементов, т.е. для случая изотропных излучателей КАР. Кривые 2 получены в результате решения задачи синтеза с учетом диаграммы направленности излучающих элементов КАР.



а – 60-элементная антенная решетка; б – 180-элементная антенная решетка

Рисунок 3 – Уровень бокового излучения синтезированных КАР

Анализ полученных результатов позволил сделать выводы:

- минимально достижимый УБИ кольцевых антенных решеток, синтезированных без учета направленных свойств элементов, ограничивается значениями от -23 до -27 дБ;
- учет диаграммы направленности элементов КАР на этапе решения задачи синтеза позволяет достигать значений параметра $F_6 = -31 \dots -41$ дБ;
- эффективность синтеза с учетом направленных свойств элементов КАР возрастает по мере увеличения волновых размеров антенной решетки за счет снижения потерь в уровне бокового излучения;
- для сокращения вычислительных затрат при синтезе КАР в качестве $F_{1, n}(\varphi)$ могут использоваться ДН излучателя Гюйгенса. При этом потери УБИ составляют не более $1 \dots 2$ дБ.

На основании предложенного метода синтеза получено аналитическое решение задачи синтеза кольцевого излучателя. Приведен вывод частного ана-

литического решения задачи синтеза антенны в виде полного кольца, составленного из изотропных излучателей. В соответствии с ним коэффициенты разложения a_l и b_l определяются соотношениями

$$a_l = \frac{J_l(kR) \exp\left(-i \frac{\pi l}{2}\right)}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F_{\text{тп}}(\varphi) \sin[l(\varphi_0 - \varphi)] d\varphi,$$

$$b_l = \frac{J_l(kR) \exp\left(-i \frac{\pi l}{2}\right)}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F_{\text{тп}}(\varphi) \cos[l(\varphi_0 - \varphi)] d\varphi,$$

где $F_{\text{тп}}(\varphi)$ – требуемая диаграмма направленности.

Полученное аналитическое решение может быть обобщено для широкого круга задач синтеза антенн, в том числе синтеза кольцевых и криволинейных, непрерывных и дискретных (эквидистантных и неэквидистантных) излучающих систем, с учетом направленных свойств их элементов и для различной формы требуемых ДН. Достоверность полученного аналитического решения задачи синтеза проверена путем сопоставления основных результатов синтеза с результатами тестового примера, рассмотренного в монографии Л. Д. Бахраха и С. Д. Кременецкого «Синтез излучающих систем».

В третьей главе проведены исследования влияния на характеристики и параметры чебышевских КАР различных дестабилизирующих факторов, таких как ошибки установки излучающих элементов, разброс коэффициентов передачи приемо-передающих (цифровых) трактов и разрядность аналого-цифровых каналов. Данный вопрос рассматривался с точки зрения устойчивости решений задачи синтеза, полученных с помощью предложенного метода в реальных условиях производства КАР.

Проведен сравнительный анализ рассчитанных статистических характеристик и параметров кольцевых и дуговых антенных решеток, который показал общие закономерности. Выполненные исследования позволили сделать ряд выводов и рекомендаций по разработке таких антенн. В частности определено, что наибольшее влияние на форму и параметры ДН оказывают ошибки установки излучающих элементов КАР. Поэтому при изготовлении кольцевых (дуговых) антенных решеток необходимо стремиться обеспечить установку излучающих элементов с точностью $0,01 \lambda$.

Использование оперативно уточненной в процессе работы радиоэлектронной системы информации о положении излучателей антенной решетки на этапе решения задачи синтеза предложенным методом обеспечивает снижение потерь направленных свойств таких антенн на $3 \dots 5$ дБ.

Необходимо производить предварительную настройку приемо-передающих (цифровых) каналов в целях получения идентичных модулей ко-

эффицентов передачи с точностью 1,5...2,0%. Длина разрядной сетки цифровых каналов КАР в значительной степени определяется формой требуемой ДН и должна составлять порядка 8...10 разрядов.

В четвертой главе рассмотрены особенности применения предложенного метода синтеза к цифровым КАР. По аналогии с линейными антенными решетками цифровое диаграммообразование в КАР заключается в обеспечении фазовой компенсации набегов фаз взвешенных сигналов, распределенных по криволинейной поверхности излучателей:

$$F(\varphi) = N^{-1} \sum_{n=1}^N W_n X_n \exp[-ikR \cos(\varphi - \psi_n)],$$

где X_n – цифровые отсчеты напряжений сигналов n -го излучателя;

W_n – комплексные весовые коэффициенты, рассчитанные на основе предложенного метода синтеза, которые обеспечивают формирование ДН с требуемыми свойствами.

Разработаны экспериментальная модель и методика измерения характеристики направленности цифровой КАР. Вид модели КАР показан на рисунке 3. Она представляет собой излучающую систему ($kr = 11,7$), состоящую из 21 излучателя. Продольные вибраторы равномерно расположены над проводящим цилиндрическим экраном (диаметром 32,2 см и высотой 40 см) на расстоянии 0,25 λ от его поверхности. При этом в составе антенной решетки используется 20 пассивных, нагруженных на согласованные нагрузки, и один активный излучатель. Рабочая длина волны составляет 10 см. Она выбиралась исходя из необходимости обеспечения точности изготовления проволочных излучающих элементов и сравнительно небольших размеров КАР.

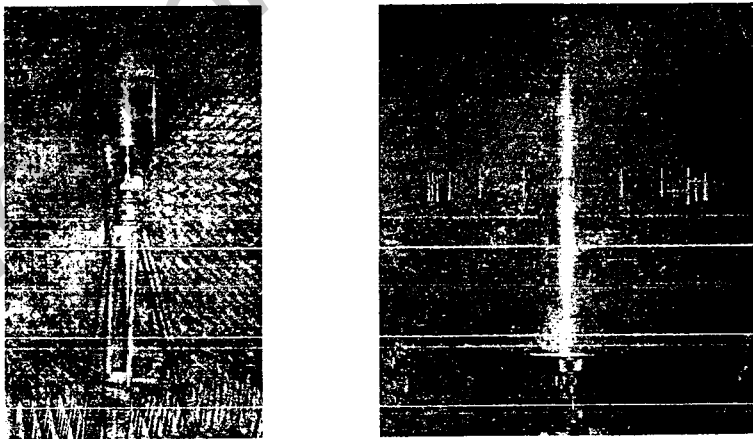


Рисунок 3 – Экспериментальная модель цифровой КАР

Активный элемент модели цифровой КАР представляет собой полуволновой вибратор с четвертьволновой симметрирующей приставкой (рисунок 4, а). Пассивные излучатели также являются полуволновыми вибраторами, между плечами которых способом пайки закреплены планарные СВЧ-резисторы типа С-31 номиналом 51 Ом (рисунок 4, б).



а – активный; б – пассивный

Рисунок 4 – Излучающие элементы цифровой КАР

Суть методики измерения характеристики направленности заключается в замене обработки одномоментно принятых сигналов всех элементов решетки на обработку последовательности сигналов единственного активного элемента при последовательном его расположении на месте очередного пассивного элемента путем поворота КАР на угол $\Delta\psi$. При этом методика измерения характеристики направленности таких антенн включает следующую последовательность операций:

1. Строится модель приемной КАР из одного активного и остальных пассивных излучающих элементов. Пассивные излучатели нагружаются на согласованные нагрузки.

2. Проводится измерение ДН активного излучателя в составе излучающей системы одним из известных способов.

3. Проводится измерение амплитуды и фазы сигнала на выходе активного излучателя при установке его в положение первого излучателя.

4. Активный элемент КАР устанавливается в положение очередного излучателя путем поворота антенны на угол $\Delta\psi$. Проводится измерение амплитуды и фазы сигнала на выходе активного излучателя. Данный пункт повторяется для угловых положений оставшихся излучателей КАР.

5. Формируется диаграмма направленности КАР путем взвешенного сложения измеренных значений сигналов с весовыми коэффициентами, рассчитанными в соответствии с предложенной методикой синтеза.

Экспериментальное исследование модели цифровой КАР было выполнено в безэховой камере кафедры радиотехники УО «ВА РБ». Для измерения ам-

плитуд и фаз сигнала использовались известные схемы измерения. Это позволило избежать значительных финансовых затрат, связанных с построением полноценного цифрового канала обработки сигнала. Само исследование выполнялось в четыре этапа. На первом этапе была измерена амплитудная ДН активного элемента в составе КАР. На втором и третьем – амплитуда и фаза сигналов на выходе активного вибратора для 21 углового положения излучателя КАР. На четвертом этапе после необходимой обработки полученных экспериментальных данных проводилось формирование требуемой характеристики направленности.

На примере экспериментально измеренной реализации сигналов излучателей модели цифровой КАР показана возможность формирования различных ДН (в том числе в реальном масштабе времени), управляемых по форме и параметрам. При этом изменению подлежали только комплексные весовые коэффициенты, рассчитанные в соответствии с предложенным методом синтеза.

На рисунке 5 представлены некоторые экспериментально измеренные характеристики направленности 11-элементной ДАР (21-элементной КАР с $2\psi_c = 190^\circ$). Кривая 1 характеризует ДН для случая равномерного амплитудного и скомпенсированного фазового распределений, т.е. когда комплексные весовые коэффициенты $W_n = 1$. Кривые 2–4 – результат синтеза ДН с управляемой шириной главного лепестка ($2\varphi_{0,5} = 20; 30; 40^\circ$) и с фиксированным УБЛ ($F_6 = -20$ дБ), заданными в виде полинома Чебышева.

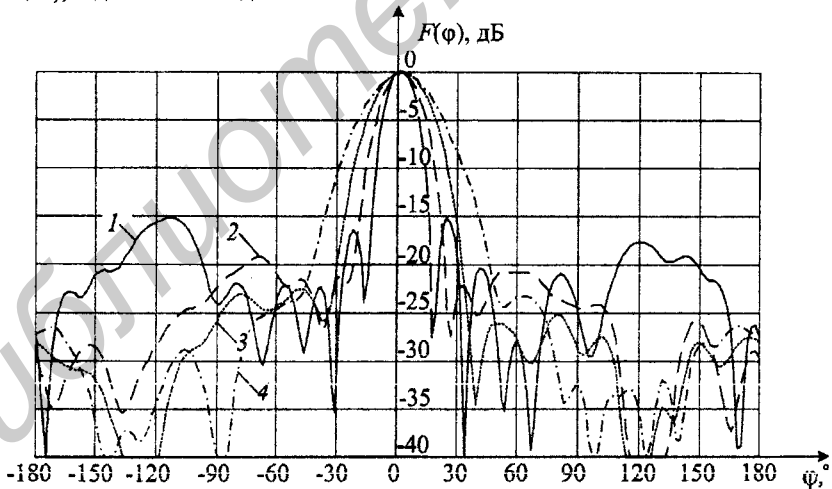


Рисунок 5 – Диаграммы направленности 21-элементной цифровой КАР

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработан метод синтеза кольцевых антенных решеток, позволяющий учитывать направленные свойства излучающих элементов [2-А, 3-А]. Он является развитием известных методов синтеза антенн, таких как метод интеграла Фурье, метод парциальных диаграмм и собственных функций, применяемых в основном в приложении к линейным антеннам.

Отличительным признаком предложенного метода от ранее известных методов синтеза антенн является использование базисных функции $Z_s(\varphi)$ и $Z_c(\varphi)$, которые учитывают как конструктивные особенности антенной решетки, так и направленные свойства излучающих элементов [2-А, 5-А].

Метод позволяет эффективно (по критерию среднеквадратической близости синтезированной и требуемой диаграмм 2 ... 10 %) решать задачи синтеза кольцевых антенных решеток при формировании чебышевских, косеконсных и многолучевых диаграмм направленностей [6-А].

Применение данного метода в кольцевых антенных решетках с цифровым диаграммообразованием позволяет синтезировать характеристики направленности с управляемыми, в том числе в реальном масштабе времени, параметрами и формой [7-А, 12-А].

2. Разработана методика численного расчета амплитудно-фазового распределения в пределах заданного активного сектора кольцевой антенной решетки по требуемой диаграмме направленности с учетом направленных свойств излучающих элементов [6-А]. При этом задача синтеза КАР решается по критерию среднеквадратической меры близости требуемой и синтезированной диаграмм направленности с использованием метода наименьших квадратов. Для КАР с активным сектором ($2\psi_c < 360^\circ$) в целях устранения некорректности решаемой задачи синтеза используется регуляризация решения [2-А, 3-А, 4-А].

3. Получено аналитическое решение задачи синтеза для непрерывной излучающей системы в виде кольца. Данное решение может быть обобщено для широкого круга задач синтеза антенн, в том числе синтеза кольцевых и криволинейных, непрерывных и дискретных (эквидистантных и неэквидистантных) излучающих систем, с учетом направленных свойств их элементов и для требуемых ДН сложной формы [5-А].

4. Получены новые результаты статистических исследований чебышевских кольцевых антенных решеток с заданным размером активного сектора. С их помощью можно оценить влияние на характеристики и параметры таких антенн различных неидентичностей излучающих модулей, таких как ошибки установки излучателей, разброс коэффициентов передачи приемо-передающих (цифровых)

трактов, а также разрядной сетки аналого-цифровых каналов [1-А, 3-А, 4-А, 13-А].

5. Разработаны экспериментальная модель и методика измерения характеристики направленности цифровой кольцевой антенной решетки. Они позволяют обеспечить идентичность приемопередающих цифровых каналов кольцевой антенной решетки, а также снижение затрат на этапе исследования таких антенн [7-А, 12-А].

Отличительной особенностью разработанной модели и методики синтеза ЦКАР является применение в составе антенной решетки только одного активного элемента в окружении пассивных излучателей, нагруженных на согласованные нагрузки. При этом обработка одномоментно принятых сигналов всех излучающих элементов решетки заменяется обработкой последовательности сигналов единственного активного элемента при последовательном его расположении на месте очередного элемента [7-А, 12-А].

6. Представлены результаты экспериментальных исследований 21-элементной ЦКАР. Они позволяют сделать вывод о достоверности и доказательности представленных в работе результатов, полученных с помощью предложенного метода синтеза кольцевых антенных решеток.

Для исследованной модели ЦКАР реально достижимые значения ширины главного лепестка ДН ограничиваются пределами от 14,4 до 32° (коэффициент расширения $K_p = 2,2$), а УБЛ $F_{\epsilon} \geq -23$ дБ.

Измеренные значения амплитуды и фазы сигналов на выходе всех излучателей 21-элементной КАР, а также их ДН могут быть использованы специалистами в области антенной техники при решении прикладных задач анализа и синтеза кольцевых антенных решеток.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанный метод синтеза кольцевых антенных решеток целесообразно использовать для обеспечения требуемых направленных свойств радиотехнических систем с цифровыми кольцевыми или цилиндрическими антенными решетками. Это позволит повысить эффективность решаемых данными системами задач путем формирования управляемой по форме и параметрам диаграммы направленности, характерной для конкретного режима работы.

Разработанная методика численного решения задачи синтеза антенн [6-А] использовалась на предприятии РБ ОАО «КБ Радар» при разработке алгоритмов управления амплитудно-фазовым распределением кольцевой фазированной антенной решетки опытного образца изделия «Роса-РБ», о чем получен акт практического использования.

Одним из перспективных направлений дальнейших исследований является развитие предложенного метода в направлении синтеза двумерных антен-

ных решеток (цилиндрических, конических, сферических и т.д.).

Метод может быть использован при формировании требуемых направленных свойств линейных и криволинейных (у которых форма излучающего раскрыва определяется конфигурацией объекта, на котором они устанавливаются) антенных решеток. При синтезе криволинейной антенной решетки необходимо учитывать различие ДН излучателей в составе излучающей системы, что, естественно, усложняет решение задачи.

Одной из сложных и актуальных на сегодняшний день проблем теории и техники антенн является конструктивный синтез. Ввиду особенностей используемых в предложенном методе синтеза базисных функций $Z_s(\varphi)$ и $Z_c(\varphi)$, которые учитывают конструктивные параметры кольцевой антенной решетки, существует возможность вывода специальных целевых функций (критериев), позволяющих решать задачи конструктивного синтеза таких антенн.

Проведенные исследования влияния различных дестабилизирующих факторов на средние характеристики КАР в рамках НИР (шифр «Кольцо РБ 2011») [13-А] позволили сделать ряд выводов и рекомендаций по разработке таких антенн. В частности определено, что наибольшее влияние на форму и параметры ДН оказывают случайные ошибки установки излучателей КАР. Поэтому при изготовлении кольцевых антенных решеток необходимо стремиться обеспечить их установку с точностью не хуже $\pm 0,01\lambda$. Использование оперативно уточненной в процессе работы радиоэлектронной системы информации о положении излучателей антенной решетки на этапе решения задачи синтеза предложенным методом обеспечивает снижение потерь направленных свойств таких антенн на 3...5 дБ. Следует проводить предварительную настройку приемопередающих (цифровых) каналов в целях получения идентичных модулей коэффициентов передачи с точностью около 1,5...2,0%. Длина разрядной сетки цифровых каналов КАР в значительной степени определяется формой требуемой ДН и должна составлять порядка 8...10 разрядов. Проанализировано влияние разброса конструктивных параметров на средние характеристики МРЛС «Роса-РБ», о чем свидетельствует акт практического использования.

Разработанная методика измерения характеристик направленности ЦКАР может использоваться на предприятиях радиоэлектронной промышленности Республики Беларусь. Она позволит сократить затраты на этапе проектирования таких антенн и обеспечить идентичность приемопередающих цифровых каналов, при уменьшении количества необходимых трактов с N до одного.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1-А. Калинин, А. А. Численное моделирование кольцевой антенной решетки / А. А. Калинин, А. Г. Романович // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2009. – № 1 (22). – С. 62–67.

2-А. Калинин, А. А. Метод численного синтеза чебышевских кольцевых антенных решеток / А. А. Калинин, А. Г. Романович // Докл. БГУИР. – 2010. – № 7 (53). – С. 5–11.

3-А. Романович, А. Г. Влияние неидентичностей излучающих модулей на характеристики и параметры кольцевых антенных решеток / А. Г. Романович, А. А. Калинин // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2010. – № 4. – С. 66–72.

4-А. Калинин, А. А. Влияние неидентичностей излучающих модулей на характеристики и параметры дуговых антенных решеток / А. А. Калинин, А. Г. Романович // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2010. – № 19. – С. 78–83.

5-А. Романович, А. Г. Аналитическое решение задачи синтеза криволинейного излучателя / А. Г. Романович // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2011. – № 1. – С. 98–104.

6-А. Романович, А. Г. Методика синтеза кольцевых антенных решеток / А. Г. Романович, А. А. Калинин // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2011. – № 20. – С. 63–68.

7-А. Романович, А. Г. Результаты экспериментальных исследований цифровой кольцевой антенной решетки / А. Г. Романович // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2011. – № 2. – С. 80–85.

Статьи в материалах научных конференций

8-А. Романович, А. Г. Численный синтез и моделирование кольцевой антенной решетки / А. Г. Романович, А. А. Калинин // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: 10-я Междунар. межвуз. конф. студентов, магистрантов и аспирантов: сб. тез. докл., Гомель, 29–30 апр. 2010 г. / Гомельский гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого Респ. Беларусь. – Гомель, 2010. – С. 443–447.

9-А. Романович, А. Г. Управление формой диаграммы направленности цифровой кольцевой антенной решетки / А. Г. Романович, А. А. Калинин // Материалы 5-й Междунар. науч. конф. по воен.-техн. проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, Минск, 25–26 мая 2011 г. / Гос. воен. пром. комитет Респ. Беларусь, ГУ «Белорусский ин-т систем. аналит. и информац. обеспечения науч.-техн. сферы»; редкол.: В. Е. Кратенок [и др.]. – 2011. – С. 141–144.

Тезисы докладов в материалах конференций

10-А. Калинин, А. А. Синтез кольцевой антенной решетки / А. А. Калинин, А. Г. Романович // Проблемные вопросы теории и практики военного строительства и военного искусства, создание и модернизация вооружения в современных условиях, пути их решения: 10-я воен.-науч. конф. Воен. акад. Респ. Беларусь: сб. тез. докл., Минск, 9–10 апр. 2009 г. / УО «ВАРБ». – Минск, 2009. – С. 331.

11-А. Романович, А. Г. Методика синтеза кольцевой антенной решетки / А. Г. Романович, А. А. Калинин // Актуальные аспекты инновационного развития вооруженных сил с учетом характера войн будущего: тез. и докл. Междунар. воен.-науч. конф., Минск, ВАРБ, 30–31 марта 2011 г. / УО «ВАРБ». – Минск, 2011. – Ч. III. – С. 6.

12-А. Романович, А. Г. Численный синтез многолучевой кольцевой антенной решетки / А. Г. Романович, А. А. Калинин // Новые направления развития приборостроения: тез. и докл. 3-й Междунар. студ. науч.-техн. конф., Минск, 21–23 апр. 2010 г. / Бел. нац. техн. ун-т; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2010. – С. 265.

Отчеты о НИР

13-А. Синтез кольцевой антенной решетки и анализ влияния дестабилизирующих факторов на ее направленные свойства: отчет о НИР / УО «ВАРБ»; рук. А. А. Калинин. – Минск, 2011. – 51 с. – № 1336/11.



Рамановіч Аляксандр Генадзевіч

Сінтэз кальцавых антэнных рашотак зададзенай канструкцыі з улікам дыяграмы накіраванасці выпраменьваючага элемента

Ключавыя словы: кальцавая антэнная рашотка, метада сінтэзу, метадыка лікавага сінтэзу, эксперыментальная мадэль, метадыка вымярэння характарыстыкі накіраванасці.

Мэта працы – пашырэнне магчымасцей кальцавых антэнных рашотак па фарміраванні дыяграм накіраванасці (ДН) зададзенай формы.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: у дысертацыйнай рабоце распрацаваны метада сінтэзу кальцавой антэннай рашоткі, які дазваляе праводзіць разлік амплітудна-фазавага размеркавання ў межах зададзенага актыўнага сектара антэннай рашоткі, а таксама ўлічваць накіраваныя ўласцівасці выпраменьваючых элементаў. На яго аснове распрацавана метадыка лікавага сінтэзу кальцавых антэнных рашотак. Пры гэтым задача сінтэзу такіх антэн вырашаецца з дапамогай выкарыстання метаду найменшых квадратаў, а для выпадку дугавых антэнных рашотак выкарыстоўваецца рэгулярызацыя рашэння. Атрымана аналітычнае рашэнне задачы сінтэзу для бесперапыннай выпраменьваючай сістэмы ў выглядзе кольца. Гэта рашэнне можа быць абагульнена для рада задач сінтэзу антэн, у тым ліку сінтэзу кальцавых і крывалінейных, бесперапынных і дыскрэтных (эквідыстантных і неэквідыстантных) выпраменьваючых сістэм з улікам накіраваных уласцівасцей іх элементаў і для розных форм патрэбных ДН. Атрыманы новыя вынікі статыстычных даследаванняў чэбышаўскіх кальцавых антэнных рашотак з неідэнтычнасцямі выпраменьваючых модуляў рознага характару.

Распрацаваны эксперыментальная мадэль і метадыка вымярэння характарыстыкі накіраванасці лічбавай кальцавой антэннай рашоткі. Яны дазваляюць забяспечыць ідэнтычнасць прыёма-перадаючых лічбавых каналаў кальцавой антэннай рашоткі, а таксама паніжэнне затрат на этапе даследаванняў такіх антэн. Прадстаўлены вынікі эксперыментальных даследаванняў 21-элементарнай кальцавой антэннай рашоткі з лічбавым фарміраваннем дыяграмы накіраванасці.

РЕЗЮМЕ

Романович Александр Геннадьевич

Синтез кольцевых антенных решеток заданной конструкции с учетом диаграммы направленности излучающего элемента

Ключевые слова: кольцевая антенная решетка, метод синтеза, методика численного синтеза, экспериментальная модель, методика измерения характеристики направленности.

Цель работы – расширение возможностей кольцевых антенных решеток по формированию диаграмм направленности (ДН) заданной формы.

Полученные результаты и их новизна: в диссертации разработан метод синтеза кольцевой антенной решетки, позволяющий проводить расчет амплитудно-фазового распределения в пределах заданного активного сектора антенной решетки, а также учитывать направленные свойства излучающих элементов. На его основе разработана методика численного синтеза кольцевых антенных решеток. При этом задача синтеза таких антенн решается с помощью применения метода наименьших квадратов, а для случая дуговых антенных решеток используется регуляризация решения. Получено аналитическое решение задачи синтеза для непрерывной излучающей системы в виде кольца. Это решение может быть обобщено для ряда задач синтеза антенн, в том числе синтеза кольцевых и криволинейных, непрерывных и дискретных (эквидистантных и неэквидистантных) излучающих систем, с учетом направленных свойств их элементов и для различных форм требуемых ДН. Получены новые результаты статистических исследований чебышевских кольцевых антенных решеток с неидентичностями излучающих модулей различного характера.

Разработаны экспериментальная модель и методика измерения характеристики направленности цифровой кольцевой антенной решетки. Они позволяют обеспечить идентичность приема-передающих цифровых каналов кольцевой антенной решетки, а также снижение затрат на этапе исследований таких антенн. Представлены результаты экспериментальных исследований 21-элементной кольцевой антенной решетки с цифровым формированием диаграммы направленности.

SUMMARY

Romanovich Alexander Gennadevich

Synthesis of circular arrays of the set design taking into account the directional pattern of the radiating element

Keywords: circular array, synthesis method, technique of numerical synthesis, experimental model, technique of measurement of the directional characteristic.

The work purpose is extension of capabilities of circular arrays to generate directional patterns of specified shapes.

The results obtained and their novelty: in the thesis work the new method of synthesis of circular array is developed, that allows to calculate amplitude-phase distribution within the given active sector of the antenna array, it also allows to consider the directional characteristics of radiating elements. On its basis the technique of numerical synthesis of circular arrays is developed. Thus the problem of synthesis of such antennas is being solved with use of the least squares method, and for arc arrays the regularization method is used. The analytical solution to the problem of synthesis for continuous radiating system in the form of a ring is found. This solution can be generalised for a wide range of problems of synthesis of antennas, including synthesis of circular and curvilinear, continuous and discrete (homogeneous and nonuniformly spaced) radiating systems, taking into account the directional characteristics of their elements and for various forms of the required radiation patterns. New results of statistical researches of Chebyshev circular arrays with various nonidentities of radiating modules are obtained.

The experimental model and the technique of measurement of the directional characteristic of digital circular array are developed. They allow to provide identity of receiving-transmitting digital channels of circular array and also decrease in expenses at the stage of researches of such antennas. The results of experimental researches of a 21-element digital circular array are given.

Научное издание

Романович Александр Геннадьевич

**СИНТЕЗ КОЛЬЦЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК
ЗАДАННОЙ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ ДИАГРАММЫ
НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.07 – антенны, СВЧ устройства и их технологии

| | | |
|--------------------------------|---|--------------------|
| Подписано в печать 10.01.2011. | Формат 60x84 ¹ / ₁₆ . | Бумага офсетная. |
| Гарнитура «Таймс». | Отпечатано на ризографе. | Усл. печ. л. 1,63. |
| Уч.-изд. л. 1,4. | Тираж 60 экз. | Заказ 44. |

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009
220013, Минск, П. Бровки, 6