

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.396.67

КЕДА
Владимир Васильевич

**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ РЕШЕТКИ ПРОВОЛОЧНЫХ АНТЕНН
С ШИРОКОУГОЛЬНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Минск 2019

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Юрцев Олег Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры антенн и устройств СВЧ учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Кудин Виктор Пантелеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Романович Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательского отдела ООО «Оборонные инициативы»

Оппонирующая организация **ОАО «АЛЕВКУРП»**

Защита диссертации состоится 11 апреля 2019 г. в 16.00 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, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « » марта 2019 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций Д 02.15.02
кандидат технических наук, доцент

Т. А. Пулко

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Развитие стелс-технологии делает радиолокаторы, работающие в метровом и нижней части дециметрового диапазонах длин волн, все более востребованными. Вместе с тем вопросы, связанные с построением фазированных антенных решеток (ФАР) радиолокаторов метрового диапазона, в открытой печати почти не рассмотрены.

Одним из ключевых вопросов, рассматриваемых в диссертации, является исследование взаимодействия проволочных излучателей в составе широкополосных антенных решеток с широкоугольным сканированием, работающих в метровом и нижней части дециметрового диапазонах длин волн. В качестве излучателей рассмотренных в диссертации решеток были выбраны спиральные и рамочные антенны. Эти излучатели имеют малые поперечные размеры, позволяющие осуществлять фазовое сканирование диаграммой направленности (ДН) в широком секторе без возникновения побочных (дифракционных) главных лепестков.

Среди рамочных антенн особый интерес представляют антенны с управляемой поляризацией. Известно, что использование управляемой поляризации в радиолокационных системах позволяет расширить их возможности и помехозащищенность. Однако вопросы, связанные с применением рамочных антенн с управляемой поляризацией, в литературе рассмотрены недостаточно полно. Поэтому вопросам, связанным с изучением рамочных антенн с управляемой поляризацией, в работе уделено особое внимание.

Полученные в диссертации размеры оптимизированных антенн и установленные закономерности влияния геометрических характеристик антенн на их электрические характеристики, а также закономерности взаимодействия излучателей в составе решетки позволяют заметно ускорить процесс проектирования решеток широкополосных проволочных антенн. Кроме того, полученные в работе результаты могут послужить основой для разработки новых конструкций антенн.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Содержание диссертационной работы соответствует пункту 3 приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016-2020 гг., утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 22 апреля 2015 г. № 166, «Промышленные и строительные

технологии и производство: технологии электронного приборостроения, микроэлектроника, радиоэлектроника, СВЧ-электроника, электротехника».

Исследования проводились в рамках:

– ОКР «Разработка антенного устройства с переключаемой поляризацией» (№ ГР 20180032 от 11.01.2018, начало выполнения 08.12.2017 г.) в ОАО КБ «Радар» – управляющей компании «Системы радиолокации» при выполнении эскизного проекта в рамках выполнения договора № 48-17 от 21.11.2017, заключенного на основании контракта от 30.06.2017 г. № 17BY11Y122ZY;

– НИОКР «Разработать радиотехнические средства для мониторинга снежно-ледяного покрова и атмосферы в полярных районах» (с периодом 19.03.2012–31.12.2015, № ГР 20121090) по государственной программе «Мониторинг полярных районов Земли и обеспечение деятельности арктических и антарктических экспедиций» в НИЛ 11.1 «Радиолокационные системы» БГУИР при выполнении работ по договору № 12-1123Б с Государственным научным учреждением «Институт природопользования НАН Беларуси»;

– НИР «Разработка фазированной антенной решетки» (с периодом 13.01.2017–08.06.2017) при выполнении Части В Контракта от 22.09.2016 № 160207-08MBY0063 между РНПУП «Центр радиотехники НАН Беларуси» и зарубежным заказчиком.

Цель и задачи исследования

Целью работы является уменьшение уровня поля по кросс-поляризации, расширение полосы частот по согласованию и расширение сектора электронного сканирования антенных решеток рамочных излучателей с управляемой поляризацией за счет модификации известных конструкций рамочного излучателя, а также разработка методик, обеспечивающих сокращение времени проектирования широкополосных решеток проволочных излучателей с широкоугольным сканированием.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработана математическая модель проволочной антенны произвольной формы, позволяющая рассчитывать ее характеристики и параметры как отдельно, так и в составе антенной решетки.

2. Разработана методика численного моделирования проволочных излучателей и решеток из проволочных излучателей, основанная на комплексном применении трех программ: оригинальной программы WAS, построенной с использованием метода интегральных уравнений; коммерческих программ MMANA-GAL и CST Microwave studio. Методика позволяет:

рассчитывать входные сопротивления и КСВ проволочных антенн, как отдельных, так и в составе плоской фазированной решетки; рассчитывать диаграммы направленности, как для отдельного излучателя, так и фазированной антенной решетки; оптимизировать размеры излучателей в составе антенных решеток с широкоугольным сканированием. Методика существенно упрощает процесс проектирования ФАР проволочных излучателей, сокращая время, затрачиваемое на проектирование, в 2–100 раз в зависимости от сложности антенной решетки по сравнению с применением программ электродинамического моделирования, использующих метод конечных разностей, и делает его более надежным.

3. Проведено численное моделирование взаимодействия рамочных излучателей с управляемой поляризацией и спиральных антенн в составе широкополосных антенных решеток с широкоугольным сканированием, работающих в метровом и нижней части дециметрового диапазонах длин волн.

4. Проведено экспериментальное исследование разработанных рамочных антенн с управляемой поляризацией.

5. На основе полученных результатов предложены методики разработки широкополосных решеток проволочных излучателей с широкоугольным сканированием.

Объект исследования – широкополосные решетки проволочных антенн с широкоугольным сканированием;

Предмет исследования – электрические характеристики и параметры рамочных антенн с управляемой поляризацией и спиральных антенн в составе широкополосных антенных решеток с широкоугольным сканированием, рассчитанных на работу в метровом и нижней части дециметрового диапазонах длин волн.

Научная новизна

1. Разработана методика численного моделирования проволочных антенн, основанная на применении трех программ: оригинальной – программы WAS, построенной с использованием метода интегральных уравнений в тонкопроволочном приближении, и коммерческих программ MMANA-GAL и CST Microwave studio, отличающаяся:

– более широкими возможностями по сравнению с коммерческими программами, в частности, возможностью рассчитывать параметры согласования для каждого излучателя в составе решетки с учетом их взаимодействия;

- сокращением времени проектирования решетки в 2–100 раз в зависимости от сложности решетки за счет использования метода интегральных уравнений с использованием тонкопроволочного приближения для расчета характеристик при предварительной оптимизации размеров излучателей в составе решетки;

- повышенной достоверностью получаемых результатов.

2. Предложены новые схемы построения рамочных антенн с управляемой поляризацией, отличающиеся от известных уменьшенным на 20–25 дБ уровнем поля по кросс-поляризации, а в составе антенной решетки, кроме этого, увеличенным сектором сканирования с 60° до 100° и расширенной полосой частот по согласованию на 20 %.

Путем численного моделирования получены не описанные в литературе зависимости электрических параметров антенных решеток рамочных и спиральных антенн от их геометрических параметров и частоты.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика численного моделирования проволочных антенн и решеток из проволочных излучателей, основанная на комплексном применении трех программ: оригинальной программы WAS, построенной с использованием метода интегральных уравнений в тонкопроволочном приближении, коммерческих программ MMANA-GAL и CST Microwave studio. Методика существенно упрощает процесс проектирования фазированных решеток проволочных антенн, сокращает время, затрачиваемое на проектирование, в 2–100 раз в зависимости от сложности антенной решетки за счет использования метода интегральных уравнений в тонкопроволочном приближении и повышает достоверность полученных результатов путем сравнения результатов, полученных в разных программах.

2. Новые схемы построения широкополосных рамочных антенн с управляемой поляризацией для применения в радиотехнических системах с управляемой поляризацией, в частности, радиолокации, телекоммуникационных системах, использующих поляризационное разнесение, и ММО-системах, и результаты их численного моделирования. Предложенные конструкции рамочных антенн по сравнению с подобными антеннами, описанными в литературе, обладают:

- на 30% меньшими поперечными размерами, что при применении в составе антенной решетки позволяет увеличить сектор электронного сканирования на 40° ;

- на 1–2 дБ большим КНД;

- на 20 % большей полосой частот по согласованию.

3. Новые закономерности в зависимости электрических характеристик рамочных излучателей и решеток из них от геометрических параметров:

- влияние металлических стоек на уровень бокового излучения;
- влияние конфигурации согласующих элементов на уровень излучения с кросс-поляризацией, входное сопротивление и диапазонные свойства антенны;
- взаимосвязь максимального значения КСВ одиночного излучателя и параметров антенной решетки с электронным сканированием.

Описанные закономерности, а также приведенные размеры оптимизированных антенн позволяют существенно упростить их проектирование.

Личный вклад соискателя ученой степени

Соискателем была разработана математическая модель проволочной антенны произвольной формы, позволяющая рассчитывать характеристики и параметры как одиночной антенны, так и антенной решетки. На основе разработанной математической модели разработан комплекс программ численного моделирования. Программы написаны на языке C++ в среде Microsoft Visual Studio. Комплекс состоит из нескольких программ, взаимодействующих между собой посредством текстовых файлов. В основной программе реализованы следующие возможности:

- формирование файлов геометрии отдельных излучателей или решеток проволочных антенн в формате программы MMANA;
- ввод в программу данных о геометрии излучателя из MMANA-файла;
- ввод в программу данных о геометрии и амплитудно-фазового распределения решетки из текстового файла для последующего расчета характеристик решетки из проволочных излучателей;
- расчет входных сопротивлений и КСВ проволочных излучателей, как отдельных, так и в составе плоской фазированной решетки;
- расчет диаграмм направленности и ее параметров, как отдельного излучателя, так и решетки.

Соискателем выполнена большая часть исследований, вошедших в диссертацию. Совместно с научным руководителем доктором технических наук, профессором О. А. Юрцевым проведены исследования вопроса использования конических спиральных антенн в составе широкополосных антенн с широкоугольным сканированием. О. А. Юрцев оказал значительную помощь в определении направлений диссертационных исследований. Совместно с А. В. Рубаником и Г. П. Туруком проводились экспериментальные исследования двухвходовой рамочной антенны с управляемой поляризацией. Измеренные Ю. Ю. Бобковым диаграммы направленности рамочной антенны с

переключаемой поляризацией использованы для проверки адекватности разработанной математической модели. И. С. Садовскому принадлежит идея использования рамочных антенн с переключаемой поляризацией в составе антенной решетки мобильной РЛС метрового диапазона.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: IV и VII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2015, 2018); XXI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2016); 8th, 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (Odessa, Ukraine, 2016, 2018); IV и VI Всероссийская микроволновая конференция (Москва, 2016); 7-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (Минск, 2017); XIII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов» (Казань, 2015); 12-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2016» (Севастополь, 2016).

Опубликование результатов диссертации

По результатам диссертационных исследований опубликовано 16 научных работ, среди них 5 статей в рецензируемых научных журналах общим объемом 1.9 авторского листа и 11 статей в материалах конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, основной части из четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем работы составляет 149 страниц, из них 84 страницы основного текста, 112 рисунков на 31 странице, 36 таблиц на 9 страницах, список используемых литературных источников из 143 наименований на 10 страницах, список публикаций автора из 15 наименований на 2 страницах, 6 приложений на 13 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** обосновывается актуальность и необходимость исследования вопросов построения широкополосных антенных решеток с широкоугольным сканированием, работающих в метровом и нижней части дециметрового диапазонах длин волн, отражено место диссертации среди других исследований в этой области.

В **первой главе** проведен аналитический обзор литературы по технике антенных решеток и широкополосным проволочным антеннам. На основе анализа работ, выполненных другими исследователями, выделены актуальные вопросы, нуждающиеся в дополнительной проработке. Исходя из вопросов, требующих рассмотрения, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** описаны разработанные в работе математическая модель и программное обеспечение, позволяющие рассчитывать характеристики антенных решеток проволочных антенн. Математическая модель разработана на основе метода интегральных уравнений. В работе использованы три программы численного моделирования: MMANA-GAL, CST Microwave Studio и программа, разработанная автором. Достоинства и недостатки каждой из использованных программ описаны в указанной главе.

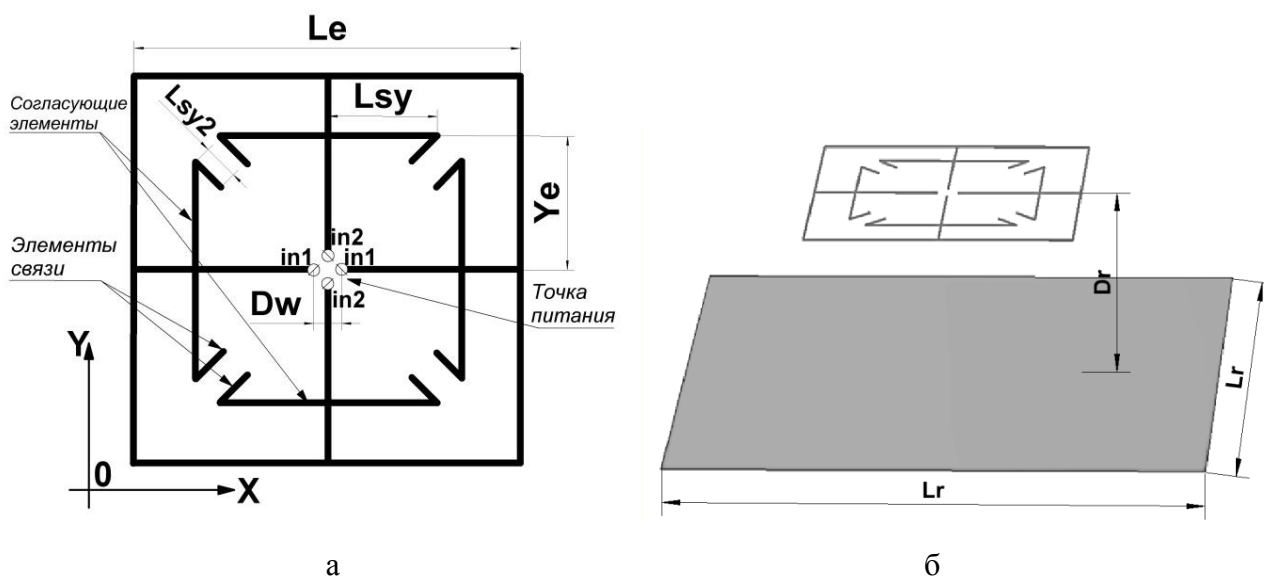
В **третьей главе** предложено и исследовано несколько новых схем построения широкополосных рамочных антенн с управляемой поляризацией, а также рассмотрена возможность их использования в составе широкополосных линейных решеток с широкоугольным сканированием.

Предложена и исследована двухвходовая рамочная антенна с управляемой поляризацией. Антенна имеет два развязанных входа, по первому возбуждается поле с горизонтальной поляризацией, по второму – с вертикальной. Получены закономерности о влиянии геометрических параметров на электрические характеристики. Антенна компактна и в зависимости от входного сопротивления имеет относительную рабочую полосу частот по уровню КСВ < 2 , равную 11–33 %. КНД антенны почти не зависит от входного сопротивления, под которое разработана антенна, и составляет не менее 8 дБ. В относительной полосе частот 9,5 % форма ДН почти не зависит от частоты, а уровень излучения с кросс-поляризацией не превышает –40 дБ.

В работе была также описана конструкция рамочной антенны с переключаемыми входами, которая представляет собой модификацию рассмотренного в литературе варианта антенны, в котором с целью снижения уровня поля с кросс-поляризацией использована симметричная схема расположения согласующих элементов.

Рассмотрена модификация антенны с переключаемыми входами, в которой благодаря добавлению дополнительной согласующей рамки удалось расширить рабочий диапазон. Приведена схема переключателя поляризации, выполненного на pin-диодах. Показано, что относительная полоса частот антенны по уровню КСВ < 2 составляет 40 %, что на 9 % лучше, чем в варианте антенны без согласующей рамки. КНД антенны составляет не менее 8 дБ. Показано, что рассмотренная модификация антенны может быть использована в составе синфазных антенных решеток, работающих в относительной полосе частот, равной 20 % при КСВ < 2 . Разработана методика совместного использования трех программ численного моделирования, позволяющая повысить скорость расчетов по оптимизации размеров антенны и повысить достоверность полученных результатов путем сравнения результатов.

Рассмотрена компактная рамочная антенна (рисунок 1), которая является модификацией двухвходовой антенны, в которой изменена система согласующих элементов. В этом варианте увеличена электрическая прочность антенны и снижены требования к точности изготовления антенны. Входное сопротивление антенны равно 200 Ом. Решена задача оптимизация размеров антенны по критерию максимальной относительной полосы частот при заданном максимальном уровне $КСВ_{MAX}$. Разработанная антенна имеет КНД, равный 7...8 дБ, ширину главного лепестка ДН около 70° в Е-плоскости и 86° в Н-плоскости. Относительная полоса частот антенны, в которой обеспечивается $КСВ_{MAX} = 1,3...2,0$, составляет 24...54 %. Полоса частот зависит от значения $КСВ_{MAX}$, под которое оптимизирована антенна. Антенна обладает малыми размерами: размер стороны рамки $L_e = 0,348...0,386\lambda$ (рисунок 1, а).



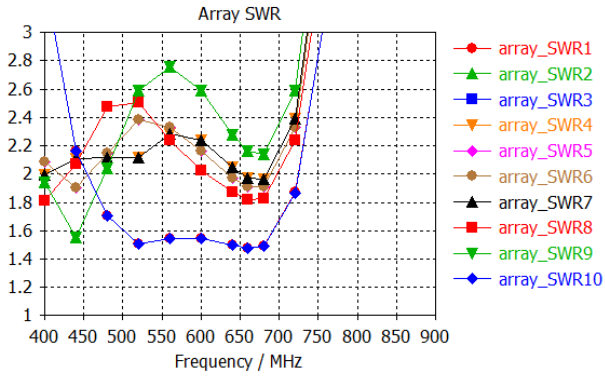
а – конструкция излучающей части; б – общий вид антенны

Рисунок 1. – Конструкция компактной рамочной антенны с управляемой поляризацией

Описано исследование диапазонных свойств двухвходовой компактной рамочной антенны, показанной на рисунке 1, в составе линейных фазированных антенных решеток. На рисунках 2 и 3 показаны зависимости КСВ от частоты в излучателях линейной антенной решетки с максимальной рабочей частотой F_{MAX} , равной 660 МГц, $КСВ_{MAX} = 1,3$ и максимальным углом отклонения луча от нормали к решетке $Q_{MAX} = 45^\circ$ для углов отклонения луча от нормали Q_{SCAN} , равных 0° и 45° , при возбуждении излучения с горизонтальной и вертикальной поляризацией. Кривым Array_SWR1...Array_SWR10 соответствуют зависимости КСВ от частоты для излучателей с номерами от 1 до 10. На рисунках 4 и 5 показаны ДН, полученные на верхней рабочей частоте решетки, для основной поляризации при возбуждении горизонтальной и вертикальной поляризации. В таблице 1 приведены наибольшие относительные рабочие полосы частот $\delta F_{1,5}$, $\delta F_{2,0}$, $\delta F_{3,0}$ по уровню $КСВ_{MAX}$, равному 1,5, 2,0 и 3,0 соответственно, полученные в решетках с заданными максимальными углами отклонения луча Q_{MAX} . Показано, что в линейных антенных решетках из разработанных антенн согласование излучателей в режиме излучения поляризации, перпендикулярной плоскости сканирования, лучше, чем в режиме излучения поляризации, параллельной плоскости сканирования. Чем уже сектор сканирования, тем выше может быть выбран КСВ одиночного излучателя в рабочей полосе частот. Полученные результаты позволяют выбрать необходимые параметры излучателя в зависимости от требуемого сектора сканирования и рабочей полосы частот решетки.

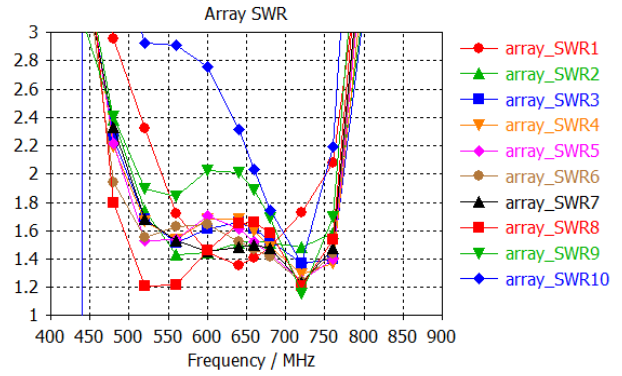
Таблица 1. – Максимальные достигнутые относительные рабочие полосы частот для решеток двухвходовых компактных рамочных антенн

Макс. угол отклонения луча от нормали к решетке	$\delta F_{1,5}$, %			$\delta F_{2,0}$, %			$\delta F_{3,0}$, %		
	Горизонтальная поляризация	Вертикальная поляризация	Обе	Горизонтальная поляризация	Вертикальная поляризация	Обе	Горизонтальная поляризация	Вертикальная поляризация	Обе
$Q_{MAX} = 0^\circ$	25	29	25	39	44	39	51	50	50
$Q_{MAX} = 15^\circ$	11	28	10	34	35	34	50	49	49
$Q_{MAX} = 25^\circ$	5	9	4	19	35	19	41	48	40
$Q_{MAX} = 35^\circ$	1	–	–	7	33	4	40	47	39
$Q_{MAX} = 45^\circ$	–	–	–	1	4	1	26	33	26



а

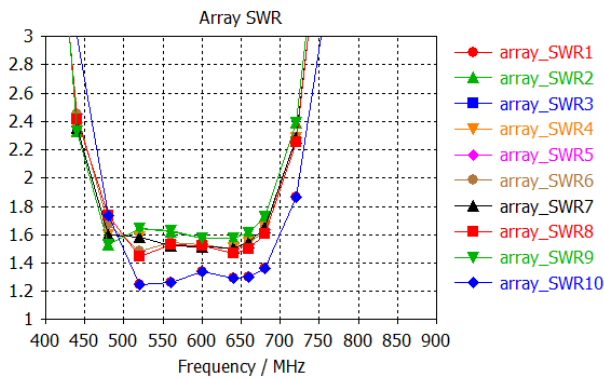
а – $Q_{SCAN} = 0^\circ$;



б

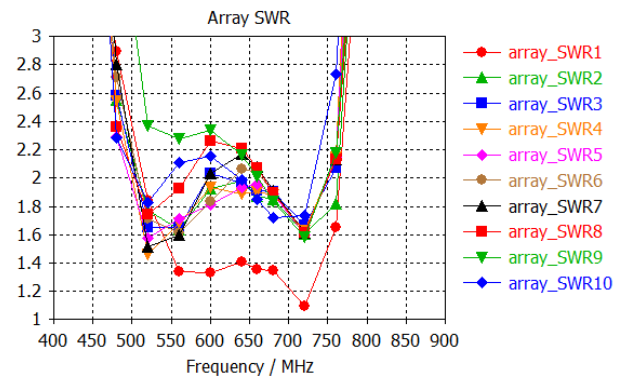
б – $Q_{SCAN} = 45^\circ$

Рисунок 2. – Зависимость КСВ от частоты в излучателях варианта решетки с параметрами $F_{MAX} = 660$ МГц, $K_{CB_{MAX}} = 1,3$ и $Q_{MAX} = 45^\circ$ при возбуждении горизонтальной поляризации



а

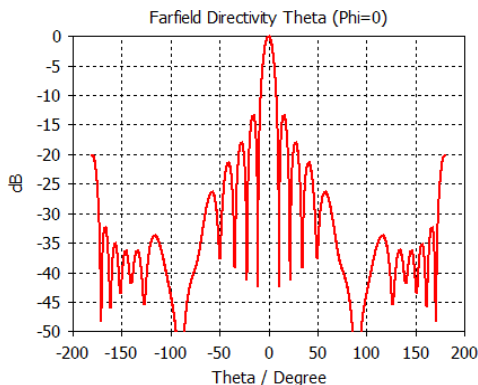
а – $Q_{SCAN} = 0^\circ$;



б

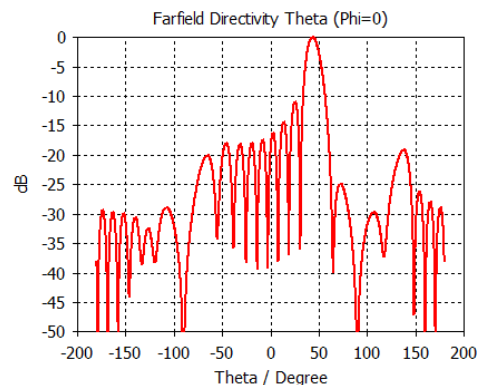
б – $Q_{SCAN} = 45^\circ$

Рисунок 3. – Зависимость КСВ от частоты в излучателях варианта решетки с параметрами $F_{MAX} = 660$ МГц, $K_{CB_{MAX}} = 1,3$ и $Q_{MAX} = 45^\circ$ при возбуждении вертикальной поляризации



а

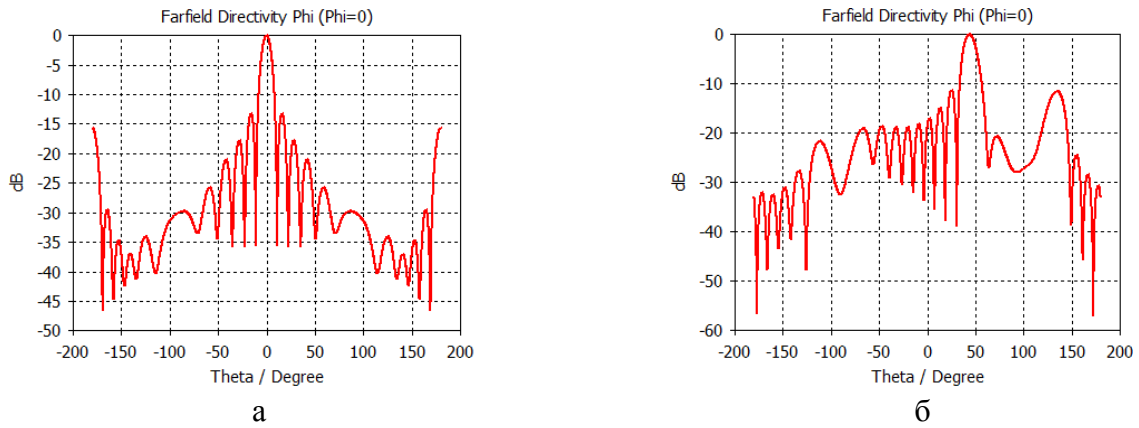
а – $Q_{SCAN} = 0^\circ$;



б

б – $Q_{SCAN} = 45^\circ$

Рисунок 4. – ДН варианта решетки с параметрами $F_{MAX} = 660$ МГц, $K_{CB_{MAX}} = 1,3$ и $Q_{MAX} = 45^\circ$ при возбуждении горизонтальной поляризации

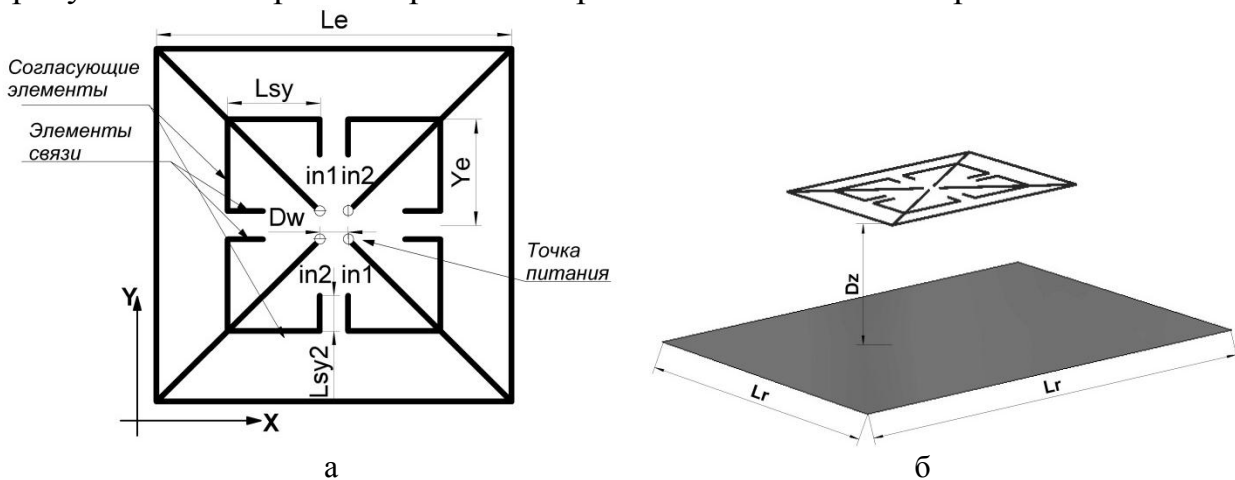


а – $Q_{SCAN} = 0^\circ$;

б – $Q_{SCAN} = 45^\circ$

Рисунок 5. – ДН варианта решетки с параметрами $F_{MAX} = 660$ МГц, $KCB_{MAX} = 1,3$ и $Q_{MAX} = 45^\circ$ при возбуждении вертикальной поляризации

Рассмотрена рамочная антенна с амплитудно-фазовым управлением поляризацией (рисунок 6), являющаяся модификацией компактной двухходовой рамочной антенны, показанной на рисунке 1. Отличием новой модификации является возбуждение взаимно перпендикулярных наклонных поляризаций, повернутых на 45° относительно горизонтальной плоскости. Такой способ возбуждения позволяет одновременно задействовать на полную мощность два передающих тракта при использовании антенны в режимах излучения двух поляризаций: горизонтальной и вертикальной. Представлены результаты исследования диапазонных свойств рамочной антенны с амплитудно-фазовым управлением поляризацией в составе линейных ФАР с широкоугольным сканированием. Показано, что рассмотренная антенна более узкополосна, чем антенна, показанная на рисунке 1. Полученные результаты позволяют выбрать необходимые параметры излучателя в зависимости от требуемого сектора сканирования и рабочей полосы частот решетки.



а – конструкция излучающей части антенны; **б** – общий вид антенны

Рисунок 6. – Конструкция рамочной антенны с амплитудно-фазовым управлением поляризацией

Исследовано влияние согласующе-симметрирующего устройства типа «полуволновая петля» на характеристики компактной рамочной антенны с управляемой поляризацией, показанной на рисунке 1. Предложена модификация этого согласующе-симметрирующего устройства, позволяющая снизить уровень излучения поля с кросс-поляризацией и сделать конструкцию антенны цельнометаллической.

Рассмотрена возможность использования четвертьволновых трансформаторов совместно с симметрирующими устройствами типа «четвертьволновой мостик» и симметрирующим устройством Робертса для питания компактной рамочной антенны с управляемой поляризацией. Решена задача совместной оптимизации размеров таких согласующе-симметрирующих устройств и антенн по минимуму КСВ в относительной полосе частот 25 %. Показано, что в такой полосе частот с помощью компактных рамочных антенн с управляемой поляризацией, запитанных с помощью рассмотренных согласующе-симметрирующих устройств, можно получить согласование не хуже, чем при использовании полуволновой петли. При этом такие согласующе-симметрирующие устройства обеспечивают уровень поля с кросс-поляризацией значительно меньший, чем при использовании полуволновой петли.

На основе результатов, полученных в третьей главе, была разработана методика оптимизации размеров излучателей решеток с широкоугольным сканированием.

В **четвертой главе** рассмотрен вопрос использования спиральных антенн в составе линейных широкополосных антенных решеток с широкоугольным сканированием. Моделирование показало возможность построения фазированных решеток с максимальным углом отклонения главного луча ДН на 50° , работающих в полосе частот 40 %. Максимальное значение КСВ в излучателях решетки плоских спиральных антенн составляет 2.2, а в излучателях решетки из конических спиральных антенн этот параметр не превышает 1.6. На рисунках 7 и 8 показаны диаграммы направленности решетки при углах сканирования 0° и 50° для решетки конических спиральных антенн на верхней рабочей частоте, равной 180 МГц. Достигнутые в процессе диссертационных исследований параметры решетки конических спиральных антенн (коэффициент направленного действия КНД, ширина главного лепестка диаграммы направленности по половинной мощности $2\Theta_{0.5}$, максимальный и средний КСВ в излучателях решетки – $КСВ_{\text{МАХ}}$ и $КСВ_{\text{СР}}$) при различных углах сканирования $\Theta_{\text{СКАН}}$ представлены в таблице 2. Показана возможность применения методики, описанной в третьей главе, для оптимизации геометрических параметров спиральных антенн в составе широкополосной решетки с широкоугольным сканированием.

Таблица 2. – Зависимость параметров решетки конических антенн от угла сканирования и частоты

F, МГц	$\Theta_{\text{СКАН}} = 0^\circ$				$\Theta_{\text{СКАН}} = 50^\circ$			
	КНД, дБ	$2\Theta_{0.5}$	КСВ_{MAX}	КСВ_{CP}	КНД, дБ	$2\Theta_{0.5}$	КСВ_{MAX}	КСВ_{CP}
120	13.9	14	2	1.8	11.9	20	2.8	1.8
150	12.8	12	2.3	2.1	14	17	1.6	1.2
180	14.4	10	2.3	2.2	13.5	15	1.8	1.3

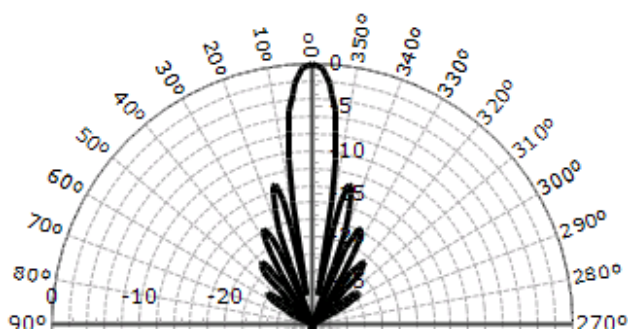


Рисунок 7. – ДН решетки по полному полю на F=180 МГц при угле сканирования 0°

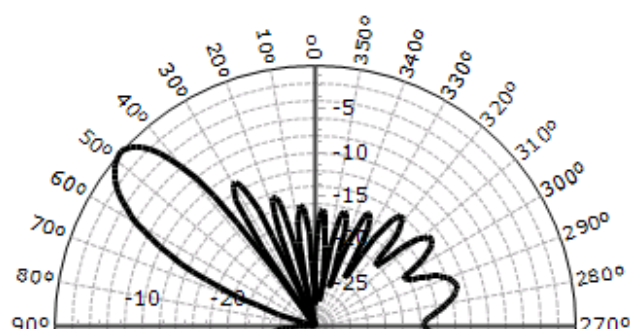


Рисунок 8. – ДН решетки по полному полю на F=180 МГц при угле сканирования 50°

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. С использованием метода интегральных уравнений разработана математическая модель проволочной антенны произвольной формы, позволяющая рассчитывать ее характеристики и параметры как отдельно, так и в составе антенной решетки, а также разработано программное обеспечение, реализующее математическую модель.

2. Разработана методика численного моделирования [12] проволочных антенн и решеток из проволочных излучателей, основанная на комплексном применении трех программ: оригинальной программы WAS, построенной с использованием метода интегральных уравнений в тонкопроволочном приближении, коммерческих программ MMANA-GAL и CST Microwave studio. Методика позволяет: рассчитывать входные сопротивления и КСВ проволочных антенн как отдельных, так и в составе плоской фазированной решетки; рассчитывать диаграммы направленности как для отдельного излучателя, так и для фазированной антенной решетки; оптимизировать размеры излучателей в составе антенных решеток с широкоугольным сканированием. Методика существенно упрощает процесс проектирования фазированных решеток проволочных антенн, сокращая время, затрачиваемое на проектирование, в 2–100 раз в зависимости от сложности антенной решетки.

Результаты сравнения [6–8] расчетных данных, полученных с помощью разработанной программы WAS и программы MMANA, с результатами эксперимента подтверждают адекватность разработанной математической модели.

3. Предложено и исследовано несколько схем построения широкополосных рамочных антенн с управляемой поляризацией [1–8, 11, 13]. Разработанные и оптимизированные конструкции рамочных антенн обладают примерно на 30 % меньшими поперечными размерами и на 1–2 дБ большим КНД по сравнению с описанными в литературе широкополосными вибраторными антеннами с управляемой поляризацией.

4. Благодаря малым поперечным размерам антенн с управляемой поляризацией, предложенных в [3–5], сектор фазового сканирования решеток с такими излучателями увеличен с 30° до 50° по сравнению с описанными в литературе результатами.

5. По сравнению с описанной в литературе рамочной антенной с переключаемой поляризацией, разработанные конструкции рамочных излучателей с управляемой поляризацией [1–8, 11, 13] обладают более чем на 20 дБ меньшим уровнем излучения поля с кросс-поляризацией и на 20 % большей относительной полосой частот, в которой обеспечивается $K_{CB} < 2$.

6. Путем численного моделирования исследованы не описанные ранее в литературе новые закономерности в зависимости электрических характеристик рамочных излучателей и решеток из них от геометрических параметров [1–8, 11, 13]:

- влияние металлических стоек на уровень бокового излучения;
- влияние конфигурации согласующих элементов на уровень излучения с кросс-поляризацией, входное сопротивление и диапазонные свойства антенны;
- взаимосвязь максимального значения K_{CB} одиночного излучателя и параметров антенной решетки с электронным сканированием.

Описанные закономерности, а также приведенные размеры оптимизированных антенн позволяют существенно упростить их проектирование.

7. Предложены и исследованы новые модификации широкополосных согласующе-симметрирующих устройств [15, 16], построенных на основе коаксиальных линий и предназначенных для питания широкополосных рамочных антенн с управляемой поляризацией. Предложенные конструкции согласующе-симметрирующих устройств позволяют строить цельнометаллические антенны, имеющие в относительной рабочей полосе 25 % K_{CB} не более 1.3 и уровень поля с кросс-поляризацией не более –40дБ. Предложенные устройства по сравнению с согласующе-симметрирующими

устройствами типа широкополосный трансформатор-линия, более технологичны и могут выдерживать более высокую подводимую мощность.

8. Исследованы возможности построения широкополосных антенных решеток [4] с широкоугольным сканированием, в качестве излучателей которых использованы разработанные рамочные антенны с управляемой поляризацией. Показано, что разработанные антенны могут быть использованы в качестве излучателей антенных решеток с сектором сканирования до 100° и работающих в относительной полосе частот до 50 %. Чем уже сектор сканирования, тем выше может быть выбран КСВ одиночного излучателя в рабочей полосе частот. С расширением сектора сканирования требования к согласованию отдельного излучателя ужесточаются. Приведенные результаты моделирования позволяют выбрать необходимые параметры согласования излучателя в зависимости от требуемого сектора сканирования и рабочей полосы частот решетки, что существенно упрощает процесс проектирования широкополосных фазированных решеток рамочных излучателей с управляемой поляризацией.

9. Результаты, полученные в диссертации, позволили разработать методику оптимизации геометрических параметров рамочных антенн с управляемой поляризацией, используемых в составе широкополосных антенных решеток с широкоугольным сканированием. Использование этой методики позволяет существенно упростить проектирование таких антенных решеток [4].

10. Предложена конструкция широкополосной вибраторной антенны бегущей волны с управляемой поляризацией [14]. Антенна имеет примерно такие же диапазонные свойства, как и описанные в тексте диссертации рамочные антенны с управляемой поляризацией, но обладает большими габаритами, что ограничивает ее применение в решетках с широкоугольным сканированием. Указанная антенна по сравнению с рамочными антеннами имеет более простую конструкцию и может использоваться либо в качестве отдельной антенны, либо в составе синфазной антенной решетки.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные антенны компактны, широкополосны и могут использоваться в радиотехнических системах различного назначения, в частности, радиолокации, мобильной связи с поляризационным разнесением и ММО-системах.

Конструкция предложенной в работе двухвходовой рамочной антенны с управляемой поляризацией, разработанная программа численного моделирования и полученные с помощью нее результаты были использованы

при выполнении НИОКР «Разработать радиотехнические средства для мониторинга снежно-ледяного покрова и атмосферы в полярных районах» по государственной программе «Мониторинг полярных районов Земли и обеспечение деятельности арктических и антарктических экспедиций» в НИЛ 11.1 «Радиолокационные системы» БГУИР.

Результаты исследования антенных решеток рамочных излучателей с управляемой поляризацией были использованы в НИР «Разработка фазированной антенной решетки» при выполнении Части В Контракта от 22.09.2016 № 160207-08МВУ0063 между РНПУП «Центр радиотехники НАН Беларуси» и зарубежным заказчиком. С помощью разработанных программ и методики проектирования была разработана линейная антенная решетка с широкоугольным сканированием.

Предложенная автором конструкция компактной широкополосной рамочной антенны с управляемой поляризацией и полученные в ходе диссертационного исследования результаты численного моделирования широкополосных решеток с широкоугольным сканированием, состоящих из рамочных антенн с управляемой поляризацией, были использованы в ОАО «КБ РАДАР» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации» при выполнении эскизного проекта на составную часть опытно-конструкторской работы «Разработка антенного устройства с переключаемой поляризацией» (шифр «PASSPORT»), в рамках выполнения договора № 48-17 от 21.11.2017, заключенного на основании контракта от 30.06.2017 г. № 17ВУ11У122ЗУ. Результаты диссертационного исследования использовались при выборе одиночного излучателя антенной решетки для радиолокатора метрового диапазона с управляемой поляризацией. На основании проведенных исследований разработана линейная фазированная антенная решетка рамочных антенн с управляемой поляризацией метрового диапазона.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Юрцев, О. А. Новая модификация рамочной антенны / О. А. Юрцев, Ю. Ю. Бобков, В. В. Кеда // Доклады БГУИР. – 2015. – № 6(92). – С. 30–35.
2. Кеда, В. В. Рамочная антенна с управляемой поляризацией / В. В. Кеда, А. В. Рубаник, Г. П. Турук // Электроника инфо. – 2016. – № 6(132). – С. 53–58.
3. Кеда, В. В. Широкополосная компактная рамочная антенна с управляемой поляризацией / В. В. Кеда // Доклады БГУИР. – 2018. – № 1. – С. 5–11.
4. Кеда, В. В. Фазированные линейные антенные решетки рамочных антенн с управляемой поляризацией / В. В. Кеда // Доклады БГУИР. – 2018. – № 3. – С. 47–52.
5. Кеда, В. В. Рамочная антенна с амплитудно-фазовым управлением поляризацией / В. В. Кеда // Наука и военная безопасность. – 2018. – № 1. – С. 45–49.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

6. Рамочная антенна с переключаемой поляризацией / Ю. Ю. Бобков, И. С. Садовский, О. А. Юрцев, В. В. Кеда // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. ст. IV Всероссийской науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 1–4 июня, 2015 г. – СПб.: СПбГЭТУ, 2015. – С. 262–266.
7. Кеда, В. В. Рамочная антенна с переключаемой поляризацией / В. В. Кеда, Ю. Ю. Бобков, О. А. Юрцев // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., Казань, 21–25 сентября 2015 г. / под общ. ред. В. А. Неганова и Г. А. Морозова. – Казань: Новое знание, 2015. – С. 60–62.
8. Кеда, В. В. Двухвходные рамочные антенны с низким уровнем поля с ортогональной поляризацией / В. В. Кеда, И. С. Садовский, О. А. Юрцев // Радиолокация, навигация, связь: материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 19–21 апреля 2016 г. – Воронеж, 2016. – С. 794–801.
9. Keda, U. V. Linear antenna array with circular polarization and wide-angle scanning / U. V. Keda, O. A. Yurtsev // 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS): materials of a conference, Odessa, Ukraine, September 5–11, 2016. – Odessa, 2016. – P. 234–236.
10. Кеда, В. В. Широкополосная антенная решетка со случайным распределением излучателей в апертуре / В. В. Кеда // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2016: материалы 12-й Междунар.

молодежной науч.-техн. конф., Севастополь, 14–18 ноября 2016 г. – Севастополь, 2016 г. – С. 107.

11. Кеда, В. В. Новая конструкция рамочной антенны / В. В. Кеда // IV Всероссийская микроволновая конференция: материалы конф., Москва, 23–25 ноября 2016 г. – М., 2016. – С. 54–58.

12. Кеда, В. В. Широкополосная с широкоугольным сканированием линейная решетка с круговой поляризацией / В. В. Кеда // IV Всероссийская микроволновая конференция: материалы конф., Москва, 23–25 ноября 2016 г. – М., 2016. – С. 59–62.

13. Кеда, В. В. Линейная антенная решетка рамочных излучателей с переключаемой поляризацией / В. В. Кеда // 7-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения: сб. науч. ст., Минск, 20–22 мая 2017 г.: в 2 ч. – Минск, 2017. – Ч. 2. – С. 111–120.

14. Кеда, В. В. Широкополосная вибраторная антенна бегущей волны с управляемой поляризацией / В. В. Кеда // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. ст. VII Всероссийской науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 2018 г. – СПб.: СПбГЭТУ, 2018 г. – С. 436–439.

15. Keda, U. V. Effect of coaxial balun transformer on characteristics of the compact loop antenna with controllable polarization / U. V. Keda // 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS): materials of a conference, Odessa, Ukraine, September 4–7, 2018. – Odessa, 2018. – P. 384–388.

16. Кеда, В. В. Влияние согласующе-симметрирующих устройств со встроенным четвертьволновым трансформатором на характеристики компактной рамочной антенны с управляемой поляризацией / В. В. Кеда // VI Всероссийская микроволновая конференция: материалы конф., Москва, 28–30 ноября 2018 г. – М., 2018. – С. 179–183.

РЭЗЮМЭ

Кеда Уладзімір Васільевіч

Шырокапалосныя рашоткі драцяных антэн з шырокавугольным сканіраваннем

Ключавыя словы: шырокапалосная фазаваная антэнная рашотка, рамачная антэна з кіруемай палярызацыяй, шырокавугольнае ўзгадненне, спіральная антэна, паўхвалевая пятля, узгадняльна-сіметрыруючая прылада, чвэрцьхвалевы мосцік, двухпалярызацыйная антэна.

Мэта працы: змяншэнне ўзроўню поля па крос-палярызацыі, пашырэнне паласы частот па ўзгадненні і пашырэнне сектара электроннага сканіравання антэнных рашотак рамачных выпраменьвальнікаў з кіруемай палярызацыяй за кошт мадыфікацыі вядомых канструкцый рамачнага выпраменьвальніка, а таксама распрацоўка методик, якія забяспечваюць скарачэнне часу праектавання шырокапалосных рашотак драцяных выпраменьвальнікаў з шырокавугольным сканіраваннем.

Метады даследавання: лікавае мадэліраванне і эксперымент.

Выкарыстаная апаратура. Мадэліраванне праводзілася з дапамогай ноўтбука ASUS K75V з працэсарам i7-3610QM, АЗП аб'ёмам 8 ГБ і аперацыйнай сістэмай Windows 7. Вымярэнні ДН праводзіліся з дапамогай усталёўкі вытворчасці кампаніі GEOZONDAS, якая выкарыстоўвае імпульсны метады вымярэння ДН (у часовай вобласці). Вымярэнне КСВ у макеце двухуваходавай рамачнай антэны праводзілася з дапамогай вектарнага аналізатара Anritsu MS4644A 60 GHz.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацаваны новыя схемы пабудовы рамачных антэн з кіруемай палярызацыяй. Атрыманы заканамернасці пра ўплыў геаметрычных параметраў такіх антэн на іх электрычныя характарыстыкі, а таксама заканамернасці ўзаемадзеяння выпрамяняльнікаў у складзе рашоткі. Распрацавана методика, якая забяспечвае скарачэнне часу праектавання шырокапалосных рашотак драцяных выпраменьвальнікаў з шырокавугольным сканіраваннем.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць ужывання. Атрыманыя ў працы вынікі могуць быць скарыстаны пры праектаванні шырокапалосных антэн і антэнных рашотак з шырокавугольным сканіраваннем. Распрацаваныя антэны з кіраванай палярызацыяй могуць выкарыстоўвацца ў радыёлакацыі, мабільнай сувязі з палярызацыйным разнясеннем і МІМО-сістэмах.

РЕЗЮМЕ

Кеда Владимир Васильевич

Широкополосные решетки проволочных антенн с широкоугольным сканированием

Ключевые слова: широкополосная фазированная антенная решетка, рамочная антенна с управляемой поляризацией, широкоугольное согласование, спиральная антенна, полуволновая петля, согласующе-симметрирующее устройство, четвертьволновой мостик, двухполяризационная антенна.

Цель работы: уменьшение уровня поля по кросс-поляризации, расширение полосы частот по согласованию и расширение сектора электронного сканирования антенных решеток рамочных излучателей с управляемой поляризацией за счет модификации известных конструкций рамочного излучателя, а также разработка методик, обеспечивающих сокращение времени проектирования широкополосных решеток проволочных излучателей с широкоугольным сканированием.

Методы исследования: численное моделирование и эксперимент.

Использованная аппаратура. Моделирование проводилось с помощью ноутбука ASUS K75V с процессором i7-3610QM, ОЗУ объемом 8 ГБ и операционной системой Windows 7. Измерения ДН проводились с помощью установки производства компании GEOZONDAS, использующей импульсный метод измерения ДН (во временной области). Измерения КСВ в макете двухвходовой рамочной антенны проводились с помощью векторного анализатора Anritsu MS4644A 60 GHz.

Полученные результаты и их новизна. Разработаны новые схемы построения рамочных антенн с управляемой поляризацией. Получены закономерности о влиянии геометрических параметров таких антенн на их электрические характеристики, а также закономерности взаимодействия излучателей в составе решетки. Разработана методика, обеспечивающая сокращение времени проектирования широкополосных решеток проволочных излучателей с широкоугольным сканированием.

Рекомендации по использованию и область применения. Полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании широкополосных антенн и антенных решеток с широкоугольным сканированием. Разработанные антенны с управляемой поляризацией могут использоваться в радиолокации, мобильной связи с поляризационным разнесением и MIMO-системах.

SUMMARY

Keda Uladzimir Vasilievich

Wideband wire antenna arrays with wide-angle scanning

Keywords: wideband phased antenna array, loop antenna with controllable polarization, wide-angle matching, spiral antenna, 4:1 half-wave coax balun, balun impedance transformer, folded balun, dual-polarized antenna.

The purpose of the work: cross-polarization field level reducing, extending the matching frequency range and the electronic scanning sector expanding of loop antenna arrays with controllable polarization by modification of known loop antenna constructions, as well as developing techniques that reduce the design time of wide-band wire antenna arrays with wide-angle scanning.

Methods of investigation: numerical simulation and experiment.

Used equipment. The simulation was carried out using an ASUS K75V laptop with an i7-3610QM processor, 8 GB of RAM and Windows 7 operation system. Antenna pattern measurements were carried out using measuring equipment manufactured by company GEOZONDAS, which uses pulse measure method. SWR measurements in the dual-port loop antenna model were carried out by using vector network analyzer Anritsu MS4644A 60 GHz.

The Obtained results and its novelty. New architectures of wideband loop antennas with controllable polarization are designed. The new patterns effect of geometric parameters of these antennas on its electrical characteristics, as well as patterns effect of radiator coupling in composition of antenna array are obtained. The technique that reduces the design time of wide-band wire antenna arrays with wide-angle scanning is developed.

Recommendation on the use and area of application. The results obtained in the work can be used in the design of wideband antennas and antenna arrays with wide-angle scanning. The designed antennas with controllable polarization can be used in radiolocation, mobile communication systems with polarization diversity and MIMO-systems.

Научное издание

Кеда Владимир Васильевич

**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ РЕШЕТКИ ПРОВОЛОЧНЫХ АНТЕНН
С ШИРОКОУГОЛЬНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6