На правах рукописи

Никулина Юлия Сергеевна

Применение радиолинз в задачах полунатурного моделирования объектов, перемещающихся по угловым координатам

Специальность: 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель:	**Степанов Максим Андреевич,** доктор технических наук, доцент.
Официальные оппоненты:	**Шипилов Сергей Эдуардович,** доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра Радиофизики, профессор.
	Денисов Дмитрий Вадимович, кандидат технических наук, Уральский технический институт связи и информатики (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в г. Екатеринбурге, кафедра Информационных систем и технологий, доцент.
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск.

Защита диссертации состоится «29» июня 2021 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.08, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «___» мая 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, доцент Максим Андреевич Степанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В современной радиотехнике, радиолокации, радиосвязи, широко используют полунатурное моделирование. При этом в лабораторных условиях на входе исследуемого устройства формируют сигнально-помеховую смесь, соответствующую его работе в реальных условиях. Наиболее полным и достоверным моделирование получается при формировании электромагнитных полей на апертуре приемной антенны исследуемого устройства. Это позволяет проводить оценку таких свойств исследуемого устройства, работающего совместно с антенной, как: электромагнитная совместимость, пеленгационная и поляризационная селекция, возможность пространственной селекции объектов и т.д.

В этом случае стенд полунатурного моделирования необходимо размещать в радиобезэховой камере. Одним из существенных требований к радиобезэховым камерам является обеспечение дальней зоны для антенны исследуемого устройства. Например, для антенны размером 1 м, при длине волны λ=0.03 м и величине квадратичной фазовой ошибки равной 22.5 градуса, условие дальней зоны $r_{д\ з} > 66.67$ м. То есть требуется камера большого размера, дорогая при разработке и постройке.

Для уменьшения размеров камеры при сохранении условий дальней зоны для антенны исследуемого устройства, перед ней устанавливают коллиматор – радиолинзу. Так как коэффициент преломления электромагнитной волны в материале радиолинзы отличается от воздуха, то на ее поверхностях происходит изменение направления распространения электромагнитной волны. При установке облучающей антенны в фокусе радиолинзы, в ее раскрыве получается плоский фазовый фронт, который соответствует полю в дальней зоне. Исследованием свойств коллиматорных радиолинз, способов их построения в разное время занимались такие ученые как: Бахрак Л.Д., Зелкин Е.Г., Жук М.С., Молочков Ю.Б., Gregson S., Sharma S.K. Основные усилия были

сконцентрированы в области определения поверхностей радиолинз, свойств материалов для их изготовления, согласования с окружающим пространством.

Важно отметить, что в подавляющем большинстве исследований полагается, что облучатель радиолинзы располагается в ее фокусе и радиолинза выполнена из материала со значением относительной диэлектрической проницаемости более двух. Использование таких материалов и обуславливает необходимость согласования радиолинзы с окружающим пространством, требует высокой точности при ее изготовлении. Однако в настоящее время получили довольно широкое распространение газонаполненные материалы, относительная диэлектрическая проницаемость которых близка к единице. Исследование вопросов применения радиолинз из таких материалов для задач полунатурного моделирования не проводилось.

Кроме того, полунатурное моделирование угловых перемещений объекта, например, при отработке радиолокационной станции, осуществляется путем перемещения облучателя радиолинзы, установленной перед антенной исследуемой станции. Очевидно, что это приведет к искажению фазового фронта в ее раскрыве. Следствием этого будет искажение суммарной и разностной диаграмм направленности антенны исследуемой радиолокационной станции и ее пеленгационной характеристики. В конечном счете это приведет к снижению достоверности проводимого полунатурного моделирования. Исследованию этого явления, а также определению путей расширения диапазона перемещения облучателя посвящена диссертационная работа.

Цель работы: обосновать возможность использования коллиматорных радиолинз, изготовленных из материалов с низким значением относительной диэлектрической проницаемости, для задач полунатурного моделирования объектов, перемещающихся по угловым координатам.

Для достижения цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

1. Оценить диапазоны перемещения облучателя одноповерхностной радиолинзы, выполненной из материала с низким значением относительной

диэлектрической проницаемости, в пределах которых искажения диаграммы направленности исследуемой антенны не превысят заданную величину.

2. Сформулировать необходимые условия, для синтеза физически реализуемой бифокальной радиолинзы, выполненной из материала с низким значением относительной диэлектрической проницаемости.

3. Разработать алгоритм для расчета профилей освещенной и теневой поверхностей бифокальной радиолинзы.

4. Развить теоретические результаты до уровня практического применения и провести их экспериментальную апробацию.

Положения, выносимые на защиту:

1. При использовании радиолинз в задачах полунатурного моделирования область допустимых положений облучателя, определенная путем оценки искажения диаграммы направленности исследуемой антенны, шире, чем область, определенная путем оценки искажений только фазового распределения в раскрыве радиолинзы.

2. Использование материалов с низким значением относительной диэлектрической проницаемости для изготовления радиолинз обеспечивает одинаковые распределения амплитуды поля в ее раскрыве при параллельной и перпендикулярной поляризации падающей электромагнитной волны.

3. Бифокальные радиолинзы, синтезированные методом последовательного определения точек освещенной и теневой поверхностей по законам геометрической оптики, обеспечивают фокусировку в заданном диапазоне углов перемещения облучателя, удовлетворяющему условиям физической реализуемости бифокальной радиолинзы. При выходе за пределы диапазона, искажения диаграммы направленности исследуемой антенны резко возрастают.

Научная новизна:

1. Сформулированы условия, при выполнении которых возможен синтез физически реализуемого бифокального линзового коллиматора.

2. Предложен способ определения коэффициентов степенных полиномов, аппроксимирующих освещенную и теневую поверхности бифокальной радиолинзы.

Практическая значимость

Полученные результаты могут найти применение при разработке радиолинз, используемых в комплексах полунатурного моделирования с перемещающимся по угловым координатам облучателем.

1. Для одноповерхностных радиолинз определены диапазоны, в пределах которых возможно перемещение облучателя, при искажениях диаграммы направленности исследуемой антенны, не превышающих заданную величину. Это позволяет использовать в задачах полунатурного моделирования одноповерхностные радиолинзы, облучатель которых может находиться в пределах этих диапазонов.

2. Разработан алгоритм определения поверхностей бифокальной радиолинзы, позволяющий синтезировать радиолинзу, имеющую две точки идеальной фокусировки, не лежащих на главной оптической оси. При расположении облучателя между этими точками, диаграмма направленности антенны исследуемого устройства будет соответствовать дальней зоне.

3. Сформулированы рекомендации по разработке и изготовлению радиолинз из газонаполненных материалов.

4. Разработан и экспериментально исследован макет одноповерхностной радиолинзы из газонаполненного материала с низким значением относительной диэлектрической проницаемости.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовались методы: геометрической оптики, геометрической теории дифракции, теории антенн, компьютерного моделирования, экспериментальные измерения электромагнитного поля.

Личный вклад

Все основные теоретические и практические результаты диссертации получены автором лично. Автором выполнены: обработка и обобщение

полученных результатов, выбор методов исследования, вывод аналитических соотношений, построение и математическое моделирование фазовых искажений в раскрыве радиолинз, вызванных их расфокусировкой. Из 26 опубликованных работ 13 работ написаны в соавторстве. В работах, опубликованных в соавторстве, результаты, связанные с темой работы, получены лично автором.

Достоверность и обоснованность теоретических результатов обеспечивается строгостью применяемого математического аппарата и подтверждением теоретических выводов результатами компьютерного моделирования, положительными результатами исследования и апробации разработанной радиолинзы.

Апробация работы

Основные положение и результаты работы докладывались на следующих научных конференциях: Дни студенческой науки НГТУ-2014, 2015, Новосибирск; Новосибирская межвузовская научная конференция “Интеллектуальный потенциал Сибири”, 2014, 2015 г. Новосибирск; Наука. Технологии. Инновации: всероссийская научная конференция молодых ученых, 2014, 2015, 2016 г., Новосибирск; Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и студентов, посвященной 120-й годовщине Дня радио «Современные проблемы радиоэлектроники», 6–7 мая 2015, г. Красноярск; Международный научный форум молодых ученых «Наука будущего – наука молодых», 29.09-02.10.2015г., Севастополь; 54-я Международная научная студенческая конференция МНСК-2016: Радиотехника, электроника, связь, 16-20 апреля 2016 г., Новосибирск,; Второй Всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего – наука молодых», 20.09-23.09.2016г., Казань; XIII международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения, АПЭП - 2016», 4 октября 2016, Новосибирск; Всероссийская научно-техническая конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Промышленность. Оборона», 19-21 апреля 2017, Новосибирск; Международный салон изобретений и инновационных технологий «Архимед»-2017, 16-19 мая 2017, Москва;

Всероссийский молодежный образовательный форум «Территория смыслов на Клязьме 2017», Владимирская область, 05-11 июля 2017; Третий Всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего – наука молодых», 12.09-14.09.2017г., Нижний Новгород; Всероссийская научно-техническая конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Промышленность. Оборона», 17-19 апреля 2019, Новосибирск.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 180 наименований и двух приложений. Текст диссертации изложен на 148 страницах, содержит 34 рисунка и 15 таблиц.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 26 работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 2 публикации в изданиях, входящих в международные библиографические системы Scopus или Web of Science, 18 публикаций в других научных изданиях. Получен патент РФ на изобретение.

Внедрение результатов исследования

Получен патент на способ определения коэффициентов полиномов освещенной и теневой поверхности бифокальной радиолинзы и два акта о внедрении.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первом разделе** дан обзор исследований по решаемым вопросам, сформулированы цель и основные задачи работы и намечены пути их решения.

Проведен сравнительный анализ диэлектриков с точки зрения их пригодности для изготовления линзовых коллиматоров. Показано, что радиолинзы, изготовленные из материалов с низким коэффициентом преломления: 1) обладают низкими требованиями к точности изготовления; 2) обеспечивают меньшие потери на отражение и в материале линзы. Минусами использования таких материалов являются: 1) большая толщина коллиматора, которая препятствует его использованию при относительно малых фокусных

расстояниях; 2) малые углы перемещения облучателя радиолинзы. Для устранения последнего недостатка предлагается рассмотреть вопрос применения апланатических радиолинз, описанных в оптике.

Рассмотрена геометрия одноповерхностных и двухповерхностных бифокальных радиолинз. Приведен обзор наиболее распространенных методов синтеза бифокальных линз. Показано, что данные методы являются трудоемкими, приближенными и не всегда позволяют получить аналитическое решение. Важно отметить, что не каждый набор начальных параметров позволяет получить набор точек, аппроксимирующих поверхности линзового коллиматора. Следовательно, на сегодняшний день, метода, позволяющего аналитически определить поверхность линзового коллиматора, не было получено, а формы фазового фронта в раскрыве линзового коллиматора при выносе облучателя из точек его фокуса не исследованы.

Рассмотрены критерии качества фокусировки радиолинз: искажения фазового фронта в раскрыве радиолинзы; искажение амплитудного фронта в раскрыве радиолинзы; искажение формы суммарной и разностной диаграмм направленности антенны исследуемого устройства (интегральная ошибка).

Получены пороговые значения интегральной ошибки для суммарной и разностной ДН исследуемой антенны для различных амплитудных распределений, что может быть использовано при оценке качества фокусировки линзового коллиматора.

Второй и третий разделы посвящены исследованию одноповерхностных и бифокальных диэлектрических линзовых коллиматоров.

Во **втором разделе** рассчитаны амплитудные и фазовые распределения в раскрыве одноповерхностной радиолинзы при ее расфокусировке и на их основе приведена оценка допустимых диапазонов перемещения облучателя.

Предложен алгоритм расчета фазового распределения в раскрыве одноповерхностной радиолинзы, основанный на определении электрической длины лучей электромагнитной волны от точки расположения облучателя, до

точек, расположенных на раскрыве. Алгоритм основан на законах геометрической оптики и Снеллиуса.

При помощи разработанного алгоритма рассчитано фазовое распределение и исследованы его искажения (рис. 1), обусловленные расфокусировкой радиолинзы, вызванной перемещением облучателя вдоль и поперек главной оптической оси. На рисунке 1 введены обозначения: σ - координата облучателя, нормированная к фокусному расстоянию; δ - угол между главной оптической осью радиолинзы и направлением на облучатель. Красным показаны фазовые фронты с радиолинзой, черным – без.

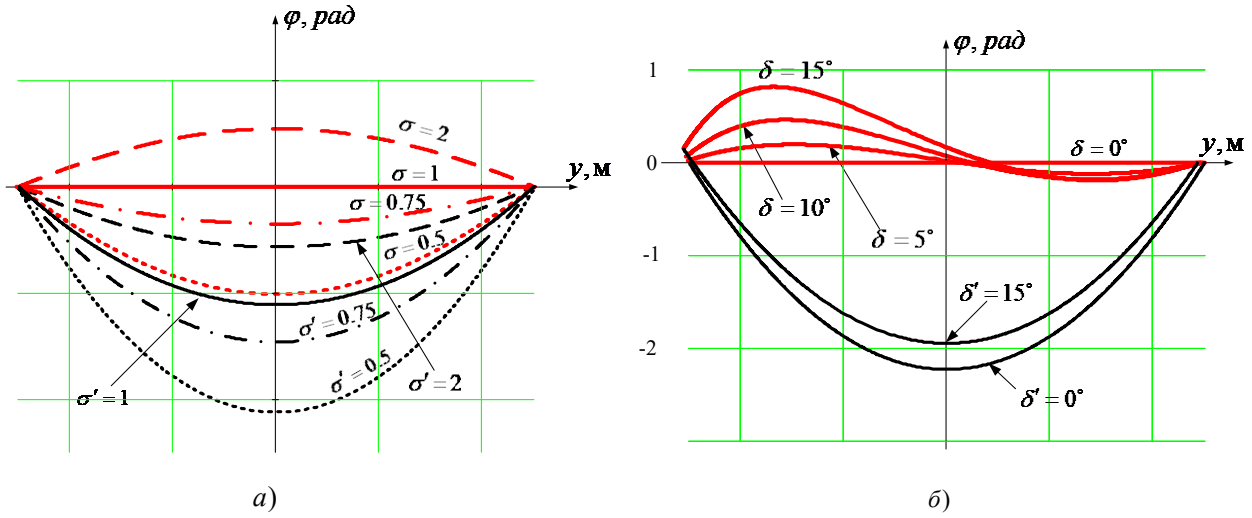

Рисунок 1 – Фазовые фронты в раскрыве исследуемой антенны при расфокусировке радиолинзы: а) перемещение облучателя вдоль главной оптической оси; б) перемещение облучателя поперек главной оптической оси

Установлены допустимые диапазоны перемещения облучателя из положения фокуса для различных материалов при фазовой ошибке в раскрыве радиолинзы в 22.5 градуса, часто используемой в антенной технике как критерий границы дальней зоны. Составлены таблицы, из которых следует, что: 1) при больших геометрических размерах коллиматора и меньших фокусных расстояниях требования к точности установки облучателя более высокие; 2) коллиматоры, изготовляемые из материалов с меньшим коэффициентом преломления, имеют более узкую область допустимых положений коллиматора (примерно $\pm(0.1 \div 0.2) \cdot f$, где f - фокусное расстояние).

Получены выражения, определяющие распределение амплитуды электромагнитного поля в раскрыве исследуемой антенны с учетом затухания в линзе (диссипативных потерь) и потерь на отражение от освещенной и теневой поверхностей для случаев перпендикулярной и параллельной поляризации электромагнитной волны, падающей на радиолинзу. Показано, что форма амплитудного распределения в раскрыве одноповерхностной радиолинзы существенно зависит от диэлектрической проницаемости материала, из которого изготовлена линза. Перемещение облучателя поперек главной оптической оси приводит к существенным изменениям формы амплитудного распределения. Оно становится асимметричным. На основе полученных зависимостей произведен расчет амплитудного распределения в раскрывах радиолинз. Показано, что использование материалов с низким значением относительной диэлектрической проницаемости для изготовления радиолинз, обеспечивает одинаковые амплитудные распределения для параллельной и перпендикулярной поляризации падающей электромагнитной волны. Для линз из материалов с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости амплитудные распределения различны для параллельной и перпендикулярной поляризации падающей электромагнитной волны. Это объясняется различием коэффициентов отражения падающей электромагнитной волны для параллельной и перпендикулярной поляризации.

По полученным амплитудно-фазовым распределениям определены искажения диаграммы направленности исследуемой антенны, работающей совместно с радиолинзой. Рассмотрена суммарная и разностная диаграммы направленности. Показано, что разностная диаграмма направленности чувствительнее к расфокусировке радиолинзы. Установлено, что допустимый диапазон положений облучателя радиолинзы, определенный с использованием критерия искажений диаграммы направленности исследуемой антенны, шире, чем диапазон, оцененный по критерию кривизны фазового фронта в раскрыве исследуемой антенны. Например, для антенны диаметром 1 метр, работающей на длине волны 0.03 см, определение качества фокусировки только по

искажению фазового фронта в раскрыве радиолинзы приводит к зауженному более чем в 1.15 раза диапазону углов сканирования.

Определены максимальные углы отклонения облучателя, при которых достигается пороговое значение интегральной ошибки, характеризующей искажения диаграммы направленности исследуемой антенны.

В **третьем разделе** решены вопросы, связанные с развитием методов расчета поверхностей бифокальных радиолинз.

На основе взаимосвязи параметров, задаваемых при проектировании бифокального линзового коллиматора (фокусное расстояние, размер апертуры антенны, расстояние от фокуса до главной оптической оси линзы a, а также угол наклона фазового фронта относительно главной оптической оси в раскрыве линзы α), сформулированы условия, выполнение которых необходимо для синтеза физически реализуемого коллиматора. Решение поставленной задачи базируется на свойствах эллипса равных краев и геометрии бифокального линзового коллиматора. Определена взаимосвязь параметров, задаваемых в начале вычислений поверхности линзы. Для параметров бифокальной радиолинзы записаны системы неравенств, выполнение которых гарантирует ее физическую реализуемость.

Предложен метод определения освещенной и теневой поверхностей бифокальной радиолинзы. Основа метода – обеспечение равенства электрических длин лучей, проходящих через линзовый коллиматор, что позволяет определить три и более координат точек освещенной и теневой поверхности. Зная координаты не менее трех точек на каждой из поверхностей, можно аналитически определить по три коэффициента полиномов, аппроксимирующих поверхность линзового коллиматора.

Суть предложенного метода заключается в следующем. Для каждого луча (рис.2, лучи 1-11) составлено выражение, определяющее его электрическую длину в зависимости от координат точек теневой (E, F, G, H) и освещенной поверхности (B, C, D), положения облучателя (O_1 или O_2) и антенны (плоскость $N-N_1$), показателя преломления материала линзы n, угла наклона фазового

фронта в раскрыве радиолинзы α. Из этих выражений на основе закона равенства электрических длин лучей составлены уравнения, по которым можно определить неизвестные координаты точек. Для решения полученных уравнений предложено использовать численные методы, например, градиентного поиска или покоординатного спуска.

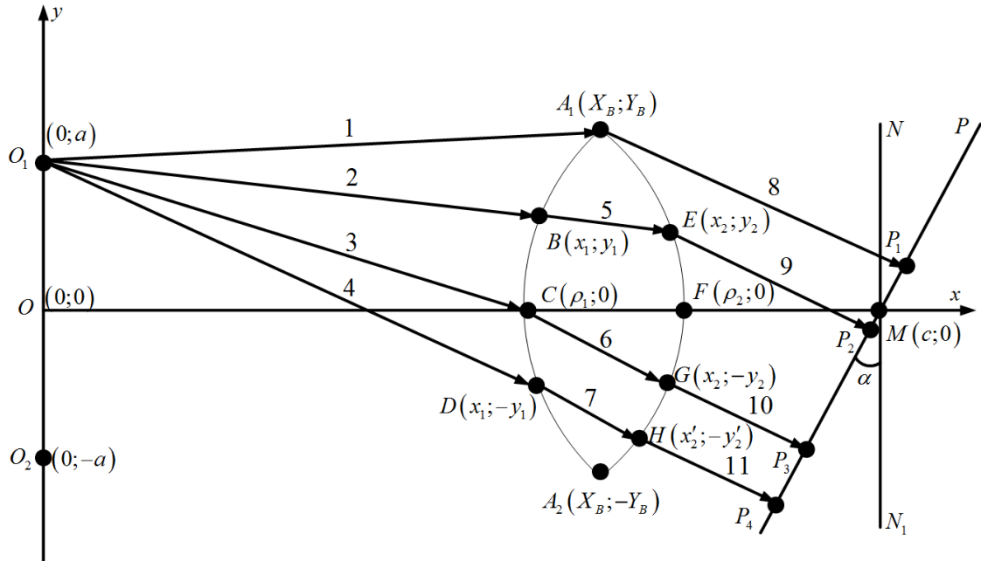

Рисунок 2 – К способу определения поверхностей бифокального линзового коллиматора

Численно решив первое уравнение, записанное для лучей 3, 6 и 10, получим координаты точек C и G. Затем, зная координаты точки G, можно задать симметричную ей точку E (x_2; y_2). Численно решив второе уравнение (записанное для лучей 2,5 и 9), определим координаты точки B (x_1; $-y_1$). Зная координаты точки B(x_1; y_1), можно задаться симметричной ей точкой D (x_1; $-y_1$), и, численно решив третье уравнение (записанное для лучей 4, 7 и 11) , определить координаты точки H(x'_2; y'_2). Подобная итерационная процедура может продолжаться и дальше и может быть найдено большое количество точек, принадлежащих освещенной и теневой поверхностям линзового коллиматора.

Получено аналитическое выражение, позволяющее определить толщину бифокального линзового коллиматора (как разность между координатами точек пересечения теневой (ρ_2; 0) и освещенной (ρ_1; 0) поверхностей радиолинзы и главной оптической оси), что можно использовать в качестве начального

приближения для решения численными методами. Выражение получено в предположении, что луч, падающий на освещенную поверхность линзы в точке ее пересечения с главной оптической осью, после преломления распространяется вдоль главной оптической оси:

$$\rho_2(\rho_1)=\frac{\left(\sqrt{X_B^2+(Y_B-a)^2}-X_B\cos(\alpha)+Y_B\sin(\alpha)-\sqrt{\rho_1^2+a^2}\right)k_1+k_2\cdot\rho_1}{k_2-k_1\cos(\alpha)}.$$

Здесь (X_B ; Y_B) – координата вершины линзы, определяемая из эллипса равных краев (по методу Джента-Штернберга), (0;a) – координата облучателя, α – угол наклона фазового фронта (прямая P) в раскрыве линзы относительно апертуры исследуемой антенны, которая располагается в точке с координатой М (с;0), n - показатель преломления, k_1 и k_2 - волновые числа для среды, в которой находится коллиматор и для материала, из которого он изготовлен.

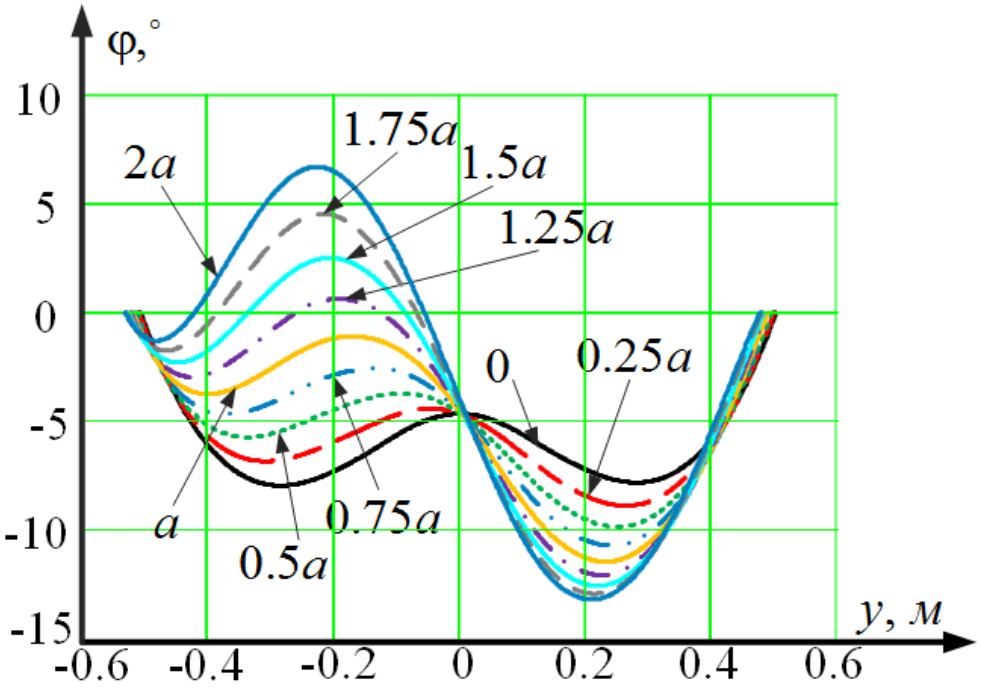

Рисунок 3 – Фазовые фронты в раскрыве бифокальной радиолинзе при отклонениях облучателя поперек главной оптической оси

С использованием предложенного алгоритма рассчитан гипотетический бифокальный линзовый коллиматор из материала с низким значением относительной диэлектрической проницаемости (экструдированный

пенополистирол, $\varepsilon_r = 1.047$). На его примере установлено, что величина фазовой ошибки (рис. 3) в раскрыве коллиматора слабо зависит от положения облучателя в пределах $\pm 2 \cdot a$. При этом величина фазовой ошибки не превысит 22.5 градусов, интегральная ошибка, характеризующая искажения диаграммы направленности, будет менее $9.6 \cdot 10^{-4}$, что практически соответствует ДН в дальней зоне.

Четвертый раздел посвящен развитию полученных в разделах 2 и 3 теоретических результатов в направлении их практического использования.

Проанализированы вопросы, связанные с практической реализацией радиолинз из газонаполненных материалов. Рассмотрены виды газонаполненных материалов, показаны преимущества поропластов, в частности, экструдированного пенополистирола: однородность, отсутствие переотражений, возможность изменять плотность материала, легкость обработки, длительный срок службы и т.д. Представлены способы соединения листов в единую форму. Предложена и реализована последовательность действий, выполнив которую можно изготовить радиолинзу из листов газонаполненного материала с учетом их формы и геометрических размеров. По предложенной технологии изготовлено две радиолинзы (диаметром 1.1 и 0.5 метра). Они изображены на рис. 4.

а)

б)

Рисунок 4 – Изготовленные из экструдированного пенополистирола радиолинзы диаметром: а) 1.1 метра; б) 0.5 метра

Проведены исследования малой радиолинзы с помощью сканера электромагнитных поля производства «ТРИМ Сверхширокополосные системы» для X-диапазона в ближней зоне. Получены два амплитудно-фазовых распределения поля в раскрыве: без использования радиолинзы и с ее использованием. Сечения фазовых распределений приведены на рис. 5.

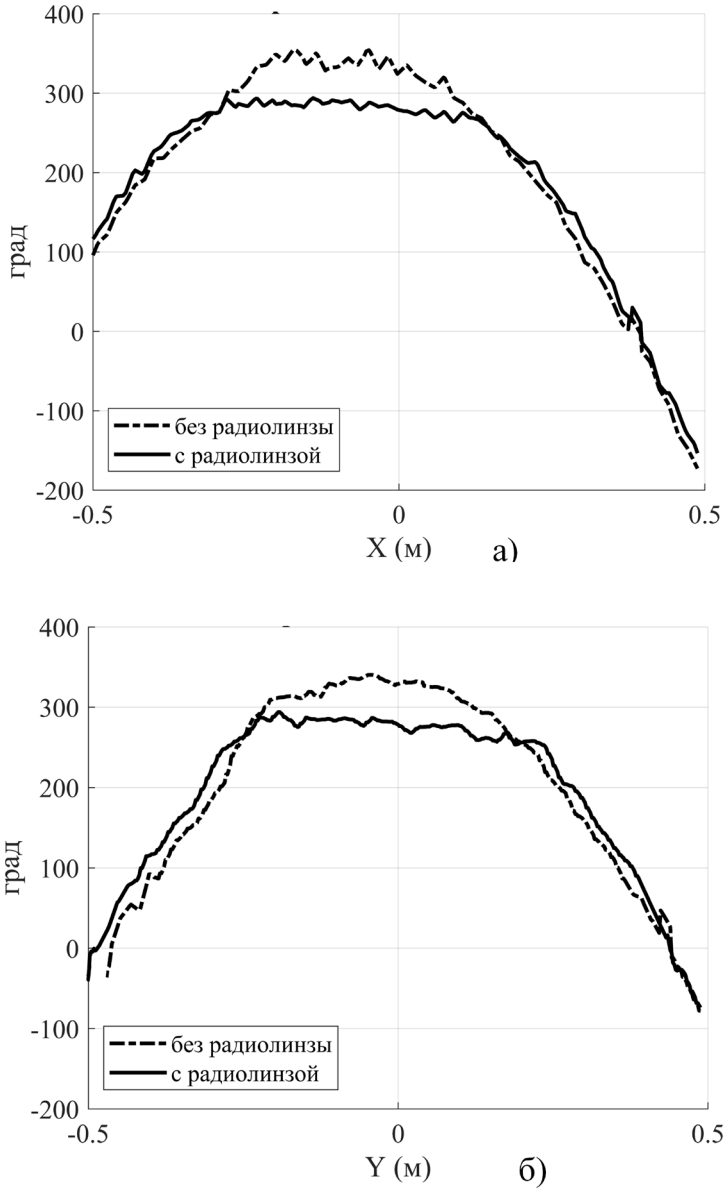

Рисунок 5 – Сечения фазового фронта: а – горизонтальное; б – вертикальное

Экспериментально подтверждено, что использование радиолинзы, выполненной из газонаполненного материала по предложенной технологии, приводит к выравниванию фазового фронта в ее раскрыве.

Амплитудное распределение с радиолинзой и без нее одинаково и практически равномерно.

ДН, рассчитанная по измеренному амплитудно-фазовому распределению поля, близка по форме к ДН, рассчитанной для дальней зоны и показана на рис. 6. Максимумы изображенных ДН совмещены, т. е. скомпенсирован линейный наклон фазового фронта в раскрыве радиолинзы, вызванный неточным позиционированием вспомогательной антенны относительно точки фокуса. Таким образом, подтверждено, что использование радиолинзы из газонаполненного материала приближает форму диаграммы направленности к виду, характерному для дальней зоны.

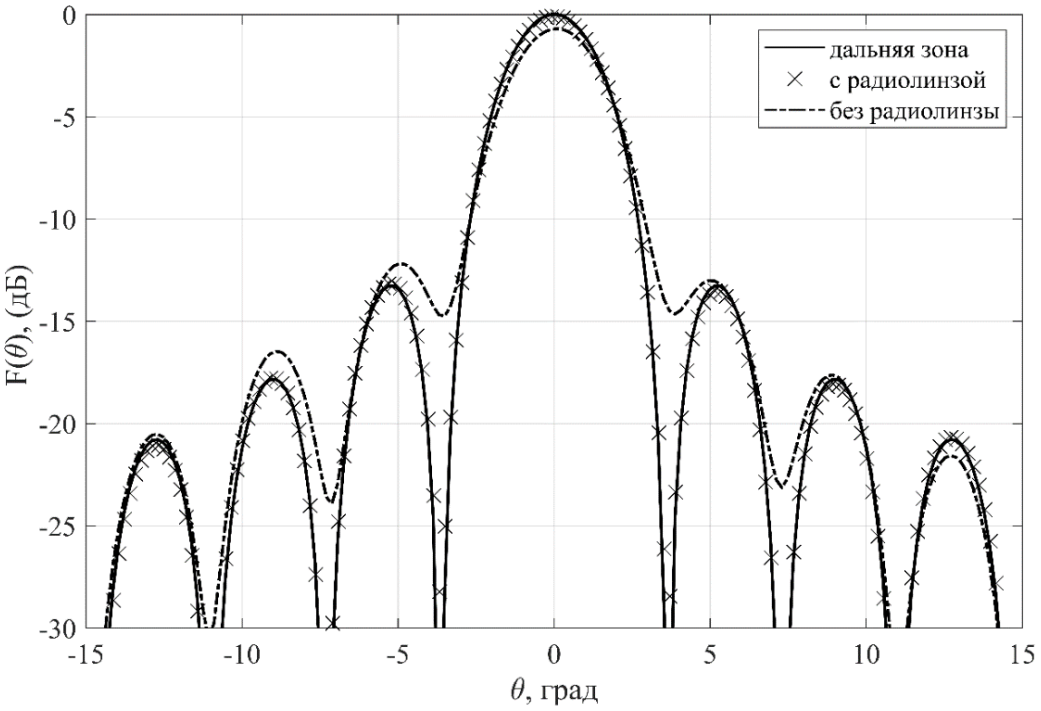

Рисунок 6 – Сечение диаграммы направленности $F(\theta)$ в горизонтальной плоскости для измеренного амплитудно-фазового распределения в раскрыве радиолинзы

Для количественной оценки искажений формы ДН рассчитаны значения интегральных ошибок для рассмотренных горизонтального и вертикального сечений суммарной и разностной диаграмм направленности. Показано, что при использовании радиолинзы они не превышают пороговых значений, полученных в 1 разделе.

В **заключении** приведены основные результаты работы. В **приложении** приведен акт о внедрении основных результатов работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе обоснована возможность использования радиолинз, изготовленных из материалов с низким значением относительной диэлектрической проницаемости, для задач полунатурного моделирования объектов, перемещающихся по угловым координатам.

1. Рассмотрены критерии качества фокусировки радиолинз: форма фазового и амплитудного распределений в раскрыве и искажения диаграммы направленности исследуемой антенны. Для них определены предельно допустимые значения ошибок, проявляющихся при расфокусировке радиолинзы.

2. Показано, что использование материалов с низким значением относительной диэлектрической проницаемости для изготовления радиолинз, обеспечивает одинаковые амплитудные распределения при параллельной и перпендикулярной поляризациях падающей электромагнитной волны. Для линз из материалов с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости амплитудные распределения различны для горизонтальной и вертикальной плоскостей. Это объясняется различием коэффициентов отражения падающей электромагнитной волны для параллельной и перпендикулярной поляризации.

3. При использовании радиолинз для задач полунатурного моделирования, диапазон перемещения ее облучателя необходимо определять исходя из предельно допустимых искажений диаграммы направленности антенны исследуемого устройства. Определение качества фокусировки только по

искажению фазового фронта в раскрыве радиолинзы приводит к зауженному диапазону углов сканирования.

4. Сформулированы условия, при выполнении которых возможен синтез физически реализуемого бифокального линзового коллиматора.

5. Предложен метод определения коэффициентов степенных полиномов, аппроксимирующих теневую и освещенную поверхности линзового коллиматора. Основа метода – обеспечение равенства электрических длин лучей, проходящих через линзовый коллиматор в разных точках.

Полученные теоретические результаты имеют практическое значение для разработки радиолинз, в том числе, используемых в комплексах полунатурного моделирования объектов, перемещающихся по угловым координатам.

1. Разработан алгоритм определения поверхностей бифокального линзового коллиматора. С его использованием рассчитан гипотетический линзовый коллиматор из материала с низким значением относительной диэлектрической проницаемости. На его примере установлено, что величина фазовой ошибки в раскрыве коллиматора слабо зависит от положения облучателя в пределах $\pm 2 \cdot a$.

2. Рассмотрены вопросы изготовления радиолинз из газонаполненных материалов. Предложен алгоритм изготовления радиолинзы с учетом типовой формы выпуска газонаполненных материалов. Проведены экспериментальные исследования радиолинз из газонаполненных материалов. Показано, что радиолинзы, изготовленные из газонаполненных материалов, выравнивают фазовый фронт в своем раскрыве.

Полученные в работе результаты дают основание утверждать, что решена задача, имеющая существенное значение для разработки радиолинз для комплексов полунатурного моделирования.

Теоретические результаты доведены до уровня рекомендаций по разработке радиолинз из газонаполненных материалов с низким значением относительной диэлектрической проницаемости.

Разработаны радиолинзы для задач полунатурного моделирования.

Дальнейшие научные исследования могут быть направлены на разработку методов синтеза полифокальных апланатических радиолинз, оценку возможности использования для задач полунатурного моделирования ускоряющих линз.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. Никулина Ю.С., Степанов М.А. Расчет фазового фронта в раскрыве линзового коллиматора и соответствующей ему диаграммы направленности. Вопросы радиоэлектроники, 2016. №4 С.40–46.

2. Никулина Ю.С., Никулин А.В., Степанов М.А. Расчет коэффициентов полиномов, аппроксимирующих поверхности бифокального линзового коллиматора // Вопросы радиоэлектроники, 2018. №4. С. 29–33.

3. Никулина Ю.С. Алгоритм расчета поверхностей бифокального линзового коллиматора // Вопросы радиоэлектроники, 2019. № 4. С. 53–59.

4. Никулина Ю.С., Степанов М.А., Тырыкин С.В., Никулин А.В. Экспериментальные исследования радиолинзы из газонаполненного материала// Вопросы радиоэлектроники, 2020. №4. С. 32–38.

5. Никулина Ю.С., Степанов М.А. Необходимые условия физической реализуемости бифокального линзового коллиматора// Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации, 2020. № 1-2 С. 68–78.

Публикации в изданиях, включенных в международные базы данных цитирования Web of Science или Scopus:

1. Nikulina Y.S., Stepanov M.A., "Permissible deviation ranges of a collimating lens irradiator," 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, 2016, pp. 184-186.

2. Nikulina Y.S., Stenanov M.A., "The Criteria of Antenna Pattern Distortion Estimation," 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, 2018, pp. 426-428.

Патент на изобретение в РФ:

Патент № 2715914, Российская Федерация, МПК H01Q15/08. Способ определения поверхности диэлектрической бифокальной линзовой антенны / Никулина Ю. С., Степанов М. А; № 2019116585; заял. 29.05.19; опубл. 2020.03.04.

Публикации в других научных изданиях:

1. Воробьёва Ю.С., Киселев А. В. К вопросу о выборе материала для изготовления линзового коллиматора// Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн конф., посвящ. 119 годовщине Дня радио, Красноярск: СФУ, 2014. С. 31–35.

2. Воробьёва Ю.С. Выбор материала для изготовления линзового коллиматора// Дни науки НГТУ: материалы научной студенческой конференции, Новосибирск: НГТУ, 2014. С. 25–26.

3. Воробьёва Ю.С., Степанов М.А. Поиск материала для изготовления линзовых коллиматоров// Современные проблемы технических наук: сб. тез. докл. Новосиб. межвуз. науч. студен. конф. «Интеллектуальный потенциал Сибири», Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2014 Ч. 1. С. 31–32.

4. Воробьёва Ю.С. Оценка фазового фронта в раскрыве линзового коллиматора// Наука. Технологии. Инновации: - Новосибирск: НГТУ, 2014. – Ч. 11. С. 27-30.

5. Воробьёва Ю.С., Степанов М.А. Расчёт фазовых ошибок в раскрыве одноповерхностного линзового коллиматора// Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн конф., посвящ. 120 годовщине Дня радио, Красноярск, 6–7 мая 2015 г. – Красноярск: СФУ, 2015. – С. 30–34.

6. Воробьёва Ю. С. Диэлектрические линзовые коллиматоры// Дни науки НГТУ: Новосибирск: НГТУ , 2015. С. 17–18.

7. Воробьёва Ю. С. Влияние положения облучателя на фазовый фронт в раскрыве коллиматора// Современные проблемы технических наук: Новосибирск: НГАСУ, 2015. С. 18–19.

8. Воробьёва Ю.С. Расчет фазовых ошибок в раскрыве одноповерхностного линзового коллиматора// Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых» – Севастополь: Инкосалт-К, 2015. – Том 2, 447 с.

9. Никулина Ю.С. Диаграмма направленности и фазовый фронт в раскрыве линзового коллиматора из экструдированного пенополистирола при различных отклонениях облучателя// Наука. Технологии. Инновации Новосибирск: НГТУ, 2015. С. 33-34.

10. Никулина Ю.С. Расчёт диаграммы направленности и фазового фронта в раскрыве линзового коллиматора при различных отклонениях облучателя// Электронные средства и системы управления: Томск: В-Спектр, 2015. С. 29-32.

11. Никулина Ю.С., Степанов М.А. Влияние поляризации падающей волны на амплитудное распределение в раскрыве диэлектрического коллиматора // Труды XIII международной научно-технической конференции актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП -2016, Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016. С. 44–46.

12. Никулина Ю.С. Влияние вида поляризации электромагнитной волны на амплитудное распределение в раскрыве коллиматора// МНСК-2016: Радиотехника, электроника, связь, Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2016. С. 42-43.

13. Никулина Ю.С. Разработка линзового коллиматора из экструдированного пенополистирола повышенной плотности// Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых» Казань: Инкосалт К, 2016. Т. 2. С. 255-256.

14. Никулина Ю. С. Допустимые диапазоны перемещения облучателя диэлектрического линзового коллиматора// Наука. Технологии. Инновации Новосибирск: НГТУ, 2016. Ч.6. С. 44-45.

15. Никулина Ю. С., Степанов М.А. Расчёт поверхности бифокального линзового коллиматора с использованием целевой функции// Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов посвящ. 122-й годовщине Дня радио, Красноярск 4–5 мая 2017 г. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. С. 83–86.

16. Никулина Ю.С., Степанов М.А. Целевая функция для определения толщины бифокальной линзы// Наука Промышленность Оборона: – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. Т. 2. С. 262-266.

17. Никулина Ю.С. Разработка линзовых коллиматоров// Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых» – Нижний Новгород, 2017. С. 506-507.

18. Никулина Ю.С. Неравенства для определения начальных параметров бифокальной линзовой антенны// Наука. Промышленность. Оборона: Том 2 – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. Т. 2. С. 249–254.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.
Тел/факс (383) 346-08-57.
Формат 60 х 84/16. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ 451. Подписано в печать 23 апреля 2021 г.