

На правах рукописи



Меньших Николай Леонидович

**Исследование формирования распределения
электромагнитного поля, близкого к полю плоской
волны, в рабочей зоне безэховой камеры**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре электродинамики сложных систем и нанофотоники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: к.т.н. доцент **Балабуха Николай Павлович**, заведующий лабораторией ФГБУН «Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН», г. Москва.

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н. проф. **Боголюбов Александр Николаевич**, профессор кафедры математики ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», г. Москва;

к.т.н. **Титаренко Андрей Витальевич**, заместитель начальника НИО-1 ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений РАН», г. Москва.

Ведущая организация: Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники РАН им. В.А. Котельникова», г. Фрязино.

Защита состоится 20 февраля 2020 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.131.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» по адресу 119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78, ауд. Д-117.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РТУ МИРЭА и на сайте <https://www.mirea.ru/science-and-innovation/dissertation-tips/dissertational-council-d-212-131-01/>

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н. доцент



Стариковский А.И.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Основной задачей радиолокации является обнаружение объекта. Особенно остро вопрос возможности обнаружения объекта стоит при проведении работ по разработке стелс объектов. Для этого необходимо знать характеристики рассеяния или излучения объекта, такие как эффективная площадь рассеяния (ЭПР) или диаграмма направленности (ДН). Достоверные знания об объекте могут быть получены теоретически или экспериментально. Несмотря на развитие компьютерной техники и численных методов, без измерений характеристик объекта полностью обойтись нельзя. Это обусловлено сложностью формы поверхности, наличием взаимосвязи между элементами конструкции, и сложностью описания характеристик материалов, которыми часто покрыты исследуемые объекты. Поэтому для решения комплексной задачи требуются измерительные стенды с высоким уровнем точности измерений.

На точность измерений влияют несколько факторов [1, 2]. Например, отражение от стенок, пола и потолка безэховой камеры (БЭК), прямое прохождение сигнала из излучателя в приемник, сигнал, отраженный от опорно-поворотного устройства, шумы приборов. Одна из самых больших ошибок измерения связана с неравномерностью падающего поля. Считается, что измерения на стендах проводятся при падении плоской волны. На практике важно знать рассеяние волны в дальней зоне излучателя, т.е. при падении локально-плоской волны. Понятие плоской волны не привязано к конкретным стендам, что позволяет сравнивать между собой измерения на разных стендах и расчеты, если таковые имеются. Сформировать плоскую волну невозможно, поэтому будем говорить о квазиплоской волне.

Ввиду большой стоимости измерительного стенда, актуально проведение исследований его характеристик с целью поиска возможных улучшений, коррекции конструкции элементов стенда. Поэтому большой интерес представляет создание математической модели БЭК, которая позволяет определить неравномерность поля в рабочей зоне камеры (области, где

распределение электромагнитного поля близко к распределению поля плоской волны).

В последнее время увеличивается потребность в исследовании объектов в диапазоне метровых длин волн, в частности, антенн, что делает актуальной задачу разработки измерительных стендов этого диапазона [3]. Для метровых длин волн почти безальтернативным измерительным стендом закрытого типа является рупорная камера [2]. Создание линзового коллиматора на основе такой камеры требует предварительного моделирования, потому что на сегодняшний день измерительных стендов такого типа в мире нет. Все параметры линзы реально достижимы за счет возможностей композитного материала [4]. Для уже работающих стендов актуальна задача поиска возможностей расширения их рабочей зоны и уменьшения неравномерности амплитуды и фазы поля в ней. Это позволяет проводить исследование объектов больших размеров или объектов прежних размеров, но с большей точностью [5].

Объект исследования. В работе рассматривается задача формирования квазиплоской волны в двух измерительных стендах: низкочастотной рупорной камере и в компактном полигоне. Эти стенды дополняют друг друга и обеспечивают возможность проведения экспериментальных исследований в широкой полосе частот (100 МГц - 1 ГГц для рупорной камеры, 1 - 40 ГГц для компактного полигона). Плоская волна формируется фазовым корректором: в рупорной камере – линзой, в компактном полигоне – зеркалом. Оба стенда предназначены для антенных измерений и измерений ЭПР объектов. Зеркало коллиматора компактного полигона стало постоянным объектом исследования начиная с середины 80-х годов [6]. Особое внимание уделялось профилю зеркала и выполнению его кромок специальным образом. Формирование квазиплоской волны происходит в связке облучатель – зеркало. Возможности повышения эффективности коллиматора за счет разработки специального облучателя изучены недостаточно хорошо.

Линза в радиотехнике обычно используется в диапазоне сантиметровых и миллиметровых длин волн. В диапазоне метровых длин волн диэлектрические

линзы используются редко, т.к. технологически создать линзу требуемого размера сложнее. В работе учтены технологические ограничения.

Цели исследования. Целью диссертационной работы является исследование распределения поля в рабочей зоне БЭК с коллиматором в виде зеркала или линзы и возможностей уменьшения его неравномерности.

В рамках диссертации решались следующие задачи:

1. Разработка облучателя со специальной формой ДН, позволяющего расширить рабочую зону компактного полигона.
2. Проведение компьютерного моделирования распределения электромагнитного поля в низкочастотной рупорной БЭК. Экспериментальная проверка результатов расчета на масштабной модели камеры.
3. Выявление основных факторов, влияющих на неравномерность поля в рабочей зоне рупорной БЭК.
4. Исследование возможностей уменьшения неравномерности поля в рабочей зоне рупорной БЭК за счет оптимизации параметров линзы.

Методы исследования. В работе использовался строгий метод интегральных уравнений для расчета ДН рупорного облучателя, распространения волны внутри рупорной камеры, формирования поля в рабочей зоне линзового коллиматора. Расчет поля в рабочей зоне компактного полигона выполнен в приближении физической оптики ввиду больших в длинах волн размеров зеркала. Также выполнен расчет поля после линзы гибридным методом, сочетающим в себе методы физической и геометрической оптики.

Научная новизна

1. Впервые расфазированный рупорный облучатель с изломом образующей и со скосом апертуры исследован строгим методом. Выполнена оптимизация геометрии рупора путем прямого расчета для создания оптимального

распределения поля на зеркале коллиматора.

2. Предложен подход к моделированию рупорной камеры, позволяющий проводить расчет распределения поля в рупорной камере на основе строгого метода интегральных уравнений при использовании относительно небольших вычислительных ресурсов.
3. Впервые проведено моделирование формирования поля в рупорной камере с линзой, оптимизировано фокусное расстояние линзы.
4. Исследовано просветляющее покрытие на линзе, позволяющее снизить неравномерность поля в рабочей зоне рупорной БЭЖ во всем рабочем диапазоне частот. Показано, что в низкочастотной области просветление может использоваться для подавления дифракционных эффектов.

Достоверность результатов. Показана сходимость и устойчивость полученных решений путем сравнения результатов расчетов распределения поля при уменьшении шага сетки. Корректность моделирования распределения поля в рупорной БЭЖ подтверждена экспериментальными исследованиями на масштабной модели камеры. Результаты расчетов поля после линзы приближенным методом (физической и геометрической оптики) и методом интегральных уравнений находятся в хорошем соответствии друг с другом.

Корректность моделирования распределения поля в компактном полигоне подтверждена сравнением результатов расчетов распределения поля в рабочей зоне коллиматора с экспериментальными данными для стандартного рупорного облучателя.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный расфазированный рупорный облучатель с изломом образующей и со скосом апертуры позволяет увеличить диаметр рабочей зоны компактного полигона на 25% по сравнению со стандартным облучателем в полосе частот $\pm 10\%$ относительно центральной частоты.
2. Впервые проведено детальное компьютерное моделирование рупорной камеры с линзой при помощи программного комплекса FEKO, что

позволяет прогнозировать электродинамические свойства камеры и проводить оптимизацию отдельных ее частей.

3. Показано методом компьютерного моделирования, что выбор линзы с фокусным расстоянием больше, чем расстояние до источника излучения, позволяет уменьшить неравномерность распределения амплитуды поле в рабочей зоне линзового коллиматора на основе рупорной камеры на 1 – 2 дБ в диапазоне частот 100 МГц – 1 ГГц.
4. Показано методом компьютерного моделирования, что нанесение просветляющего покрытия на плоскую поверхность линзы позволяет уменьшить неравномерность распределения поля в рабочей зоне рупорной камеры на 1 дБ во всей рабочей полосе частот.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на международных и российских конференциях:

- 13-я–19-я ежегодные научные конференции ИТПЭ РАН, Москва 2012 – 2018 гг.
- I, IV, V Микроволновые конференции, ИРЭ РАН. Москва, 2013, 2016, 2017 гг.
- 56-я–58-я научные конференции МФТИ. Долгопрудный, 2013 – 2015 гг.
- IX Всероссийская Научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике». 17 – 19 июня 2014.
- Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ – 2015. 28 июня – 3 июля 2015, Дивноморск.
- Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. 20 – 23 сентября 2015, Суздаль.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 20 работ, из них: 4 — статьи в изданиях по перечню ВАК; 9 — статьи в сборниках; 7 — работы, опубликованные в материалах всероссийских и международных конференций.

Использование результатов диссертации. По результатам исследования рассчитаны параметры линзы для рупорной БЭК в ИТПЭ РАН (разработано техническое задание) и для похожей камеры от компании VTE Pte Ltd (Сингапур). В настоящее время ведется работа по созданию измерительного комплекса в Сингапуре. Акты о внедрении прилагаются.

Кроме того, показана эффективность разработанного облучателя коллиматора с пятиметровым зеркалом, поэтому данный облучатель может быть использован в схеме измерительного стенда с таким зеркалом.

Личный вклад соискателя. Все основные научные результаты диссертации получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор самостоятельно провел все расчеты, он активно участвовал в определении методов исследования, в обсуждении результатов, в подготовке и в проведении экспериментальных исследований.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения и библиографии. Общий объем диссертации составляет 156 страниц, включает 80 рисунков. Библиография включает 117 наименований. К диссертации приложено два акта о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы.

Краткое содержание работы

Во введении обоснованы актуальность и научная новизна диссертационной работы, сформулирована цель исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе представлен обзор литературы по исследованиям, посвященным использованию специальных облучателей коллиматора; так же представлена литература по исследованию низкочастотных рупорных камеры и линзовых коллиматоров, помещенных в БЭК.

Во второй главе рассмотрены критерии квазиплоской волны [5], выбраны

наиболее подходящие для дальнейшего использования в данном исследовании. Сформулированы общие требования для измерительных стендов с коллиматором в виде зеркала и в виде линзы. Сформулированы требования к облучателям коллиматора.

Для обоих стендов задача формирования поля задана двумя частями: это задача возбуждения волны в рупоре или в рупорной части камеры, и задача дифракции волны на коллиматорном устройстве.

Третья глава посвящена разработке облучателя коллиматора со специальной формой диаграммы направленности на примере облучателя для коллиматора МАК-5М [5]. Исследовался диапазон частот 8,2 – 12,4 ГГц. В силу электродинамического подобия, разработанный облучатель может быть смасштабирован для любого другого диапазона частот в рабочей полосе коллиматора.

Облучатель представляет собой расфазированный рупор с изломом образующей и со скосом апертуры. Он состоит из двух рупоров: первый синфазный и второй сильно расфазированный (рисунок 1). Благодаря излому образующей, в ДН рупора формируется так называемая „полочка” – область с примерно постоянной амплитудой, которая заканчивается резким падением амплитуды, что позволяет получить более равномерную засветку центральной области зеркала и уменьшить дифракционные эффекты на краях.

В вертикальной плоскости рупор имеет скос апертуры, чтобы обеспечить несимметричность ДН. Зеркало представляет собой несимметричную вырезку из параболоида вращения, т.е. расстояние от фокуса, где располагается облучатель, до верхнего края зеркала больше, чем до нижнего. Рупор излучает приближенно сферическую волну, поэтому для обеспечения равномерности, необходимо увеличить амплитуду поля на верхней части зеркала. В первом приближении использовались полуэмпирические формулы из работы [7]. Эти формулы позволяют задать примерную геометрию рупора, которую дальше можно оптимизировать, используя строгий метод.

Расчет ДН облучателя проводился строгим методом интегральных

уравнений. В модели рупор возбуждался одномодовым круглым волноводом (волна H_{11}). На стенках рупора ставилось граничное условие для идеального проводника. Поле в рабочей зоне коллиматора рассчитывалось методом физической оптики, что оправдано ввиду больших размеров зеркала.

На рисунке 2 изображено распределение амплитуды поля в рабочей зоне коллиматора. Аналогично рассчитывалось поле для стандартного рупорного облучателя коллиматора МАК-5М. Количественную оценку неравномерности поля в рабочей зоне дают срезы поля в сечениях, проходящих через центр рабочей зоны компактного полигона (рисунок 3).

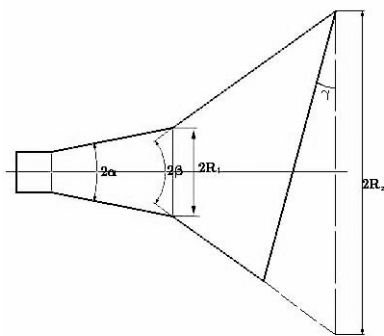


Рисунок 1. Схема расфазированного рупорного облучателя коллиматора с изломом образующей и со скосом апертуры

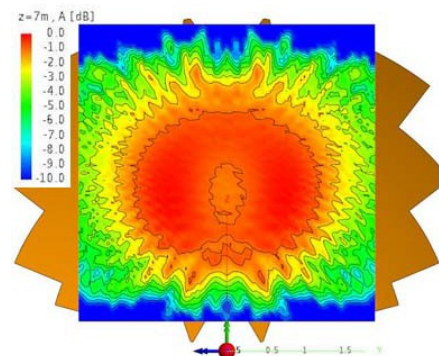


Рисунок 2. Двумерная картина распределения амплитуды поля в центре рабочей зоны в плоскости, перпендикулярной оси камеры. Частота 10 ГГц

На частотах выше 9,8 ГГц центральная область ДН имеет неравномерность 1 дБ и менее. По уровню 2 дБ для стандартного облучателя диаметр рабочей зоны составляет 2 м., а для разработанного облучателя – 2,5 м. Фаза поля при использовании расфазированного рупора немного ухудшается. На частотах выше 9,8 ГГц неравномерность фазы составляет порядка 10° , что меньше стандартного требования изменения фазы не более чем $\pi/8$.

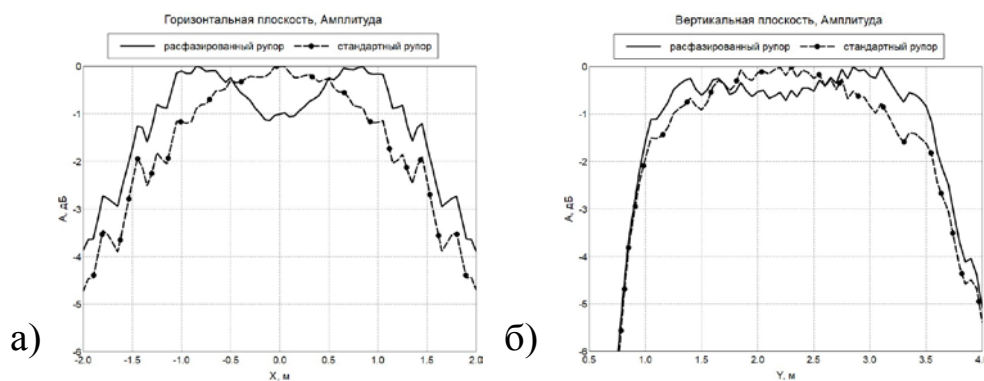


Рисунок 3. Срезы амплитуды поля в а) горизонтальной и б) в вертикальной плоскостях перпендикулярных оси зеркала и проходящих через центр рабочей зоны. Частота 10 ГГц

Достигнуто расширение рабочей зоны примерно на 25% по сравнению со стандартным рупорным облучателем в полосе частот $\pm 10\%$ относительно центральной частоты. Проведена оценка влияния размеров облучателя и его взаимодействия с зеркалом, выявлено, что связанная с этим приближением ошибка не превосходит 0,15 дБ. Для стандартного рупорного облучателя коллиматора МАК-5М результаты расчета коррелируют с экспериментом.

В четвертой главе рассматривается задача формирования поля в рабочей зоне рупорной БЭК. Геометрия камеры показана на рисунке 4.

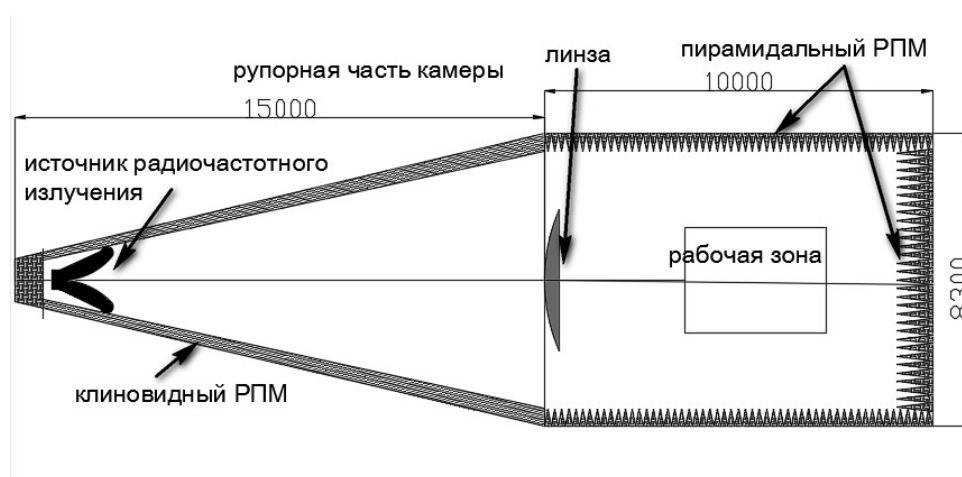


Рисунок 4. Геометрия рупорной камеры

Рупорная часть камеры имеет 15 м в длину. Объект помещается в

прямоугольной части камеры с поперечным сечением $8,3 \times 8,3$ м² и длиной 10 м. Рабочая зона БЭК представляет собой горизонтально расположенный цилиндр диаметром 3 метра и длиной 3 метра. Все поверхности камеры покрыты РПМ.

Создана модель низкочастотной рупорной камеры. Т.к. волна падает на РПМ в рупорной части камеры под углами, близким к скользящим [2], то моделирование материала осуществлялось следующим образом: использовался коэффициент отражения из работы [8] для известных РПМ при характерном угле падения волны и восстанавливалась эффективная диэлектрическая проницаемость слоя. В прямоугольной части камеры большое значение могут иметь волны, рассеянные на стенках и падающие на РПМ уже под разными углами. В этой части камеры РПМ заменялся импедансной поверхностью, что позволило смоделировать плавно меняющийся коэффициент отражения.

Расчет поля в рабочей зоне камеры проводился с использованием строгого метода интегральных уравнений в программе FEKO. Решаемая система уравнений выглядит следующим образом

$$\begin{aligned} [\mathbf{n}_1, \mathbf{E}^i] = & \mathbf{n}_1 \times \oint_{S_1} \left\{ i\omega(\psi_1 + \mu\psi_2) \mathbf{J}_1 - [\text{grad}(\psi_1 + \psi_2), \mathbf{K}_1] + \frac{1}{i\omega} \text{div}_S \mathbf{J}_1 \cdot \right. \\ & \left. \cdot \text{grad} \left(\psi_1 + \frac{\psi_2}{\varepsilon} \right) \right\} ds' - \mathbf{n}_1 \times \oint_{S_2} \left\{ i\omega\mu\psi_2 \mathbf{J}_2 + \frac{1}{i\omega\varepsilon} \text{div}_S \mathbf{J}_2 \cdot \text{grad}\psi_2 \right\} ds', \\ [\mathbf{n}_1, \mathbf{H}^i] = & \mathbf{n}_1 \times \oint_{S_1} \left\{ i\omega(\psi_1 + \varepsilon\psi_2) \mathbf{K}_1 + [\text{grad}(\psi_1 + \psi_2), \mathbf{J}_1] + \right. \\ & \left. + \frac{1}{i\omega} \text{div}_S \mathbf{K}_1 \cdot \text{grad} \left(\psi_1 + \frac{\psi_2}{\mu} \right) \right\} ds' - \mathbf{n}_1 \times \oint_{S_2} [\text{grad}\psi_2, \mathbf{J}_1] ds', \\ 0 = & -\mathbf{n}_2 \times \oint_{S_1} \left\{ -i\omega\mu\psi_2 \mathbf{J}_1 + [\text{grad}\psi_2, \mathbf{K}_1] - \frac{1}{i\omega\varepsilon} \text{div}_S \mathbf{J}_1 \cdot \text{grad}\psi_2 \right\} ds' - \\ & -\mathbf{n}_2 \times \oint_{S_2} \left\{ i\omega\mu\psi_2 \mathbf{J}_2 + \frac{1}{i\omega\varepsilon} \text{div}_S \mathbf{J}_2 \cdot \text{grad}\psi_2 \right\} ds', \end{aligned}$$

где $\mathbf{n}_1$ и $\mathbf{n}_2$ – нормали к диэлектрической (S_1) и проводящей (S_2) поверхностям камеры, $\mathbf{E}^i(\mathbf{r})$ и $\mathbf{H}^i(\mathbf{r})$ – напряженности электрического и магнитного полей источника, $\mathbf{J}_1$ и $\mathbf{K}_1$ – токи на поверхности диэлектрика, $\mathbf{J}_2$ – ток на поверхности

металла, ψ_1 и ψ_2 – фундаментальные решения уравнения Гельмгольца для области внутри камеры и внутри РПМ.

Для проверки адекватности моделирования РПМ была изготовлена модель камеры (рисунок 5) в масштабе 1:22, с помощью которой проводились экспериментальные исследования распределения поля в камере.

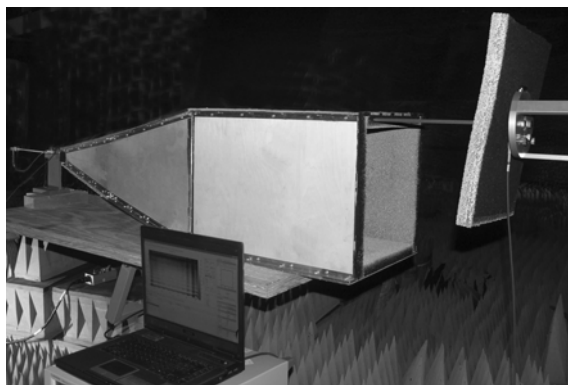


Рисунок 5. Модель рупорной камеры с измерительной установкой

Сравнение результатов расчета и эксперимента показало адекватность моделирования рупорной камеры. Ниже приведен график распределения поля в центре рабочей зоны камеры, частота указана для проектируемой камеры. Несимметричности на экспериментальной кривой вызваны неточностями изготовления модели камеры и неоднородностью РПМ на данных частотах.

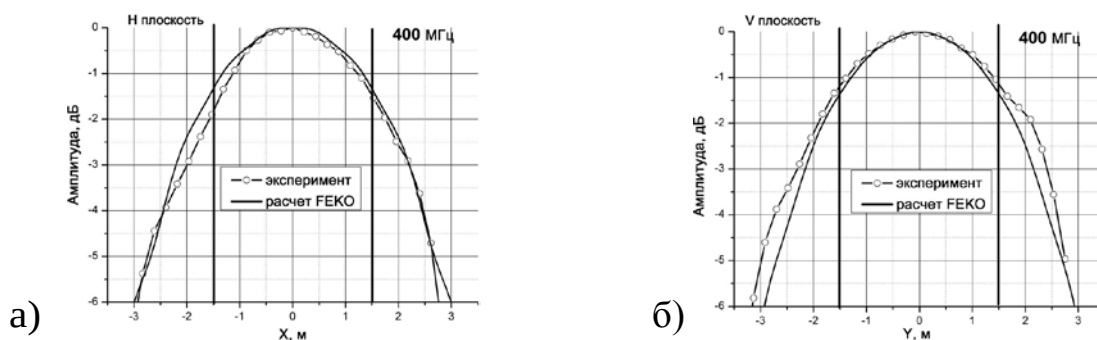


Рисунок 6. Распределение амплитуды поля вдоль осей а) X и б) Y в сечении камеры, проходящем через центр рабочей зоны, на частоте 400 МГц

Источником излучения в рупорной камере служит вибраторная антенна.

Для диапазона частот от 100 МГц антенна имеет очень большие размеры [9], что может влиять на формирование поля в рабочей зоне камеры. Исследования выявили необходимость использования одной антенны для частот 100–400 МГц, а более высокочастотной антенны для остального диапазона.

Результаты расчета показали, что распределения поля в рабочей зоне камеры при использовании антенны и при использовании диполя очень близки друг к другу; что на частоте 400 МГц неравномерность фазы составляет порядка 25° и согласно критерию дальней зоны $\pi/8$ необходима коррекция фазы.

Все расчеты проводились с использованием строгого метода, показана сходимость и устойчивость полученных решений. Показано, что определяющей погрешностью является неточность моделирования РПМ внутри камеры. Ошибка, связанная с этим, оценивается исходя из экспериментального сравнения и составляет порядка 0,2 дБ и 5° .

В пятой главе проведен расчет поля в рабочей зоне линзового коллиматора в рупорной БЭК. Линза установлена в апертуре рупорной части камеры, ее освещенная поверхность имеет форму гиперboloида вращения, вторая поверхность – плоская. Линза выполнена из композитного материала, эффективная диэлектрическая проницаемость которого 1,6 и не зависит от частоты (вдали от резонанса). Диаметр линзы 4 метра. Благодаря композитному материалу такая линза весит относительно мало [4].

Выполнена оптимизация фокусного расстояния линзы. Показано, что линза с $F = 17$ м дает наилучшее распределение поля в рабочей зоне, т.е. источник излучения находится ближе фокуса линзы. При этом волна после линзы остается слегка расходящейся, что позволяет расширить рабочую зону.

Использование линзы позволяет достичь неравномерность фазы поля менее 15° в рабочей зоне диаметром 3 метра в диапазоне 100 МГц – 1 ГГц.

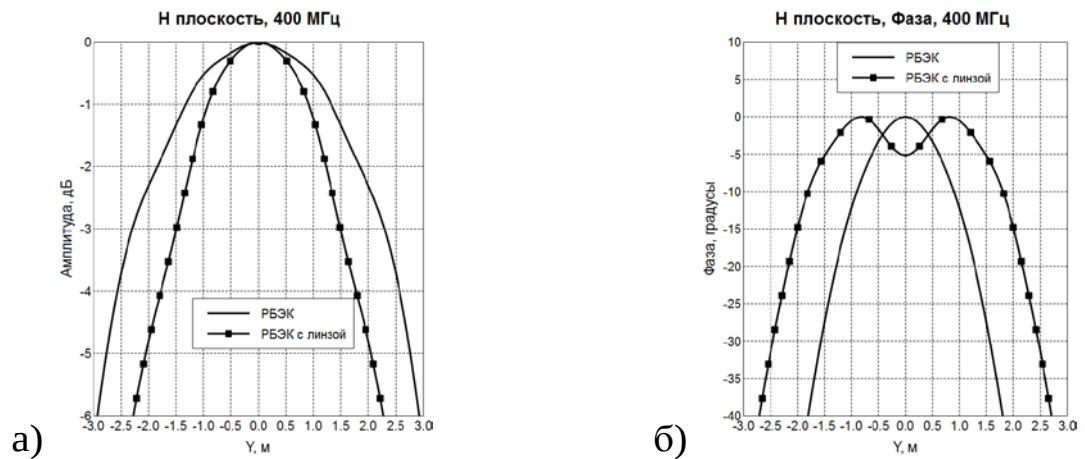


Рисунок 7. Распределение а) амплитуды и б) фазы поля в сечении камеры, проходящем через центр рабочей зоны, на частоте 400 МГц

На низких частотах (меньше 400 МГц) линза почти не оказывает влияния на поле. На частотах от 400 МГц до 800 МГц неравномерность распределения амплитуды поля в рабочей зоне увеличивается и составляет 2-3 дБ, что на 1-1,5 дБ больше, чем в случае камеры без линзы.

Проведен расчет поля после линзы приближенным гибридным методом геометрической и физической оптики. При этом вместо источника излучения использовалось распределение поля вблизи апертуры камеры, полученное в результате решения методом интегральных уравнений задачи распространения поля в рупорной части камеры. Это поле методом физической оптики пересчитывалось на линзу. Внутри линзы поле считалось методом геометрической оптики. Поле на второй поверхности линзы пересчитывалось снова методом физической оптики в рабочую зону. Результаты расчета подтвердили, что ухудшение поля после линзы вызвано дифракцией на ее краях.

Исследовалась линза, покрытая просветляющим слоем. Такой слой не только гасит переотражения внутри линзы, но и за счет своей толщины увеличивает размер самой линзы. Частота, для которой оптимизировано покрытие, выбрана из соображений, чтобы просветление уже могло улучшить поля на частоте 400 МГц, но еще не могло ухудшить его на 1 ГГц (т.к. толщина слоя постоянна). Параметры слоя рассчитаны по формулам

$$n_2 = \sqrt{n_1 n_3}, h = \frac{\lambda_0}{4n_2 \cos \theta_2}$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве, θ_2 – угол, под которым луч проходит внутрь просветляющего слоя, h – толщина слоя. На рисунке 8 приведено распределение поля в центре рабочей зоне для линзы с просветляющим слоем, оптимизированным для частоты 600 МГц, диаметр линзы 4,5 м.

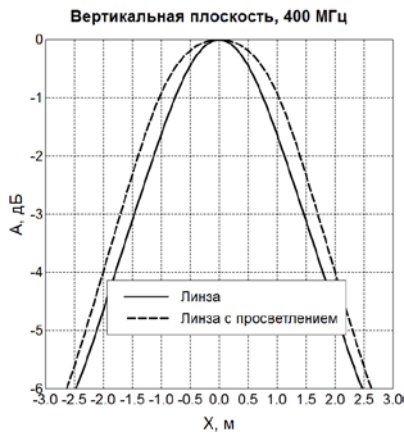


Рисунок 8. Распределение амплитуды поля в сечении камеры, проходящем через центр рабочей зоны, на частоте 400 МГц

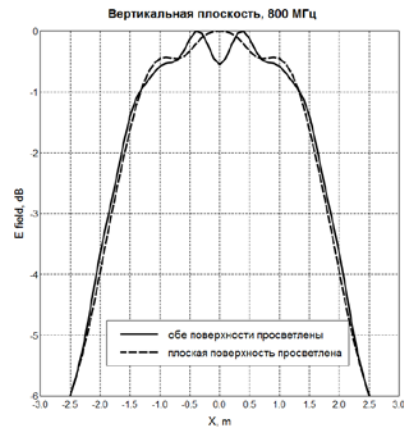


Рисунок 9. Распределение амплитуды поля в сечении камеры, проходящем через центр рабочей зоны, на частоте 800 МГц

Просветление позволило достичь неравномерность амплитуды поля 3 дБ. На распределение фазы поля просветление не повлияло.

Выполнить просветляющий слой можно из того же композита, но с более редкой матрицей заполнения. Изготовить плоский слой гораздо проще, чем слой нужной кривизны. Проведены расчеты с нанесением просветляющего слоя только на плоской поверхности. Линза станет заметно легче и дешевле. Все расчеты проводились с использованием строгого метода, кроме расчетов поля после линзы гибридным методом. Показана сходимость и устойчивость полученного решения. Ошибка расчетов составляет 0,2 дБ и 5°.

В заключении приведены основные результаты исследований, обобщены все достигнутые улучшения в равномерности поля в рабочей зоне стендов.

Основные результаты работы

1. Разработан облучатель коллиматора со специальной формой ДН. Проведен расчет ДН рупора строгим методом интегральных уравнений.
2. Использование разработанного облучателя позволило увеличить диаметр рабочей зоны коллиматора с пятиметровым зеркалом на 25% по сравнению со стандартным рупорным облучателем в полосе частот $\pm 10\%$ относительно центральной частоты.
3. Предложен подход к исследованию распределения поля в рупорной БЭК, опирающийся на сегментацию рупорной камеры, проведенной в зависимости от характерного угла падения волны на материал. На основе предложенного подхода разработана математическая модель камеры, которая реализована с помощью программы FEKO.
4. Проведена экспериментальная проверка результатов расчета на масштабной модели камеры. Результаты эксперимента показали хорошее соответствие с расчетом.
5. Исследовано влияние размеров и положения антенны на формирование поля в рабочей зоне камеры. Выявлена необходимость использования двух антенн: в данном случае, антенны QN100 для частот 100–400 МГц и антенны QN-400 для 400 МГц–1 ГГц.
6. Выполнено исследование распределения поля в рупорной БЭК с линзой. Оптимизировано фокусное расстояние линзы, достигнута неравномерность фазы менее 15° в рабочей зоне.
7. Исследовано гибридным методом геометрической и физической оптики поле после линзы. Результаты расчетов подтвердили решающее влияние дифракционных эффектов на ее краях.
8. Исследовано формирование поля после линзы с просветляющим слоем. Достигнута неравномерность поля 3 дБ во всем частотном диапазоне.
9. Просветляющий слой достаточно наносить только на плоской поверхности

линзы, что существенно уменьшит ее вес и стоимость.

Список публикаций

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Математическое моделирование электромагнитных характеристик рупорной безэховой камеры. Антенны, 2015 №9, с. 61-66.
2. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Расфазированный рупорный облучатель с изломом образующей и со скосом апертуры для коллиматора МАК-5М. Журнал радиоэлектроники, 2016, №6.
3. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Моделирование распределения электромагнитного поля в рабочей зоне рупорной безэховой камеры с линзой. Антенны, 2017 №2, с. 42-49.
4. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Оптимизация линзового коллиматора, расположенного в рупорной безэховой камере. Журнал радиоэлектроники. 2017. №9.

Другие публикации

5. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Расчет рупорной безэховой камеры для электромагнитных измерений на низких частотах. Труды I Микроволновой конференции, ИРЭ РАН. Москва, 27-29 ноября 2013.
6. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Расчет рупорной безэховой камеры для электромагнитных измерений на низких частотах. Труды 56-ой научной конференции МФТИ. 2013, Долгопрудный, 23-28 ноября.
7. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Моделирование рупорной

- безэховой камеры с диэлектрической линзой для электромагнитных измерений на низких частотах. Труды IX Всероссийской научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике». 17-19 июня 2014.
8. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Моделирование распределения электромагнитного поля в низкочастотной рупорной безэховой камере, возбуждаемой реальным вибратором. Труды 57-ой научной конференции МФТИ. 2014, Долгопрудный, 24-29 ноября.
 9. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Численный анализ электромагнитного поля в рупорной безэховой камере с линзой. Труды международной научной конференции "Излучение и рассеяние электромагнитных волн"ИРЭМВ-2015. 28 июня – 3 июля 2015, Дивноморск.
 10. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Математическое моделирование электромагнитного поля в рупорной безэховой камере с диэлектрической линзой. Труды 8-ой международной конференции "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации 20-23 сентября 2015, Суздаль.
 11. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Моделирование поля в рупорной безэховой камере с линзой. Труды 58-ой научной конференции МФТИ. 2015, Долгопрудный, 23-28 ноября.
 12. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Исследование электромагнитного поля в рабочей зоне рупорной камеры с линзой, покрытой с двух сторон просветляющим слоем. Труды IV Микроволновой конференции, ИРЭ РАН. Москва, 23-25 ноября 2016.
 13. Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Оптимизация линзового коллиматора, расположенного в рупорной камере, за счет нанесения просветления. Труды V Микроволновой конференции, ИРЭ РАН. Москва, 27 ноября – 1 декабря 2017.

Цитированная литература

1. Майзельс Е.К., Торгованов В.А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. М.: Советское радио, 1972. 232 с.
2. Hemming L. H. Electromagnetic Anechoic Chambers A Fundamental Design and Specification Guide. IEEE Press and Wiley Interscience.: NY, 2002.
3. Lee K.H., Chen C.C., Lee R., Burnside W.D. Numerical Analysis of a Novel Tapered Chamber Feed Antenna Design. AMTA, 2002.
4. Chia T.T., Matitsine S. Plano-convex lens with matched layers to reduce plane wave field amplitude variation. 35th AMTA 2013
5. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. М.: Наука, 2007. 266 с.
6. Gupta J., Burnside W. D. A numerical method to compute diffraction from blended surfaces, IEEE Int. Ant. Prop. Symp. Dig. 1987, V.25, pp.534 - 537.
7. Тимофеева А.А. Определение геометрических размеров рупорных облучателей с диаграммами направленности близкими к оптимальным. – Электросвязь, 1977, №5.
8. Никитенко А. В., Зубов А. С., Шапкина Н. Е. Моделирование электромагнитного рассеяния на радиопоглощающем материале методом связанных волн. Матем. моделирование, Т.26. №9 (2014), С. 18–32.
9. http://www.mvg-world.com/en/system/files/absorbers_overview_2017_bd.pdf