

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО Московском техническом университете связи и информатики

Научные руководители

Скородумова Елена Александровна,
кандидат физико-математических наук,
Калошин Вадим Анатольевич,
доктор физико-математических наук,

Официальные оппоненты:

Литвинов Олег Станиславович,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
профессор кафедры физики факультета
«Фундаментальные науки» ФГБОУ ВПО
Московского государственного техниче-
ского университета им. Н.Э. Баумана,

Лось Валериан Федорович,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник отдела 23
АО Концерна радиостроения «Вега»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Воро-
нежский государственный университет»

Защита состоится «29» мая 2015 г., в 10-00, на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, ГСП-9, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте <http://www.cplire.ru/rus/dissertations.html>.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Потапов
Александр Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В СВЧ диапазоне электромагнитных волн в качестве СШП антенн используются, главным образом, излучатели рупорного типа: классический ТЕМ рупор, *H*-образный ТЕМ рупор и биконическая антенна.

H-образный нерегулярный ТЕМ рупор имеет очень широкую полосу частот, но сложен в изготовлении. Биконические, поликонические и дисконусные антенны обеспечивают также очень широкую полосу рабочих частот, но малый коэффициент усиления. Классический ТЕМ рупор прост в изготовлении, обладает очень широкой полосой рабочих частот и высоким усилением, в связи с чем он получил широкое применение. К числу его недостатков следует отнести значительные электрические размеры и наличие провалов в частотной зависимости коэффициента усиления.

Наиболее простой моделью для описания ТЕМ рупора, в том числе нерегулярного, является нерегулярная полосковая линия. Однако, существующая на данный момент аналитическая модель распространения основной волны нерегулярной полосковой линии, использующая теорию длинных линий, не позволяет достаточно точно вычислять характеристики ТЕМ рупоров. Применение строгих численных методов исследования в широкой полосе частот требует больших затрат времени и значительных компьютерных ресурсов.

Таким образом, разработка эффективных аналитических моделей распространения и излучения основной волны нерегулярной полосковой линии, а также применение их для анализа и оптимизации параметров ТЕМ рупоров является актуальной задачей.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка эффективных аналитических моделей распространения и излучения основной волны нерегулярной полосковой линии, а также применение их для анализа и оптимизации параметров ТЕМ рупоров в сверхширокой полосе частот.

Достижение поставленной цели потребовало **решения следующих задач:**

- построение аналитической модели распространения основной волны плавно-нерегулярной полосковой линии и рассеяния на открытом конце;
- построение аналитической модели распространения основной волны нерегулярной кусочно-плоской полосковой линии и рассеяния на открытом конце;
- построение аналитической модели излучения основной волны нерегулярной кусочно-плоской полосковой линии;
- разработка алгоритмов и компьютерных программ моделирования и оптимизации нерегулярных ТЕМ рупоров;
- применение разработанных алгоритмов и программ для исследования и оптимизации параметров нерегулярных ТЕМ рупоров.

Методы исследования. При выполнении работы использованы аналити-

ческие методы: метод Кирхгофа, метод поперечных сечений, метод равномерной асимптотической теории дифракции, а также численные, например, метод конечных элементов, методы компьютерной обработки экспериментальных данных, методы измерений характеристик антенн.

Получены следующие новые научные результаты:

- построена численно-аналитическая модель распространения основной волны плавно-нерегулярной полосковой линии в одномодовом приближении;
- построена аналитическая модель распространения основной волны в нерегулярной кусочно-плоской полосковой линии в одномодовом приближении;
- на основе моделей распространения основной волны и ее рассеяния на открытом конце полосковой линии построена модель согласования плавно-нерегулярных и кусочно-плоских ТЕМ рупоров;
- построена аналитическая модель излучения основной волны из открытого конца нерегулярной полосковой линии в одномодовом приближении.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- разработаны алгоритмы и компьютерные программы для моделирования и оптимизации нерегулярных ТЕМ рупоров;
- разработан плавно-нерегулярный ТЕМ рупор с полосой частот более пяти октав и габаритами, близкими к минимальным;
- разработан кусочно-плоский ТЕМ рупор с полосой частот более четырех октав, обладающий минимальными габаритами;
- разработан полигональный ТЕМ рупор с полосой частот более трех октав, обладающий габаритами, близкими к минимальным;
- разработан кусочно-плоский ТЕМ рупор со стабильной в полосе частот более двух октав шириной главного лепестка диаграммы направленности;
- разработана рупорно-линзовая антенна с коэффициентом использования поверхности (КИП) более 0.8 в полосе частот более четырех октав.

Основные положения, выносимые на защиту:

- разработанная численно-аналитическая модель распространения основной волны плавно-нерегулярной полосковой линии с учетом ее рассеяния на открытом конце обеспечивает большую точность вычисления коэффициента отражения, чем известные аналитические модели;
- разработанная модель распространения основной волны кусочно-плоской полосковой линии и с учетом ее рассеяния на открытом конце обеспечивает относительную точность вычисления коэффициента отражения порядка 5%;
- разработанная модель излучения основной волны нерегулярной полосковой линии позволяет описывать главный лепесток диаграммы направленности с относительной точностью порядка 15%;
- алгоритмы оптимизации характеристик согласования и излучения на основе разработанных моделей дают возможность находить геометрические

параметры нерегулярных ТЕМ рупоров, обеспечивающие максимальную полосу частот по различным критериям.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах: Всероссийском межотраслевом молодежном научно-техническом форуме «Молодежь и будущее авиации и космонавтики», VI Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», 7-ой и 8-ой Отраслевой научной конференции «Технологии информационного общества», 31st URSI General Assembly and Scientific Symposium, конкурсе молодых ученых ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН им. И.В. Анисимкина-2014, Всероссийской научно-технической конференции «Наука и АСУ – 2014», Московском объединенном Фельдовском семинаре по электродинамике и антеннам, II Московской микроволновой неделе, Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (Intermatic – 2014).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и представлено 9 докладов на международных и всероссийских конференциях, 5 из которых опубликовано в трудах соответствующих конференций. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично соискателю принадлежат: вывод формул, разработка алгоритмов, программная реализация полученных алгоритмов, проведение оптимизации с помощью разработанного программного обеспечения, проверка с помощью строгих численных методов и физического эксперимента.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, трех глав, Заключения, Списка литературы из 103 наименований. Основная часть работы изложена на 111 страницах, содержит 99 рисунков и одну таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе рассматриваются подходы, наиболее часто используемые для анализа характеристик нерегулярных ТЕМ рупоров и оптимизации их геометрии с целью расширения полосы согласования. Первый из них состоит в определении коэффициента отражения ТЕМ рупора с помощью универсальных численных методов электродинамического моделирования. При этом образующая пластин рупора представляет собой кривую, заданную конечным числом параметров, которые в дальнейшем используются в процессе оптимизации. Второй подход использует аналитическую модель распространения основной волны нерегулярной полосковой линии на основе метода поперечных сечений. В рамках этой модели с каждым сечением нерегулярной линии соотносится волновое сопротивление регулярной линии соответствующего сечения, а далее оптимизируется функция его изменения.

Также в этой главе приводятся примеры применения рассматриваемых методов для оптимизации параметров нерегулярных ТЕМ рупоров.

В конце главы приведена таблица, в которую вошли геометрические параметры и характеристики согласования как разработанных в данной диссертации, так и предлагаемых другими исследователями моделей рупоров. Таблица упорядочена по убыванию коэффициента использования размера (КИР), равному диаметру описанной вокруг антенны сферы, нормированному на диаметр сферы Чу. Этот параметр характеризует качество синтеза СШП антенны по критерию согласования.

Вторая глава диссертации посвящена разработке моделей распространения основной волны в нерегулярной полосковой линии и рассеяния этой волны на открытом конце линии, а также оптимизации на основе этих моделей характеристик согласования нерегулярных ТЕМ рупоров.

Сначала рассматриваются плавно-нерегулярные линии, у которых угол между проводниками β изменяется непрерывно вдоль длины линии (рис. 1).

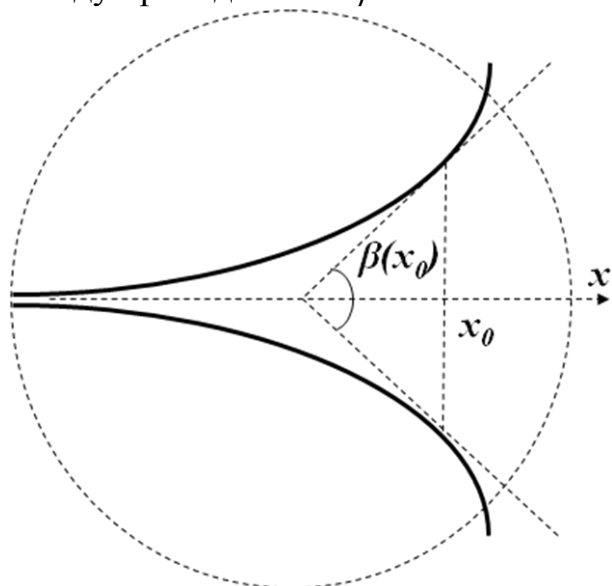


Рис. 1. Сечение в E -плоскости плавно-нерегулярного излучателя

экспоненциальным профилем линии описывается функцией $y(x) = y_0 \exp((x + a_1)a_2)$, зависящей от расстояния x от узла возбуждения, где y_0 – половина расстояния между проводниками в узле возбуждения. Коэффициент отражения излучателя вычислялся с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и оптимизировался с помощью квазиньютоновского метода (КМ) по параметрам α , a_1 , a_2 , где α – постоянный угол, характеризующий изменение ширины проводника вдоль оси x . В результате проведенной оптимизации получены следующие значения параметров: $a_1 = 5$ см, $a_2 = 14.85$, $\alpha = 70^\circ$. Геометрия оптимизированного экспоненциального ТЕМ рупора показана на рис. 2. На рис. 3 приведена зависимость коэффициента отражения этого рупора от ka , полученная с использованием МКЭ. Горизонтальной линией здесь и далее отмечен уровень -10 дБ. Параметр ka_{low} для оптимизированного рупора имеет зна-

Первой решается задача численной оптимизации параметров нерегулярной полосковой линии с экспоненциальным профилем (рис. 2). Оптимизация проводится с целью максимизации параметра КИР. Это соответствует минимизации электрического размера радиуса описанной вокруг излучателя сферы (ka) на нижней границе полосы частот по уровню согласования -10 дБ (параметр ka_{low}). Для удобства сравнения по критерию КИР предлагаемый излучатель, как и все описываемые далее в данной работе, вписан в сферу с радиусом a .

Образующая проводников с

чение 1.17. Верхняя граница частот по уровню согласования -10 дБ, выраженная в электрическом размере радиуса описанной вокруг антенны сферы (ka_{high}), превышает 40, т.е. их отношение составляет более 30.

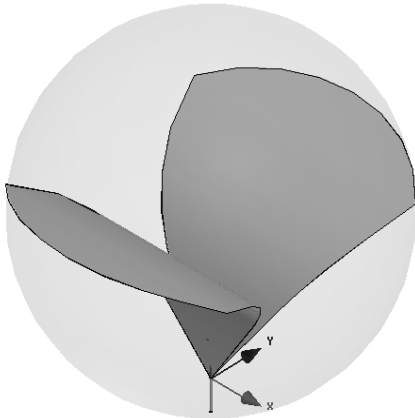


Рис. 2. Геометрия экспоненциального ТЕМ рупора

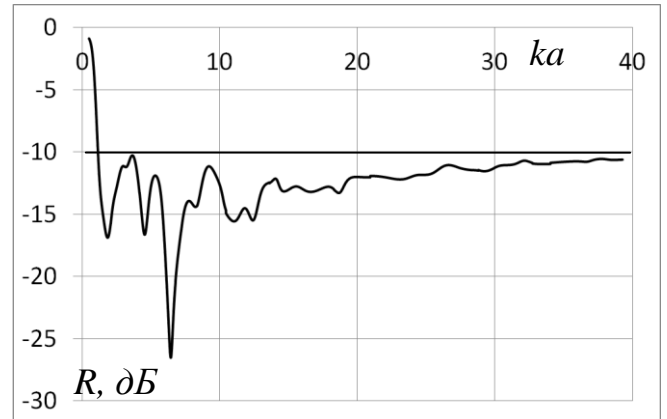


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения экспоненциального ТЕМ рупора от ka

Нерегулярная полосковая линия с экспоненциальным профилем хорошо описана в литературе и является популярным объектом для оптимизации, однако представляет собой очень частный случай геометрии линии. Далее для более общей геометрии нерегулярной полосковой линии построены две аналитические модели распространения и рассеяния на открытом конце линии ее основной волны, и на их основе проводится оптимизация характеристик согласования нерегулярных ТЕМ рупоров.

В первой модели плавно-нерегулярной полосковой линии, как и в классической, коэффициент отражения R представляется в виде суммы трех слагаемых: первое из них описывает вклад в отражение узла возбуждения, второе – нерегулярной части линии, а третье – открытого конца:

$$R = \frac{Z_0 - Z_{ex}}{Z_0 + Z_{ex}} + \int_0^a \frac{Z'}{2Z} \exp(2Ikx) dx + \frac{1}{2ka\beta} \exp\left(I \frac{\pi}{2} + 2Ika\right) g(0,0,1), \quad (1)$$

где Z_0 – волновое сопротивление питающей коаксиальной линии, Z_{ex} – начальное волновое сопротивление нерегулярной полосковой линии, $Z(x)$ – закон, описывающий изменение волнового сопротивления линии вдоль ее длины, x – расстояние от узла возбуждения, k – волновое число в свободном пространстве. $g(\alpha, \beta, 1) = g^- + \varepsilon g^+$ – дифракционный коэффициент, описывающий решение задачи дифракции плоской волны на полуплоскости, где $g^\pm(\alpha, \beta, 1) = \sin \pi(\cos \pi - \cos(\alpha \pm \beta))^{-1}$. Первое и второе слагаемое в выражении (1) для коэффициента отражения имеют такой же вид, как и в классической модели. Отличие заключается в том, что метод поперечных сечений в данной работе применяется не к волноводным, а к рупорным модам. При этом волновое сопротивление основной рупорной моды находится из численного решения. Второе отличие состоит в том, что третье слагаемое, описывающее отражение

от открытого конце нерегулярной линии, вычисляется с применением асимптотических методов, без использования импедансного подхода.

Определим точность вычисления с помощью предлагаемой модели параметра ka_{low} для нерегулярных ТЕМ рупоров. На рис. 4–5 приведены зависимости коэффициента отражения от ka , вычисленные с использованием предлагаемой численно-аналитической модели (штриховая линия) и с использованием МКЭ (сплошная линия).

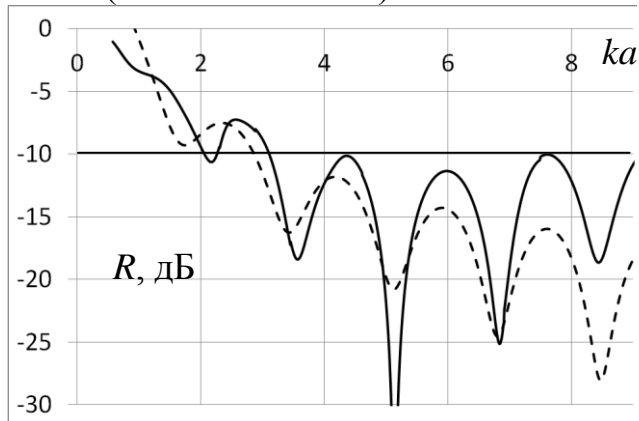


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения от ka для рупора с гиперболическим законом изменения волнового сопротивления с положительной второй производной ($Z''(x) > 0$) при $Z_{вх} = 70$ Ом, $Z_{вых} = 100$ Ом

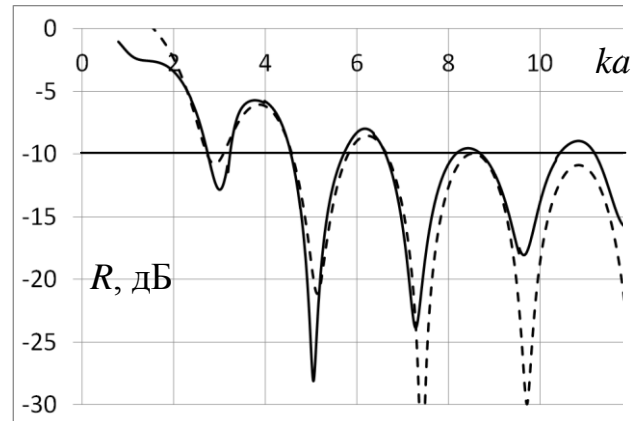


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от ka для рупора с параболическим законом изменения волнового сопротивления с отрицательной второй производной ($Z''(x) < 0$) при $Z_{вх} = 55$ Ом, $Z_{вых} = 100$ Ом

Сравнение характеристик, полученных с помощью предлагаемой модели и с помощью МКЭ, показывает, что предлагаемая модель позволяет определить величину параметра ka_{low} для нерегулярных ТЕМ рупоров с относительной точностью 10-20%.

Далее решается задача оптимизации геометрии нерегулярного рупора с целью максимизации КИР (минимизации ka_{low}). В рамках предложенной модели этот параметр определяется входным сопротивлением и законом изменения волнового сопротивления вдоль длины рупора. Соответственно, оптимизация состояла в выборе закона изменения волнового сопротивления рупора, обеспечивающего максимум КИР. Полученное решение было проверено с использованием МКЭ. Проведенные исследования показали, что плавно-нерегулярные рупора с линейным законом изменения волнового сопротивления вдоль длины образующей обладают меньшей величиной параметра ka_{low} , чем рупора с другими законами изменения волнового сопротивления. В результате оптимизации получен плавно-нерегулярный ТЕМ рупор со следующими характеристиками: закон изменения волнового сопротивления – линейный, выходное сопротивление – максимальное в рамках данной модели ($Z_{вых} = 200$ Ом), входное волновое сопротивление равно волновому сопротивлению питающей коаксиальной линии ($Z_{вх} = 50$ Ом). Геометрия оптимизированного плавно-нерегулярного ТЕМ рупора показана на рис. 6.

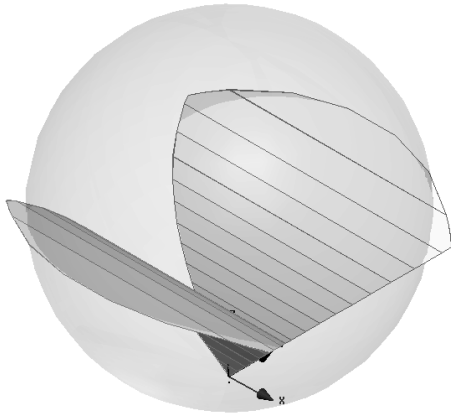


Рис. 6. Геометрия оптимизированного плавно-нерегулярного ТЕМ рупора

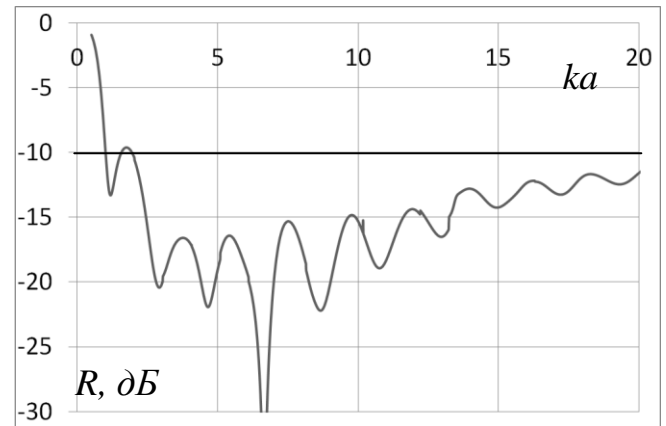


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения плавно-нерегулярного ТЕМ рупора от ka

На рис. 7 приведена зависимость коэффициента отражения плавно-нерегулярного ТЕМ рупора от ka , полученная с помощью МКЭ. Параметр ka_{low} для оптимизированного рупора примерно равен 1, $ka_{high} > 40$.

Отметим слабые стороны предлагаемой модели, выявленные в процессе оптимизации. Во-первых, модель сильно зависит от численных данных для волнового сопротивления ТЕМ рупора, т.е. ограничена в возможностях изменения угла β величиной 180° . Во-вторых, предлагаемая модель хорошо работает для случая незначительного изменения $\beta(x)$ на протяжении длины нерегулярной линии.

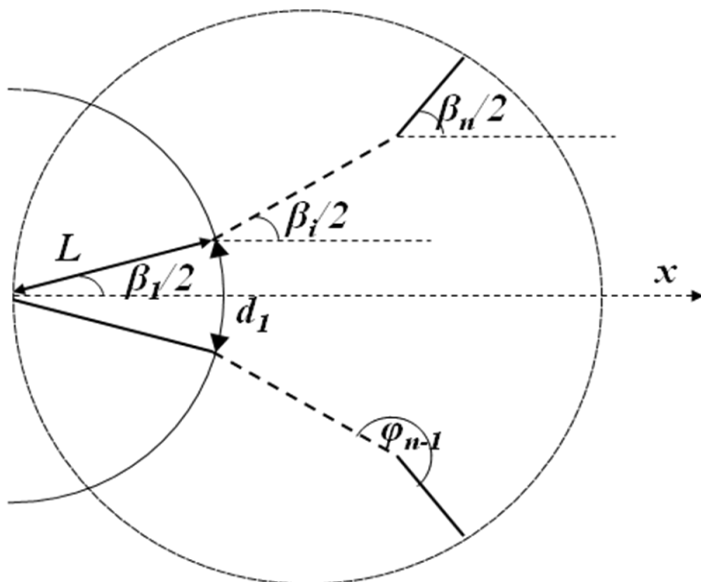


Рис. 8. Сечение в E -плоскости кусочно-плоского излучателя

Далее будем исследовать распространение основной волны в нерегулярной полосковой линии, проводники которой образуют кусочно-плоские поверхности. Угол α , характеризующий изменение ширины проводника подобной линии, остается постоянным вдоль всей ее длины, угол между проводниками β изменяется дискретно в точках излома образующей. Такого рода нерегулярные линии будем называть кусочно-плоскими (рис. 8). В отличие от плавно-нерегулярных линий,

образующая проводников которых представляет собой гладкую линию (рис. 1) и, в общем случае, обладает континуальным числом геометрических параметров, кусочно-плоская характеризуется конечным числом параметров, что удобно для оптимизации.

В рамках второй предлагаемой модели полный коэффициент отражения R представляет собой сумму отражений от стыков плоских волноводов:

$$R = \frac{Z_0 - Z_{ex}}{Z_0 + Z_{ex}} + \sum_{j=1}^n \exp\left(I \frac{\pi}{2} + 2IkLj\right) \cdot \begin{cases} e^{-\pi q_{eff_j}} \frac{g(0,0,c_j)}{g(0,0,2)}, & 0 < q_{eff} < 1, \\ e^{-\pi q_{eff_j}} \frac{q_{eff_j} + \gamma_{1_j}}{q_{eff_j} - \gamma_{1_j}} \frac{g(0,0,c_j)}{g(0,0,2)}, & 1 < q_{eff} < 2, \end{cases} \quad (2)$$

где Z_0 – волновое сопротивление питающей коаксиальной линии, Z_{ex} – начальное волновое сопротивление нерегулярной полосковой линии, L – длина одной

ее секции, $\gamma_1 = \sqrt{q^2 - 1}$, $q_{eff_j} = \frac{kd_{eff_j}}{2\pi}$, d_{eff_i} равно длине дуги, соединяющей про-

водники i -той секции линии, $g(\alpha, \beta, c) = g^- + \varepsilon g^+$ – дифракционный коэффициент, описывающий решение задачи дифракции плоской волны на клине, в кото-

ром $g^\pm(\alpha, \beta, c) = \frac{1}{c} \sin \frac{\pi}{c} \left(\cos \frac{\pi}{c} - \cos \frac{\alpha \pm \beta}{c} \right)^{-1}$, $c_j = \frac{\varphi_j}{\pi}$. Угол $\varphi_j = \frac{\beta_j}{2} - \frac{\beta_{j+1}}{2} + \pi$.

Для последней секции линии ($i = n$) $\varphi_n = 2\pi$.

Определим точность вычисления с помощью предлагаемой модели параметра ka_{low} для нерегулярных ТЕМ рупоров. На рис. 9 приведены зависимости коэффициента отражения от ka , вычисленного с использованием аналитической модели (штриховая линия) и с использованием МКЭ (сплошная линия).

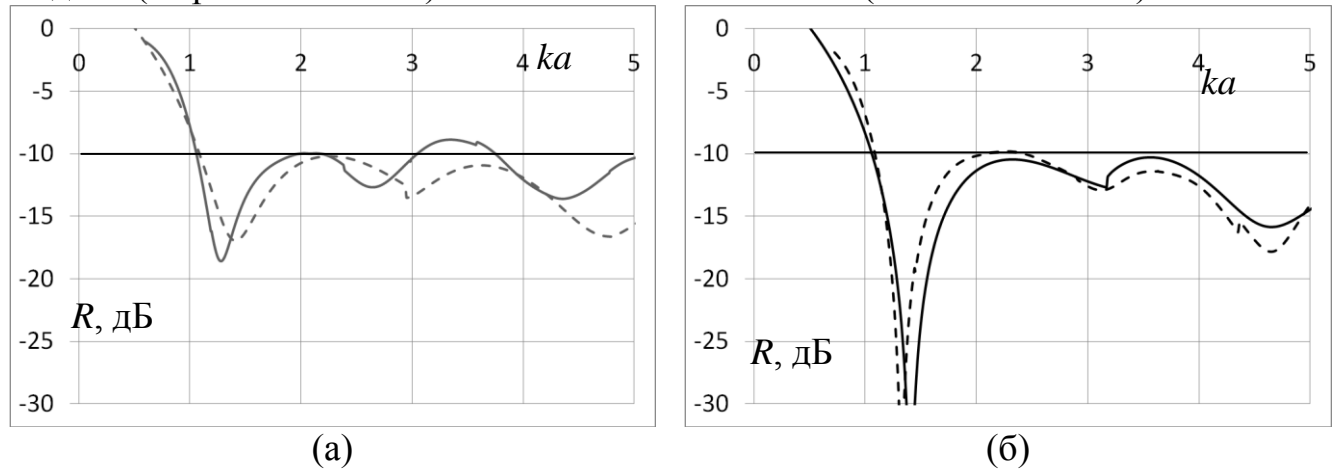


Рис. 9. Зависимость коэффициента отражения от ka для четырехсекционных рупоров, у которых углы β_i принимают значения для $i = 1..4$
(а) $16.61^\circ, 65^\circ, 95^\circ, 110^\circ$ (б) $16.61^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 130^\circ$

Сравнение характеристик, полученных с помощью предлагаемой модели и с помощью МКЭ, показывает, что предлагаемая модель позволяет определить величину параметра ka_{low} для нерегулярных ТЕМ рупоров с относительной точностью 5-10%.

Далее на основе данной модели решается задача оптимизации геометрии нерегулярного рупора с целью максимизации КИРа (минимизации ka_{low}). В предлагаемой аналитической модели параметр ka_{low} зависит от последователь-

ности значений β_i – углов изломов секций, n – количества секций и a – радиуса описанной вокруг излучателя сферы (см. рис. 8).

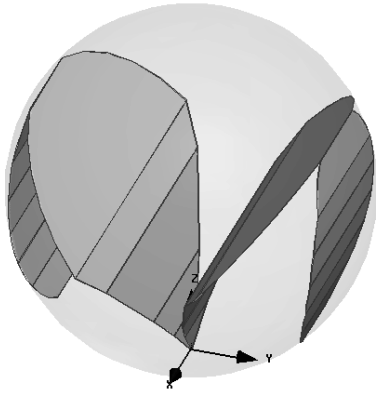


Рис. 10. Геометрия оптимизированного кусочно-плоского ТЕМ рупора

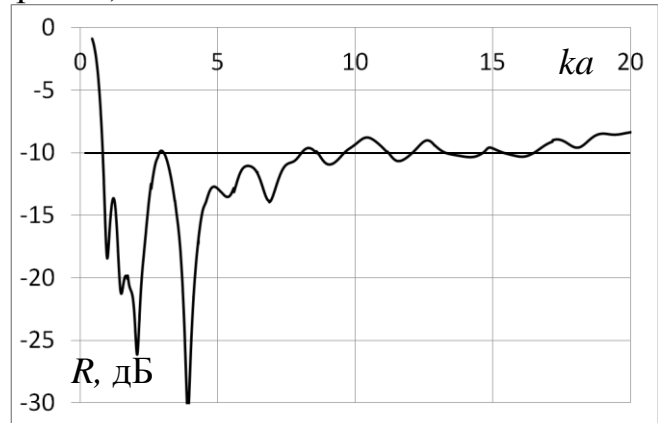


Рис. 11. Зависимость коэффициента отражения кусочно-плоского ТЕМ рупора от ka

Оптимизация проводилась перебором углов β_i при длинах секций, равных L . На каждом следующем шаге количество секций в рупоре увеличивалось, а оптимизация проводилась с учетом полученного на предыдущем шаге диапазона изменения углов β_i , обеспечивающих максимум КИР.

Проведенная оптимизация позволила сделать вывод, что первоначальные значения углов, например, для рупоров из шести секций следует выбирать из следующих диапазонов углов: для β_2, β_3 – от 20° до 60° , для β_4 – от 50° до 80° , а для β_5, β_6 – от 60° до 100° .

В результате оптимизации получен ТЕМ рупор из 14 секций (рис. 10), углы между пластинами $\beta_i, i=1..14$, соответственно, равны [$16.61^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 40^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 80^\circ, 80^\circ, 340^\circ, 360^\circ, 370^\circ, 380^\circ, 390^\circ, 400^\circ$].

На рис. 11 приведена зависимость коэффициента отражения оптимизированного кусочно-плоского ТЕМ рупора от ka , полученная с помощью МКЭ. Параметр ka_{low} для оптимизированного кусочно-плоского ТЕМ рупора равен 0.81, параметр ka_{high} равен 16.75, т.е. их отношение составляет более 20.

Последний раздел второй главы посвящен нерегулярным в H -плоскости ТЕМ рупорам, угол β в которых остается постоянным вдоль всей длины рупора, а угол α изменяется дискретно в точках излома кромок рупора. Назовем такие рупора полигональными. В этом разделе задача оптимизации рупора с целью максимизации КИРа (минимизации ka_{low}) решалась численно. Характеристики согласования вычислялись с помощью МКЭ. В качестве метода оптимизации выбран КМ. В результате оптимизации получена геометрия рупора, стенки которого имеют форму правильного тринадцатигульника, вписанного в круг. При этом угол между пластинами рупора $\beta = 75^\circ$. Геометрия оптимизированного полигонального ТЕМ рупора показана на рис. 12. На рис. 13 приведена зависимость коэффициента отражения полигонального ТЕМ рупора от ka , полученная с помощью МКЭ. Параметр ka_{low} равен 0.8, параметр ka_{high} равен 12.56, т.е. их отношение составляет чуть больше 15.

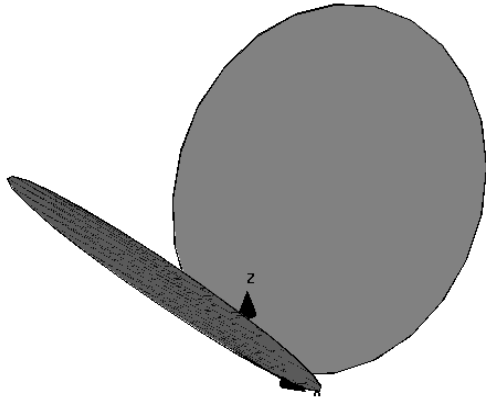


Рис. 12. Геометрия оптимизированного полигонального ТЕМ рупора

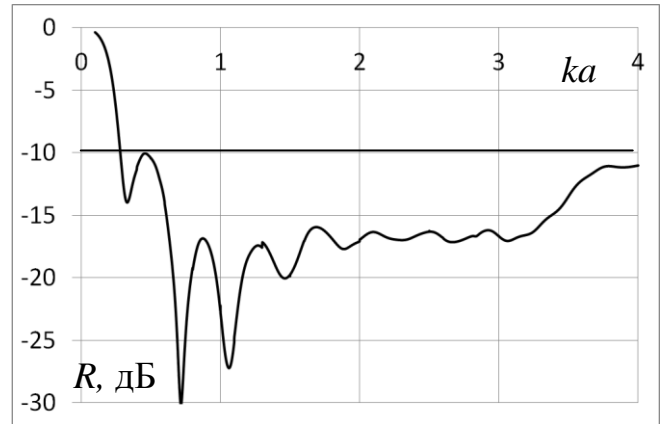


Рис. 13. Зависимость коэффициента отражения полигонального ТЕМ рупора от ka

Третья глава диссертации посвящена разработке методик и алгоритмов вычисления характеристик излучения открытого конца нерегулярной полосковой линии, а также решению на основе этих алгоритмов задач оптимизации геометрии рупора.

В первом разделе главы предложены четыре аналитические методики определения формы главного лепестка диаграммы направленности в E -плоскости вплоть до уровня -10 дБ.

Первой рассматривается методика вычисления характеристик излучения открытого конца нерегулярной полосковой линии с использованием решения Л.А. Вайнштейна для излучения из конца плоского волновода. Согласно этой методике, диаграмма направленности нерегулярной полосковой линии находится с помощью модифицированной формулы для диаграммы направленности плоского волновода. Модификация заключается в замене расстояния между пластинами плоского волновода d на длину дуги между проводниками нерегулярной полосковой линии d_{eff} :

$$F(\theta) = \frac{e^{-\pi q_{eff}} e^{-\pi q_{eff} \cos \theta} \sin(\pi q_{eff} \sin \theta)}{\pi \sin \theta}, \quad (3)$$

где $q_{eff} = \frac{kd_{eff}}{2\pi}$, θ – зенитный угол в сферической системе координат.

Определим точность вычисления с помощью предлагаемой методики значения полуширины главного лепестка диаграммы направленности по уровню -10 дБ для нерегулярных ТЕМ рупоров. Под полушириной главного лепестка диаграммы направленности по уровню -10 дБ здесь и далее подразумевается угол θ в градусах, при котором главный лепесток диаграммы направленности в E -плоскости пересекает уровень -10 дБ.

Сравнение характеристик, полученных с помощью предлагаемой методики и с помощью МКЭ, показывает, что предлагаемая методика описывает полуширину главного лепестка диаграммы направленности по уровню -10 дБ для нерегулярных ТЕМ рупоров для значений ka в пределах от 3 до 7 с относительной точностью 10–15% (рис. 14–17).

Вторая методика вычисления характеристик излучения открытого конца нерегулярной полосковой линии основана на применении апертурного метода Кирхгофа. Для описания поля на конце линии использована тангенциальная составляющая основной моды E -секториального рупора. Окончательная формула для вычисления диаграммы направленности нерегулярной полосковой линии имеет вид:

$$F(\theta) = \left| (1 + \cos \theta) \int_{-y_n}^{y_n} H_0^{(2)}(kr) \cos\left(\arctan \frac{y_s}{x_n}\right) e^{iky_s \sin \theta} dy_s \right|, \quad (4)$$

где $H_0^{(2)}(kr)$ – функция Ганкеля второго рода от аргумента kr , r – радиус-вектор, изменяющийся в пределах раскрытия, y_s и x_n – максимальный раскрыв открытого конца линии в плоскостях E - и H -, соответственно, β_n – угол между проводниками последней перед апертурой секции.

Сравнение характеристик, полученных с помощью предлагаемой методики и с помощью МКЭ, показывает, что предлагаемая методика описывает полуширину главного лепестка диаграммы направленности по уровню -10 дБ для нерегулярных ТЕМ рупоров для значений ka в пределах от 5 до 10 с относительной точностью порядка 15–20% (рис. 14–17).

Обе описанные выше модели используют данные об угле между пластинами только последней секции. Следующие две методики учитывают всю последовательность углов β_i . Первая из них – это токовый метод Кирхгофа. Здесь каждая секция линии представляется в виде пары излучающих токовых нитей. Амплитуда диаграммы направленности находится как интеграл от тока по их длине. В местах перехода из области с одним распределением тока в область с другим распределением, т.е. местах разрыва производной образующей проводников линии, ток сшивается исходя из требования непрерывности. Ток на нижнем проводнике равен по модулю и противоположен по направлению току на верхнем.

Таким образом, комплексная диаграмма направленности одной излучающей нити вычисляется по формуле:

$$\dot{F}_i(\theta) = \sin\left(\theta - \frac{\beta_i}{2}\right) \int_{x_{i-1}}^{x_i} H_0^{(2)}(kr) \frac{H_0^{(2)}(kr(x_{i-1}, y_{i-1}))}{H_0^{(2)}(kr(x_{i-1}, y_i))} e^{ikx \cos \theta +iky_i(x) \sin \theta} dx, \quad (5)$$

где r – радиус-вектор, описывающий профиль очередной секции, x_i – координата точки ее окончания по оси x , y_i – уравнение прямой, описывающей профиль очередной секции.

Окончательно, диаграмма направленности получается как сумма отдельных диаграмм направленностей секций:

$$F(\theta) = \left| \sum_{i=1}^n \dot{F}_{\text{верхн},i}(\theta) + \dot{F}_{\text{нижн},i}(\theta) \right|, \quad (6)$$

где n – количество секций.

Сравнение характеристик, полученных с помощью предлагаемой методики и с помощью МКЭ, показывает, что предлагаемая методика описывает по-

луширину главного лепестка диаграммы направленности по уровню -10 дБ для нерегулярных ТЕМ рупоров для значений ka в пределах от 3 до 15 с относительной точностью 15–20% (рис. 14–17).

Рассматривается также модель излучения открытого конца нерегулярной полосковой линии, основанная на равномерной асимптотической теории дифракции (РАТД). Суммарное поле рупора в этой модели определяется суммой первичного поля и дифракционных полей первого порядка малости, вычисленных с помощью РАТД (Тимофеева, А.А. Расчет направленных свойств рупорных антенн дифракционным методом //Труды НИИР. 1976. № 2. С. 7-12).

Сравнение характеристик, полученных с помощью предлагаемой модели и с помощью МКЭ, показывает, что предлагаемая модель описывает полуширину главного лепестка диаграммы направленности по уровню -10 дБ для нерегулярных ТЕМ рупоров для значений ka в пределах от 2 до 3 с относительной точностью 10% (рис. 14–17).

На рис. 14–17 приведены нормированные диаграммы направленности в E -плоскости для нерегулярного ТЕМ рупора, состоящего из 6 секций с углами между пластинами β_i , равными [16.61, 36.61, 46.61, 86.61, 96.61, 96.61], $i = 1..6$, соответственно.

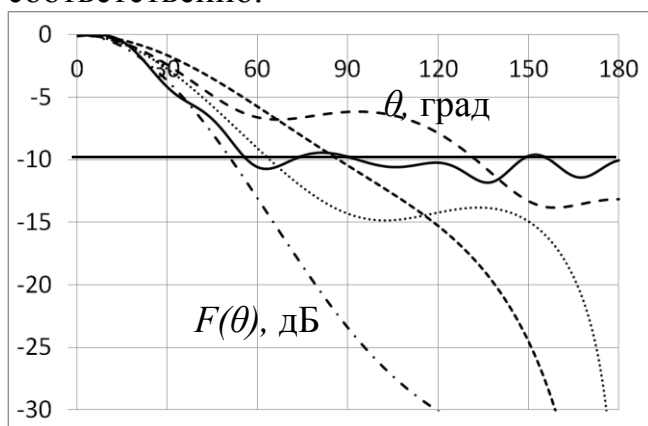


Рис. 14. Диаграммы направленности в E -плоскости для $ka = 3$

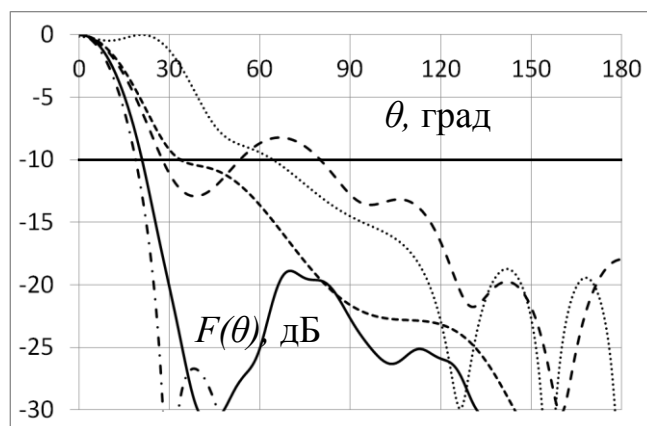


Рис. 15. Диаграммы направленности в E -плоскости для $ka = 6.3$

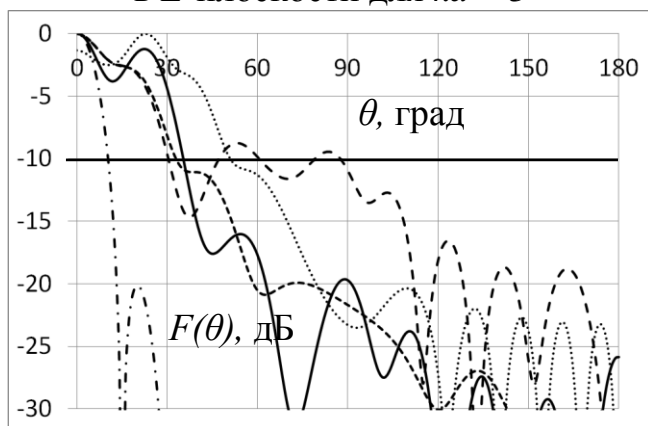


Рис. 16. Диаграммы направленности в E -плоскости для $ka = 12$

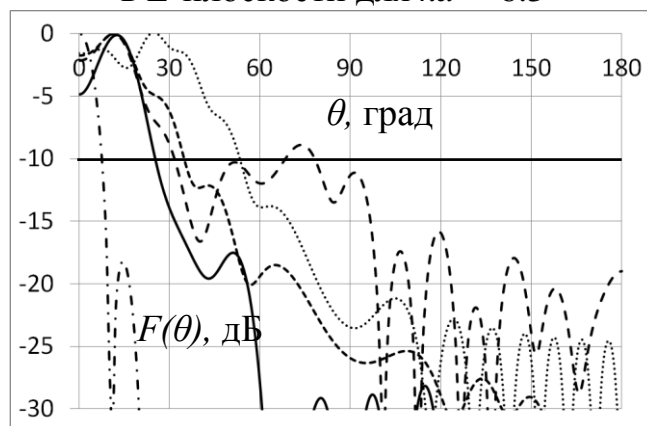


Рис. 17. Диаграммы направленности в E -плоскости для $ka = 17$

Сплошной линией обозначены диаграммы направленности в E -плоскости, полученные с помощью МКЭ. Штриховой линией с короткими штрихами обо-

значены диаграммы, полученные с помощью апертурного метода Кирхгофа, длинными штрихами – с помощью токового метода Кирхгофа, штрих-пунктирной линией – с помощью модифицированной формулы Л.А. Вайнштейна, пунктирной – с помощью РАГД.

Во втором разделе главы решаются задачи оптимизации характеристик геометрии нерегулярных ТЕМ рупоров на основе разработанных методик.

Сначала решается задача стабилизации формы главного лепестка диаграммы направленности нерегулярного ТЕМ рупора. В качестве целевой функции оптимизации выбрано среднеквадратическое отклонение (СКО) значения полуширины диаграммы направленности от среднего значения этой характеристики для ka , изменяющихся в пределах от 3 до 7.

Оптимизация проводилась перебором углов β_i при длинах секций, равных L . На каждом следующем шаге оптимизации при увеличении количества секций учитывался полученный на предыдущем шаге диапазон изменения углов β_i , обеспечивающих минимум целевой функции. В результате оптимизации получено, что минимальное значение целевой функции достигается при максимальном угле раскрыва последней секции рупора.

В результате оптимизации получена геометрия нерегулярного кусочно-плоского ТЕМ рупора (рис. 18) со следующими углами между пластинами секций $\beta_i, i = 1..6$: [16.61, 16.61, 16.61, 96.61, 136.61, 180°].

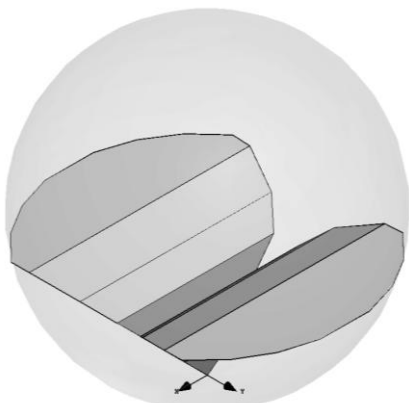


Рис. 18. Геометрия оптимизированного кусочно-плоского ТЕМ рупора

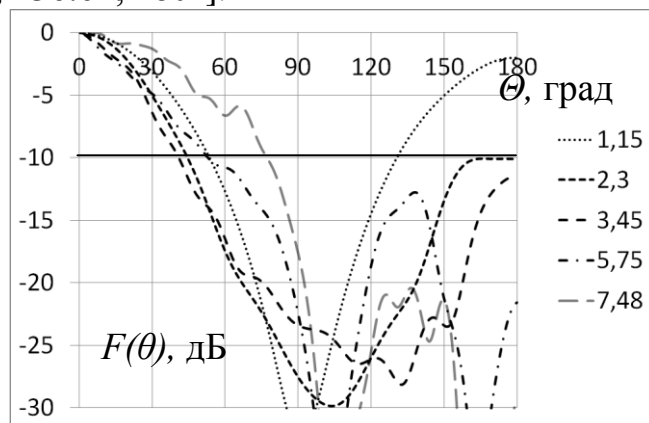


Рис. 19. Нормированные диаграммы направленности кусочно-плоского рупора

На рис. 19 приведены нормированные диаграммы направленности оптимизированного кусочно-плоского рупора для различных ka . Как видно на рисунке, полуширина диаграммы направленности оптимизированного рупора по уровню -10 дБ для значений ka в пределах от 1 до 6 меняется на 13° , что составляет около 25% от ее значения.

Далее рассматривается задача получения максимума КИП антенны в сверхширокой полосе частот с использованием ТЕМ рупорно-линзовых антенн.

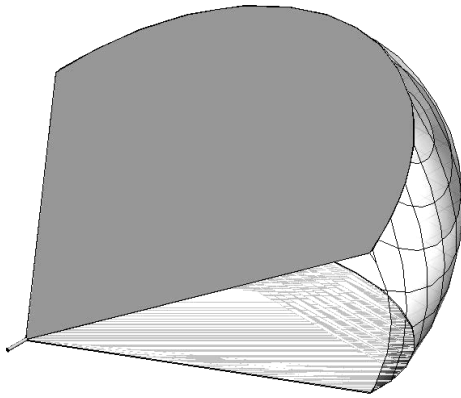


Рис. 20. Геометрия рупорно-линзовой антенны

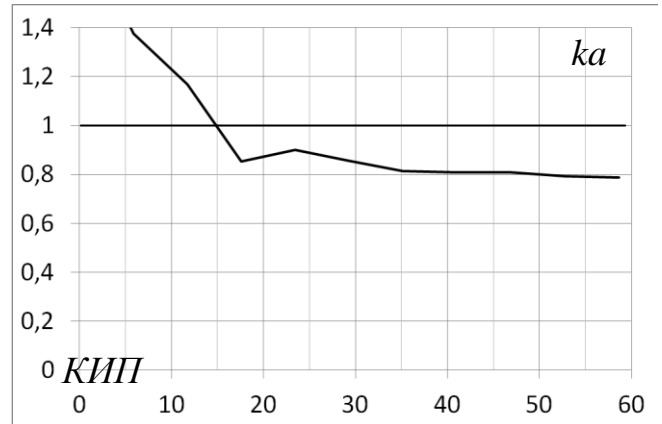


Рис. 21. Зависимость КИП рупорно-линзовой антенны от ka

Сначала теоретически и экспериментально исследуется регулярный ТЕМ рупор, заполненный диэлектриком с диэлектрической проницаемостью, равной $\epsilon = 2.25$, выходная поверхность которого обрезана в форме линзы, фокусирующей сферическую волну рупора в плоский фронт (рис. 20).

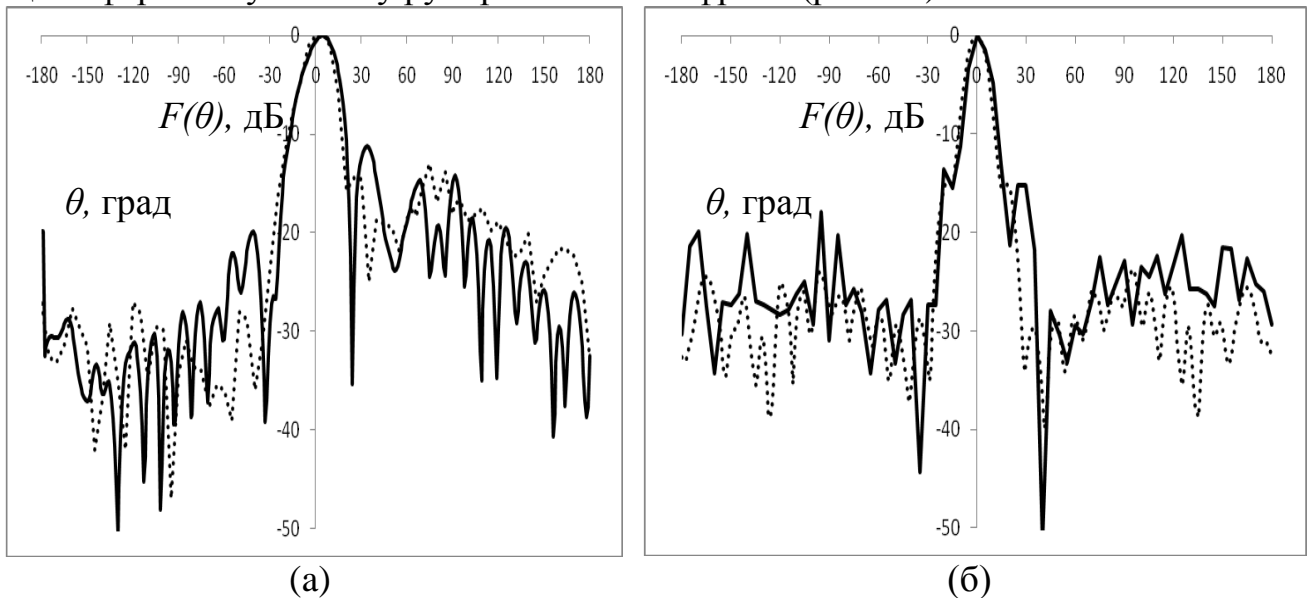


Рис. 22. Сравнение экспериментальной и вычисленной диаграмм направленности для $ka = 23.5$ в (а) E -плоскости, (б) H -плоскости

В процессе исследований выявлено, что данная конструкция позволяет достичь рекордного значения КИП в сверхширокой полосе частот (рис. 21). Горизонтальной линией на рис. 21 отмечен КИП, равный 1. Проведенный физический эксперимент подтверждает теоретические выводы (рис. 22–23). Изготовленный образец рупорно-линзовой антенны можно видеть на рис. 24.

В **Заключении** подведены итоги по диссертации в целом и сделаны общие выводы.

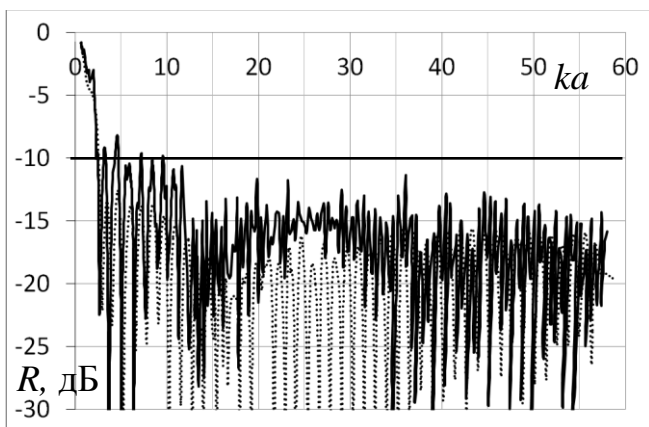


Рис. 23. Сравнение экспериментального и вычисленного коэффициента отражения регулярной рупорно-линзовой антенны

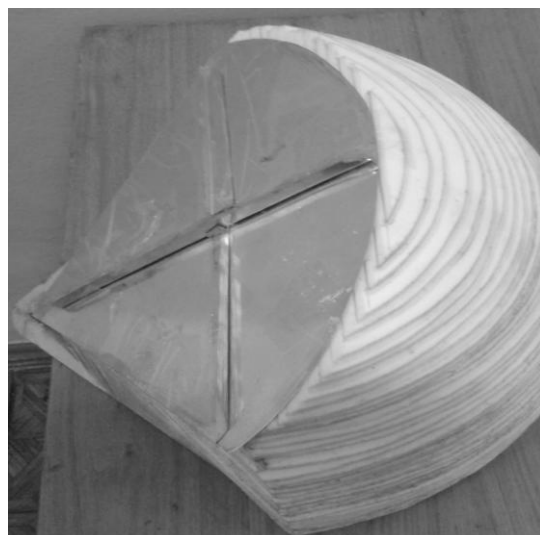


Рис. 24. Физическая модель рупорно-линзовой антенны

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- с использованием метода поперечных сечений, решения А. Зоммерфельда для дифракции плоской волны на полуплоскости, решения В.А. Калошина для матрицы рассеяния на стыке рупоров и численных данных Ли и Смита развита численно-аналитическая модель распространения основной волны плавно-нерегулярной полосковой линии в одномодовом приближении;

- на основе развитой модели разработан алгоритм, с помощью которого синтезирован плавно-нерегулярный ТЕМ рупор с полосой частот по уровню согласования -10 дБ, равной пяти октавам, обладающий минимальными для своего класса габаритами (КИР = 0.56);

- с использованием решения А. Зоммерфельда для дифракции плоской волны на полуплоскости и решения Л.А. Вайнштейна для отражения от конца плоского волновода развита аналитическая модель распространения основной волны в нерегулярной кусочно-плоской полосковой линии в одномодовом приближении;

- на основе развитой модели разработан алгоритм, с помощью которого синтезирован кусочно-плоский ТЕМ рупор с полосой частот по уровню согласования -10 дБ более четырех октав, обладающий минимальными для своего класса габаритами (КИР = 0.69);

- в результате численной оптимизации синтезирован полигональный ТЕМ рупор с полосой частот по уровню согласования -10 дБ более трех октав, обладающий минимальными для своего класса габаритами (КИР = 0.63);

- с использованием решения Л.А. Вайнштейна для излучения из открытого конца плоского волновода, метода Г. Кирхгофа и РАТД разработаны несколько моделей излучения основной волны нерегулярной полосковой линии в одномодовом приближении;

– на основе развитой модели разработан алгоритм, с помощью которого синтезирован кусочно-плоский ТЕМ рупор со стабильной шириной главного лепестка диаграммы направленности в E -плоскости (вариация ширины по уровню -10 дБ менее 25% в полосе частот более двух октав);

– предложен, а также теоретически и экспериментально исследован металл-диэлектрический ТЕМ рупор с коэффициентом использования поверхности более 0.8 в полосе частот по уровню согласования -10 дБ более четырех октав.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Ефимова, Н.А. Исследование рупорно-линзовой ТЕМ-антенны / Н.А. Ефимова, В.А. Калошин, Е.А. Скородумова // Радиотехника и электроника. – 2012. – № 12. – т. 57. – С. 1020-1027.

2. Ефимова, Н.А. Исследование сверхширокополосной кольцевой антенной решетки [Электронный ресурс]: 15.01.2013. / В.Л. Бирюков, Н.А. Ефимова, В.И. Калиничев, В.А. Калошин, Л.И. Пангонис // Журнал Радиоэлектроники. – 2013. – № 1. <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/20/text.html>. (08.11.2014).

3. Ефимова, Н.А. Исследование рупорно-линзовой ТЕМ-антенны как элемента кольцевой антенной решетки / Н.А. Ефимова [Электронный ресурс]: 15.09.2013. // Труды МАИ. 2013. № 68. <http://mai.ru/upload/iblock/254/254db3795e9716ee1f9da1723d9f25a2.pdf> (08.11.2014).

4. Ефимова, Н.А. О согласовании симметричных ТЕМ-рупоров / Н.А. Ефимова, В.А. Калошин // «Радиотехника и электроника». – 2014. – № 1. – т. 59. – С. 60-66.

5. Богатых, Н.А. Исследование и оптимизация полигонального ТЕМ рупора [Электронный ресурс]: 23.01.2015 // Журнал Радиоэлектроники. – 2015. – № 1. <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/9/text.html>. (23.01.2015).

6. Ефимова, Н.А. Минимизация искажений диаграммы направленности рупорных антенн в сверхширокой полосе частот // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – № 1, С. 39-45.

Статьи и материалы конференций

7. Ефимова, Н.А. Исследование рупорно-линзовой ТЕМ-антенны как элемента кольцевой антенной решетки / Н.А. Ефимова // «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» всероссийский межотраслевой молодежный научно-технический форум (Москва, МАИ, 30 октября 2012 г.) С. 96

8. Ефимова, Н.А. Сверхширокополосные излучатели для кольцевых антенных решеток / Н.А. Ефимова, В.А. Калошин // VI Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 19-23 ноября 2012), С. 289-292

9. Efimova, N.A. Matching of a Piece-Wise Linear TEM Horn [Электронный ресурс]: 25.10.2014. / N.A. Efimova, V.A. Kaloshin // 31st URSI General Assembly and Scientific Symposium, (Китай, Пекин, 16-22 августа 2014) http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6929163&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6929163 (08.11.2014)

10. Ефимова, Н.А. Исследование и оптимизация TEM рупоров в сверхширокой полосе частот / Н.А. Ефимова // 2-ая Всероссийская микроволновая конференция. Доклады (Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 24-28 ноября 2014) С. 474-478

11. Ефимова, Н.А. Диаграммы направленности TEM рупора в сверхширокой полосе частот [Электронный ресурс]: 15.01.2015 / Н.А. Ефимова // Международная научно-техническая конференция Intermatic – 2014 «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (Москва, МИРЭА, 1-5 декабря 2014), Ч. 5, С. 193-198. <http://conf.mirea.ru/CD2014/pdf/p5/51.pdf> (22.01.2015).

Подписано в печать 13.03.2015 г.

Печать трафаретная

Заказ № 13652

Тираж: 100 экз.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

www.autoreferat.ru