

На правах рукописи



**ФАМ ВАН ЧУНГ**  
**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ**  
**КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА**

Специальность 2.2.14 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико – математических наук

Долгопрудный – 2021

Работа выполнена на кафедре твердотельной электроники, радиофизики и прикладных информационных технологий ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель **Калошин Вадим Анатольевич**, доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты **Овчинникова Елена Викторовна**, доктор технических наук, профессор кафедры «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» ФГАОУ ВО МАИ

**Белькович Игорь Викторович**, кандидат физико-математических наук, нач. лаборатории бортовых антенн и антенных решеток АО «ОКБ МЭИ»

Ведущая организация **ПАО «Радиофизика».**

Защита состоится «24» сентября 2021 г., в 11-30, на заседании диссертационного совета 24.1.111.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (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://cplire.ru/rus/dissertations/PhamVanChung/dissertation.pdf>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Кузьмин  
Лев Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из основных тенденций развития радиотехнических систем является расширение полосы рабочих частот, которая является одним из главных параметров системы. Расширение полосы частот повышает точность определения дальности до цели в радиолокационных системах, емкость и скорость передачи информации в системах связи и т.д.

Излучатели на основе круглого металлического волновода, содержащие возбуждатель и рупор с рабочей модой  $H_{11}$  не получили широкого применения в качестве облучателей зеркальных и линзовых систем из-за высокого уровня кросс-поляризации и боковых лепестков, разной ширины диаграммы направленности (ДН) в Е и Н плоскости, а также изменения ширины ДН (главного лепестка) или положения фазового центра с изменением частоты. Для реализации одинаковой ширины ДН в Е и Н плоскости и низкого уровня кросс-поляризации и боковых лепестков обычно используют гофрированные круглые рупоры с рабочей модой  $HE_{11}$ . Рабочая полоса таких излучателей, как правило, лежит в пределах 15...30%, что не для всех приложений является достаточным. Для расширения полосы частот используют гофр с более сложной геометрией, что приводит к значительному усложнению технологии изготовления. Близкие и стабильные в широкой полосе частот ширины ДН в Е и Н плоскости с низким уровнем боковых лепестков реализованы в металлодиэлектрических рупорах. Двухдиапазонный режим работы реализован в металлодиэлектрическом рупоре, сверхширокополосный (СШП) режим работы со стабильной шириной амплитудной ДН – в излучателях в виде решетки четырех расположенных под углом логопериодических антенн и четырехреберных рупоров с криволинейными образующими стенок и ребер. Однако уровень отражения у этих излучателей достаточно высокий (–10 дБ и выше), а фазовые ДН в этих работах не приведены.

Одинаковую ширину ДН в Е и Н плоскости имеют круглые рупоры со скалярными модами  $E_{0m}$  и  $H_{0m}$ ,  $m = 1, 2, \dots$ , которые являются высшими модами круглого металлического волновода. Эти моды сравнительно мало используются на практике. Мода  $E_{01}$  используется, главным образом, в моноимпульсных облучателях и вращающихся волноводных сочленениях. Мода  $H_{01}$  может

использоваться в тех же целях, при этом ее дополнительным достоинством является большая пропускаемая мощность. К тому же из-за отсутствия продольных токов мода  $H_{01}$  имеет очень малые тепловые потери, которые, в отличие от мод другого типа, уменьшаются с частотой, что делает ее использование в длинных трактах СВЧ и КВЧ диапазонов весьма привлекательным.

Ограниченное применение  $E_{01}$  и  $H_{01}$  мод круглого волновода в первую очередь связано со сложностью реализации широкополосных возбуждателей и излучателей со стандартной формой ДН.

Исследованию возбуждения  $E_{01}$  и  $H_{01}$  мод прямоугольным волноводом и коаксиальной линией посвящено большое количество работ, которые можно разделить на три группы. К первой группе относятся работы, посвященные разработке и исследованию компактных и узкополосных возбуждателей, выполненных, как правило, в виде стыка круглого волновода и коаксиальной линии с возбуждающим элементом или круглого и прямоугольного волноводов. Для подавления основной моды ( $H_{11}$ ) круглого волновода, а также паразитных высших мод на выходе возбуждателей используются модовые отражающие или поглощающие фильтры. Ко второй группе относятся работы, посвященные разработке и исследованию широкополосных возбуждателей в виде плавных переходов от одного сечения волновода к другому через промежуточные сечения. Такие возбуждители, как правило, имеют большие продольные размеры. К третьей группе относятся работы, в которых рассматриваются конструкции возбуждателей с использованием делителей мощности. Такие возбуждители имеют, как правило, большие поперечные размеры.

Таким образом, возбуждители мод  $E_{01}$ ,  $H_{01}$  и в известных работах имеют либо узкую полосу рабочих частот, либо сложную конструкцию и большие габариты.

Для излучения мод  $E_{01}$  и  $H_{01}$  можно использовать стандартные излучатели с питанием прямоугольным волноводом или коаксиальной линией путем обратного преобразования с применением известных возбуждателей. Однако при этом могут возникать резонансы на «запертых» модах, что приводит к ограничению полосы частот. Можно использовать излучатели на основе круглого волновода с рабочей

модой  $E_{01}$  или  $H_{01}$ , предложенные и исследованные в работах [39–43], однако их частотные характеристики не известны. Также не известны сверхширокополосные (СШП) излучатели моды  $HE_{11}$  (с полосой рабочих частот более 50%).

Таким образом, задача разработки новых типов широкополосных, в том числе, СШП возбуждателей и излучателей на основе круглого волновода с рабочими модами  $E_{01}$ ,  $H_{01}$ ,  $HE_{11}$  и исследования их частотных характеристик является актуальной.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка, оптимизация параметров и исследование частотных характеристик широкополосных возбуждателей и излучателей на основе круглого волновода с рабочими модами  $E_{01}$ ,  $H_{01}$  и  $HE_{11}$ .

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1) Разработка электродинамических моделей широкополосных возбуждателей мод  $E_{01}$ ,  $H_{01}$  и  $HE_{11}$  круглого волновода.

2) Разработка электродинамических моделей широкополосных излучателей мод  $E_{01}$ ,  $H_{01}$  и  $HE_{11}$  круглого волновода.

3) Оптимизация параметров и исследование частотных характеристик возбуждателей скалярных мод круглого волновода.

4) Оптимизация параметров и исследование частотных характеристик излучателей скалярных мод круглого волновода Пангониса и Пангониса - Власова.

5) Оптимизация параметров и исследование частотных характеристик рупорного излучателя скалярных мод круглого волновода с анизотропной пластиной - поляризатором.

6) Разработка и исследование частотных характеристик антенной решетки на основе круглого волновода с модой  $H_{01}$ .

7) Разработка и исследование частотных характеристик металлодиэлектрического и четырехреберного металлодиэлектрического рупорного излучателя  $HE_{11}$  моды круглого волновода.

8) Изготовление экспериментального образца и проведение измерений параметров широкополосного возбуждателя моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом.

9) Изготовление экспериментального образца и проведение измерений параметров рупорного излучателя скалярных мод круглого волновода с анизотропной пластиной– поляризатором.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использованы численные методы электродинамического моделирования (конечных элементов и конечных разностей во временной области) и оптимизации параметров, а также измерения характеристик излучения методом дальней зоны.

**Новые научные результаты.** В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1) Разработаны и исследованы новые широкополосные возбуждители мод  $E_{01}$  и  $H_{01}$  с волноводным входом.

2) Разработаны и исследованы новые широкополосные возбуждители мод  $E_{01}$  и  $H_{01}$  с коаксиальным входом.

3) Исследованы частотные характеристики излучателя Пангониса и Пангониса–Власова с оптимальными параметрами.

4) Исследованы частотные характеристики рупорного излучателя скалярных мод круглого волновода с двумя вариантами анизотропной пластины – поляризатора.

5) Разработаны и исследованы два варианта широкополосной антенной решетки с системой питания на основе круглого волновода с рабочей модой  $H_{01}$ .

6) Разработаны и исследованы два СШП излучателя в виде круглого трехслойного металлодиэлектрического и четырехреберного металлодиэлектрического рупора с рабочей модой  $HE_{11}$ .

**Практическая значимость работы.** Результаты работы, имеющие практическую значимость:

1. Разработана конструкция и изготовлен экспериментальный образец широкополосного возбуждителя моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом.

2. Разработана конструкция и изготовлен экспериментальный образец широкополосного круглого рупора с рабочими модами  $E_{01}$  и  $H_{01}$  и анизотропной диэлектрической пластиной.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Разработанные и исследованные возбуждители моды  $E_{01}$  круглого волновода обеспечивают рабочую полосу частот более 47% при возбуждении как с коаксиального, так и с волноводного входа при потерях менее 0.1 дБ.

2. Разработанные и исследованные возбуждители моды  $H_{01}$  круглого волновода обеспечивают рабочую полосу частот более 16% при возбуждении с коаксиального хода и более 50% – с волноводного входа при потерях менее 0.15 дБ.

3. Исследованный рупорный излучатель скалярных мод круглого волновода с двумя вариантами анизотропной пластины–поляризатора обеспечивает рабочую полосу частот более 20%.

4. Разработанные и исследованные варианты антенной решетки с системой питания на основе круглого волновода с рабочей модой  $H_{01}$  обеспечивают рабочую полосу частот более 33%.

5. Разработанный и исследованный СШП облучатель в виде круглого металлодиэлектрического четырехреберного рупора с рабочей модой  $HE_{11}$  круглого волновода обеспечивает уровень облучения на краях углового сектора  $50^\circ$  в пределах  $-10\dots-15$  дБ в полосе частот более 100%.

**Достоверность** результатов обеспечена использованием двух апробированных методов численного моделирования (конечных элементов и конечных разностей во временной области), а также сопоставлением результатов моделирования и измерений экспериментальных образцов.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались на Международной конференции «2021 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications», Moscow. March. 2021; Международной конференции «2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)», Divnomorskoe, Krasnodar Region, Russia, June, 2021 и Московском семинаре по электродинамике и антеннам им. Я.Н. Фельда.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, из них 3 – в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и

Scopus, 1 - в трудах Международных конференций, из них 1 - входящая в базу данных Scopus. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации составил 63 страниц.

**Личный вклад.** В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит: разработка электродинамических моделей с использованием методов конечных элементов (МКЭ) и конечных разностей во временной области (МКРВО), разработка, оптимизация и исследование возбудителей мод  $E_{01}$ ,  $H_{01}$  и  $HE_{11}$ , оптимизация и исследование излучателей мод  $E_{01}$ ,  $H_{01}$ , разработка, оптимизация и исследование излучателей моды  $HE_{11}$ , разработка конструкции, изготовление экспериментальных образцов возбудителя и излучателя моды  $E_{01}$  с анизотропной линзой и проведение измерений их параметров (совместно с Е.В. Фроловой).

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во Введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, описаны научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, приведены сведения об апробации работы и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** разработаны и исследованы широкополосные возбудители основных скалярных мод круглого волновода. В начале главы дан обзор известных возбудителей мод  $E_{01}$  и  $H_{01}$  круглого волновода.

В разделе 1.1 разработаны и исследованы широкополосные возбудители моды  $E_{01}$  с волноводным и коаксиальным входом. Возбудитель моды  $E_{01}$  (рис.1) с волноводным входом содержит Т-образный волноводный делитель на два канала, два изгиба, которые переходят в Е-секториальные рупоры, которые, в свою очередь, возбуждают круглый двухмодовый волновод через отверстия в его стенке. В качестве согласующих элементов в Т-образном делителе установлены два металлических цилиндра, а в круглом волноводе – усеченный металлический конус. В результате оптимизации параметров возбудителя с входным прямоугольным сечением 23x10 мм и диаметром круглого волновода 28 мм с использованием МКЭ в среде Ansys HFSS методом получены следующие значения параметров: расстояния от согласующих цилиндров в делителе



мощности до плоскости сочленения волноводов равны 13.3 и 19.8 мм, их диаметры равны 0.7 и 1.7 мм, соответственно, высота усеченного конуса равна 9 мм, диаметры вершины и основания равны 2.2 и 10.5 мм, соответственно.

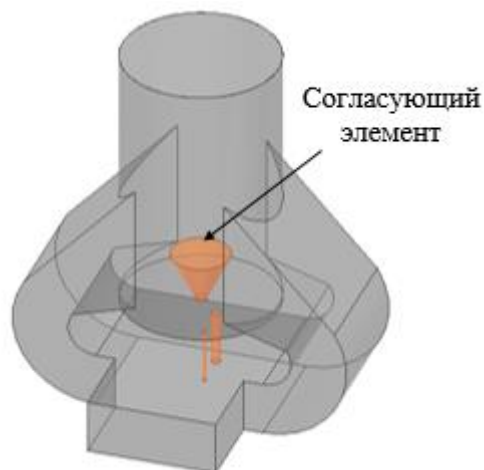


Рис. 1. Возбудитель моды  $E_{01}$

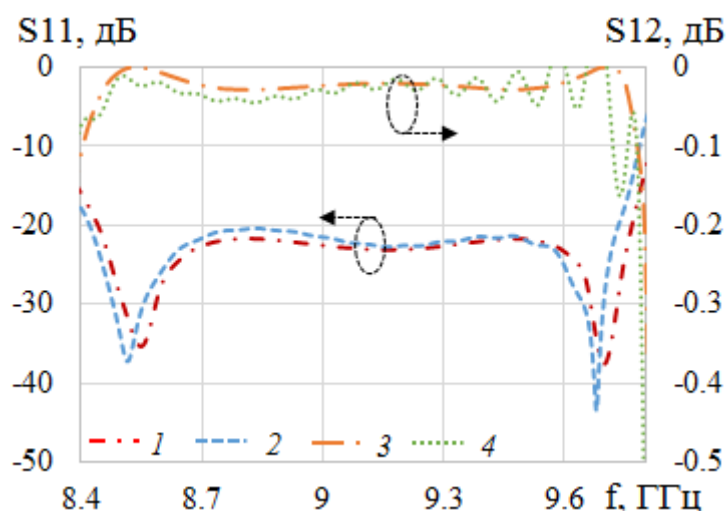


Рис. 2. Частотные характеристики  $S_{11}$  (1, 2),  $S_{12}$  (3, 4), МКЭ (1, 3), МКРВО (2, 4)

Как показало моделирование возбуждителя с использованием МКЭ и МКРВО в полосе частот 8.45...9.8 ГГц (относительная полоса 15%) коэффициент отражения не превышает уровень  $-20$  дБ. При этом потери на возбуждение моды  $E_{01}$  не превышают 0.1 дБ (рис.2).

Разработаны два варианта возбуждителя моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом. Первый вариант возбуждителя (рис.3а) содержит отрезок круглого волновода и возбуждающий элемент в виде биконической антенны с внутренним конусом, выполненным в виде набора коаксиальных цилиндров. Угол раствора внешнего конуса и диаметры цилиндров оптимизированы с использованием МКЭ. В результате моделирования с использованием МКЭ и МКРВО (рис.4) показано, что в полосе частот 8.7...12.9 ГГц (относительная полоса 39%) коэффициент отражения ( $S_{11}$ ) не превышает уровень  $-20$  дБ, а потери на возбуждение моды  $E_{01}$  не превышают 0.1 дБ (рис.3б).

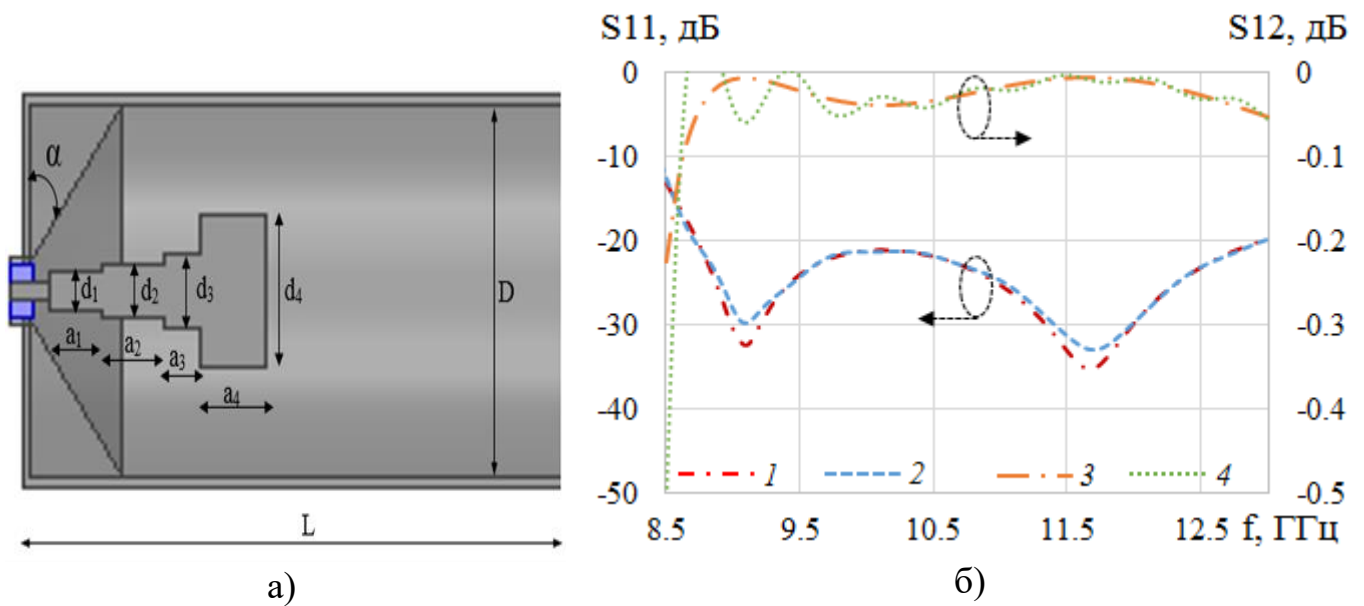


Рис. 3. Возбудитель моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом (а) и его частотные характеристики (б):  $S_{11}$  (1, 2),  $S_{12}$  (3, 4), МКЭ (1, 3), МКРВО (2, 4)

Второй вариант возбудителя моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом состоит из двух частей (рис.4а).

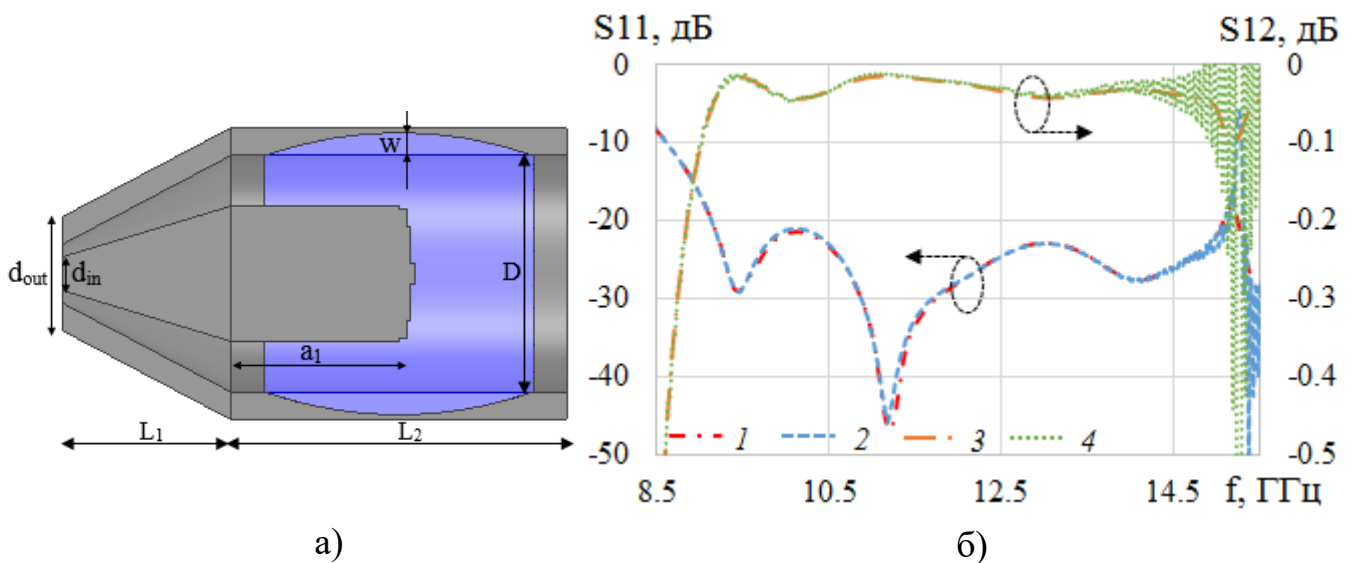


Рис. 4. Возбудитель моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом (а) и его частотные характеристики (б):  $S_{11}$  (1, 2),  $S_{12}$  (3, 4), рассчитанные с использованием МКЭ (1,3) и МКРВО (2,4)

Первая часть возбудителя представляет собой биконическую линию. Вторая часть – круглый металлодиэлектрический коаксиальный волновод, внутренний проводник которого – металлический цилиндр с ступенчатым срезом.

Диэлектрической слой на внешнем проводящем цилиндре представляет собой тор из полипропилена ( $\epsilon = 2.25$ ) с образующей в виде сегмента круга радиуса. Параметры возбуждителя оптимизированы с использованием МКЭ. В результате моделирования с использованием МКЭ и МКРВО показано, что в полосе частот 9.25...15.1 ГГц (относительная полоса 48%) коэффициент отражения не превышает уровень  $-20$  дБ, а потери на возбуждение моды  $E_{01}$  не превышают 0.1 дБ (рис.4б).

Для расширения полосы частот возбуждителя моды  $E_{01}$  с волноводным входом были разработаны два варианта коаксиально-волноводного перехода (КВП), каждый из которых состоит из трех частей. Первая часть представляется собой линейный переход из прямоугольного волновода размера 23x10 мм в П-образный волновод. П-образный волновод также с использованием линейного перехода преобразуется в прямоугольный коаксиальный волновод с продольной перегородкой, которая обрывается и прямоугольный коаксиальный волновод далее плавно переходит в коаксиальную линию с внешним диаметром 7 мм. На расстоянии 4.9 мм от обрыва перегородки расположен согласующий штырь диаметром 0.05 мм. Далее были исследованы возбуждители моды  $E_{01}$ , содержащие разработанные КВП в сочетании с предложенными и исследованными выше возбуждителями моды  $E_{01}$  с коаксиальным входом. В результате моделирования с использованием МКЭ и МКРВО показано, что для первого варианта КВП в сочетании с первым вариантом возбуждителя с коаксиальным входом в полосе частот 8.7...15.3 ГГц (относительная полоса частот 55%) коэффициент отражения возбуждителя не превышает уровень  $-20$  дБ. При этом потери возбуждение моды  $E_{01}$  не превышают 0.1 дБ (рис. 5а). У второго варианта КВП в сочетании со вторым вариантом возбуждителя с коаксиальным входом в полосе частот 9.3...14.6 ГГц (относительная полоса 44%) коэффициент отражения не превышает уровень  $-20$  дБ, а потери на возбуждение моды  $E_{01}$  не превышают 0.1 дБ (рис. 5б).

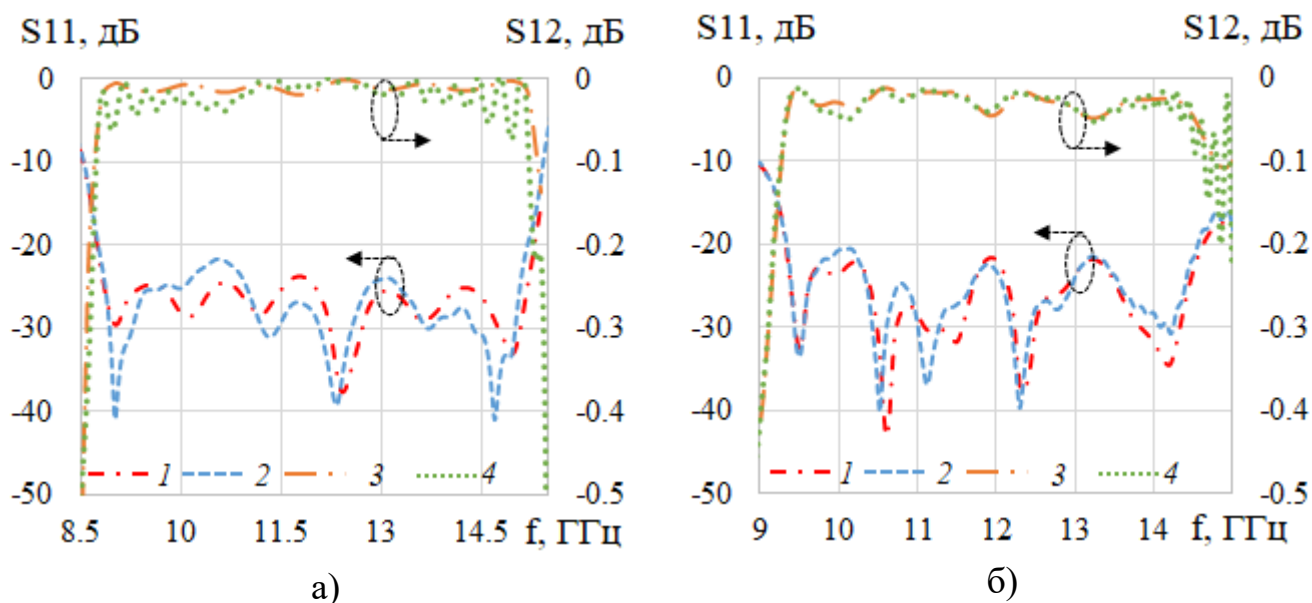


Рис. 5. Зависимость коэффициентов отражения  $S_{11}$  (1, 2) и возбуждения  $S_{12}$  (3, 4) варианта 1 возбуждителя (а) и варианта 2 возбуждителя (б) моды  $E_{01}$  от частоты: МКЭ (1, 3), МКРВО (2, 4)

В разделе 1.2 разработаны и исследованы широкополосные возбуждители моды  $H_{01}$  с волноводным и коаксиальным входом. Вначале исследован возбуждатель с волноводным входом, который состоит из трех частей (рис. 6а).

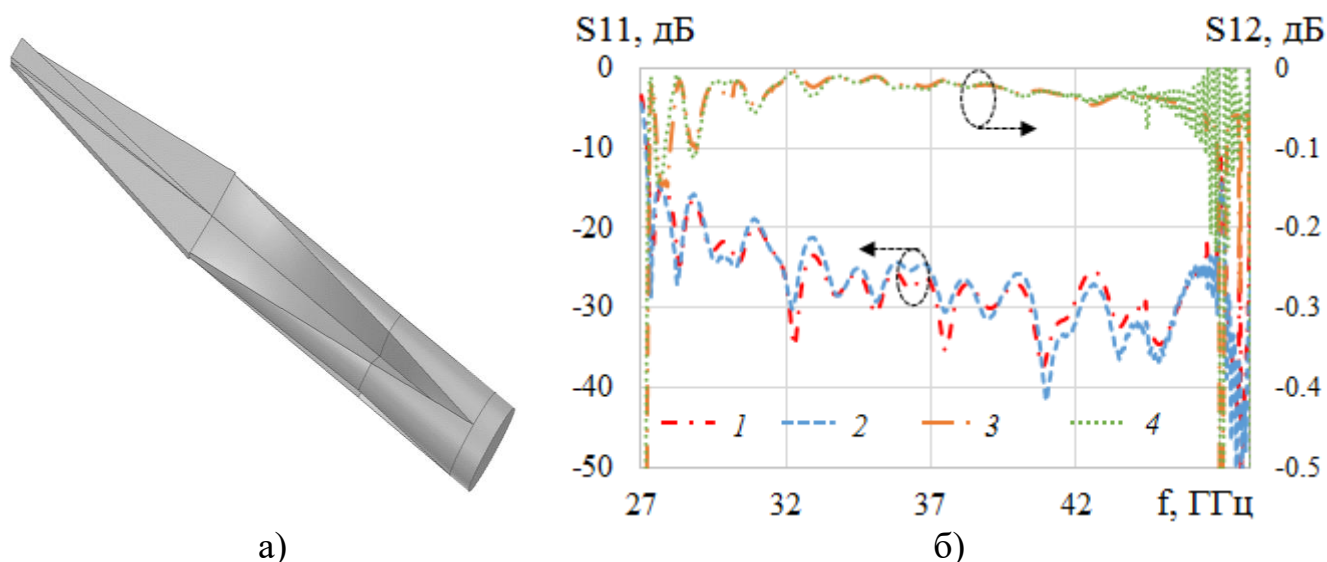


Рис. 6. Конструкция возбуждителя моды  $H_{01}$  и его частотные характеристики (б):  $S_{11}$  (1, 2),  $S_{12}$  (3, 4), рассчитанные с использованием МКЭ (1,3) и МКРВО (2,4)

Первая часть возбуждителя представляет собой плавный переход одномодового прямоугольного волновода с входным сечением  $7.2 \times 3.4$  мм, верхняя половина которого постепенно сужается по двум координатам, при этом

нижняя часть плавно переходит в два волновода треугольного сечения и, затем, секториального сечения радиусом  $r = 7.2$  мм и с углом раствора  $\beta_1 = 31.5^\circ$ . На входе прямоугольного волновода возбуждается мода  $H_{10}$ , на выходе первой части формируется мода  $H_{01}$  секторного волновода. Конструкция второй части возбуждателя состоит из четырех секторно-винтовых переходов того же радиуса  $r$  с начальным значением угла раствора  $\beta_1/2$  и конечным –  $\beta_2 = 45^\circ$ . Выход второй части возбуждателя представляет собой крест из четырех 45-градусных секторных волноводов с возбуждённой в них модой  $H_{01}$ . Конструкция третьей части возбуждателя содержит четыре симметричных секторных разворота от угла  $\beta_2 = 45^\circ$  до угла  $\beta_3 = 90^\circ$  с постоянной угловой скоростью, которые в конце образуют круглый волновод. Все три части возбуждателя оптимизированы и исследованы по отдельности. Далее с использованием электродинамического моделирования проведен анализ возбуждателя длиной 102 мм, состоящего из трех оптимизированных выше частей, выполненных из латуни. Как показало моделирование с использованием МКЭ и МКРВО в полосе частот 27.3...46.95 ГГц (относительная полоса частот 53%), коэффициент отражения не превышает уровень –15 дБ, а потери на возбуждение моды  $H_{01}$  – менее 0.15 дБ (рис.6б).

Далее разработан и исследован возбуждатель моды  $H_{01}$  с коаксиальным входом, который состоит из двух частей (рис.7).

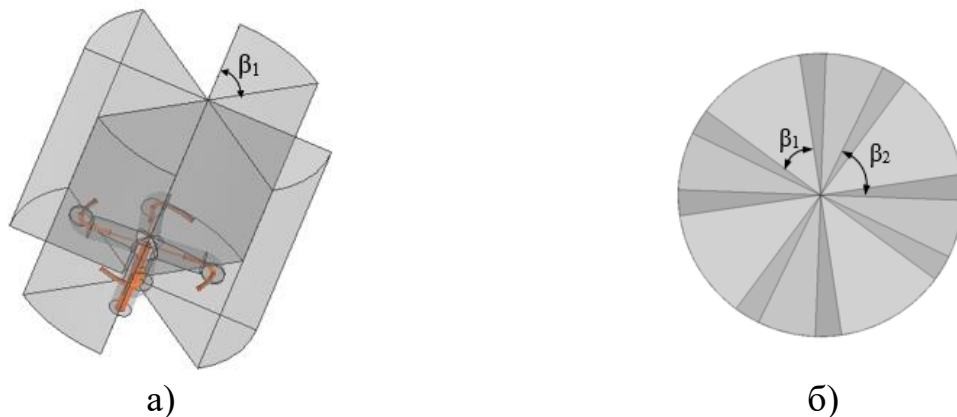


Рис. 7. Возбудитель моды  $H_{01}$  с коаксиальным входом: а) первая часть; б) вторая часть

Первая часть возбуждателя (рис.7а) представляет собой четырехканальный синфазный коаксиальный делитель, который возбуждает четыре несимметричных вибратора, расположенных в четырех секторных волноводах с угловым размером

$\beta_1=45^\circ$  каждый. Во второй части (рис.7б) угловой размер секторных волноводов скачком меняется до  $\beta_2 = 66^\circ$ . Открытые концы этих секторных волноводов возбуждают круглый волновод.

Как показало моделирование с использованием МКЭ и МКРВО в полосе частот 9...10.6 ГГц (относительная полоса частот 16%) коэффициент отражения возбуждателя не превышает уровень  $-20$  дБ. При этом потери на возбуждение моды  $H_{01}$  не превышают 0.1 дБ (рис.8).

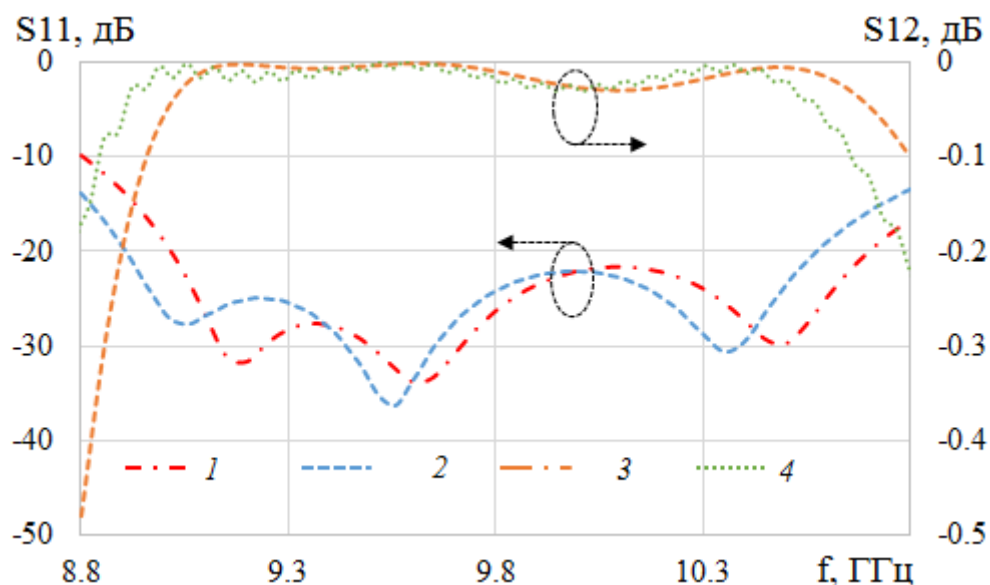


Рис. 8. Зависимость коэффициентов отражения  $S_{11}$  (1, 2) и возбуждения моды  $H_{01}$   $S_{12}$  (3, 4) от частоты: МКЭ (1, 3), МКРВО (2, 4)

**Во второй главе** исследованы широкополосные излучатели основных скалярных мод круглого волновода ( $E_{01}$  и  $H_{01}$ ). В начале главы дан обзор известных излучателей мод  $E_{01}$  и  $H_{01}$  круглого волновода.

В разделе 2.1 исследованы частотные характеристики излучателей Пангониса и Пангониса–Власова. Излучатель Пангониса представляет собой круглый волновод со ступенчатым срезом. С использованием МКЭ были рассчитаны нормированные ДН излучателя Пангониса радиусом  $R = 14$  мм и длиной выступающей части излучателя 40 мм для моды  $E_{01}$  в полосе частот 12...16 ГГц, а для моды  $H_{01}$  в полосе 15...17 ГГц. В результате было показано, что ДН имеет менискообразную форму поперечного сечения с шириной около 180 градусов в азимутальной плоскости. При этом ДН в угломестной плоскости

сканирует с частотой, а первый боковой лепесток ДН моды  $H_{01}$  в этой плоскости имеет высокий уровень (от  $-4$  до  $-6$  дБ). Поэтому далее излучатель Пангониса – Власова исследовался только при возбуждении модой  $E_{01}$ . В излучателе Пангониса – Власова для сужения ДН по азимуту используется металлическое зеркало в виде параболического цилиндра с фокальной линией, совпадающей с осью волновода. В результате оптимизации положения зеркала с целью выравнивания ширины ДН в двух плоскостях в широкой полосе частот с использованием МКЭ было найдено его оптимальное расстояние от оси, равное 20 мм при диаметре волновода 28 мм и длине выступающей части 40 мм. Далее с использованием МКЭ исследованы амплитудные и фазовые ДН оптимизированного излучателя Пангониса – Власова на четырех частотах. Показано, что с изменением частоты в плоскости симметрии сканирует как амплитудная, так и фазовая ДН излучателя. При этом кривизны фазовых ДН в Е и Н плоскостях существенно отличаются, что означает наличие у этого излучателя существенной величины астигматизма (разных положений фазового центра в разных плоскостях).

В разделе 2.2 исследованы частотные характеристики круглых рупорных излучателей с анизотропной пластиной.

Преобразователь поляризации в виде неоднородной анизотропной диэлектрической пластины установлен перед апертурой излучателя с целью формирования игольчатой ДН излучения из открытого конца круглого волновода или рупора с рабочей модой  $E_{01}$  или  $H_{01}$  путем преобразования их полей в апертуре с кольцевой (радиальной) поляризационной структурой в поля с линейной поляризацией в одной плоскости. Для этого ось тензора диэлектрической проницаемости в поперечном сечении пластины должна образовать семейство конфокальных парабол с фокусом на оси волновода. Наиболее просто реализовать неоднородную анизотропную пластину можно в виде набора однородных анизотропных пластин с поперечным сечением в виде углового сектора и осями тензора диэлектрической проницаемости касательными к соответствующим параболам на линиях, проходящих через середины секторов. Реализовать такую пластину можно из слоистого диэлектрика.

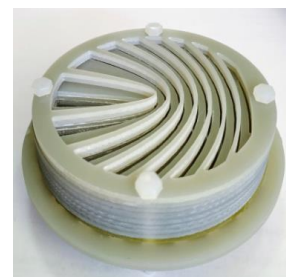
В разделе исследованы оба варианта конструкции пластины, толщина которой выбиралась с использованием известных квазистатических формул для компонентов тензора усредненной диэлектрической проницаемости, которые апробированы в диссертации путем электродинамического моделирования. Для согласования пластин на их поверхности с обеих сторон наложены четвертьволновые слои из аналогичного анизотропного диэлектрика с компонентами тензора усредненной диэлектрической проницаемости, равными компонентам тензора усредненного коэффициента преломления пластины. Как показано в результате численного моделирования с использованием МКЭ и МКРВО, излучатель моды  $E_{01}$  с пластиной из 8 секторов на некоторых частотах обеспечивает более низкий уровень кросс-поляризации, чем точное решение. При этом главный лепесток ДН рупора с модой  $H_{01}$  и неоднородной пластиной отклонен от оси рупора в  $H$ -плоскости, а максимум коэффициента усиления (КУ) на 2...3 дБ ниже, чем у рупора с пластиной из 8 секторов. Уровень кросс-поляризации у рупора с неоднородной пластиной также выше, чем у рупора с пластиной из 8 секторов. Фазовые aberrации ДН в области главного лепестка не превышают  $23^\circ$ .



а) рупор с пластиной



б) возбуждатель моды  $E_{01}$



в) анизотропная пластина

Рис. 9. Фотография экспериментального экземпляра рупора (а), возбуждателя моды  $E_{01}$  (б) и неоднородной анизотропной пластины (в)



Для экспериментальной проверки результатов численного моделирования разработана конструкция и изготовлен экспериментальный образец рупора с анизотропной неоднородной пластиной (рис.9). В качестве прототипа возбuditеля был использован возбuditель моды  $E_{01}$ , предложенный и исследованный в разделе 1.1, параметры которого были оптимизированы. В результате оптимизации удалось расширить полосу согласования до 47% и существенно уменьшить габариты возбuditеля (рис.9в). Измеренные частотные зависимости коэффициента отражения рупора с возбuditелем моды  $E_{01}$  и рупора с возбuditелем моды  $E_{01}$  и неоднородной пластиной очень близки, что говорит о достаточно хорошем согласовании пластины. Измеренные ДН экспериментального образца излучателя имеют одинаковые ширину главного лепестка в Н в Е и Н плоскости, а боковые лепестки - на уровне  $-20$  дБ.

В разделе 2.3 разработаны и исследованы два варианта синфазной антенной решетки (АР). Первый вариант АР (рис.10а) с квадратной апертурой  $30.4 \times 30.4$  мм содержит четырехэтажный 16-канальный делитель мощности (ДМ) 1 с равномерным синфазным делением мощности между волноводными выходами сечением  $7.2 \times 3.4$  мм и 16 рупоров в виде плавных волноводных переходов в Е плоскости на сечение  $7.2 \times 7.2$  мм, а вторая (рис.10б) (с квадратной апертурой  $45.6 \times 45.6$  мм) содержит шестиэтажный 24-канальный ДМ2 с равномерным синфазным делением мощности между волноводными выходами сечением  $7.2 \times 3.0$  мм и 24 рупора в виде плавных волноводных переходов в Е плоскости на прямоугольное сечение  $7.2 \times 11$  мм. Входной круглый волновод радиусом  $r = 8.78$  мм с рабочей модой  $H_{01}$  разделен металлическими перегородками на одинаковые секторные волноводы. Каждый канал ДМ имеет вход в виде секторного волновода, переход от секторного волновода в одномодовый прямоугольный в виде 90-градусного изгиба и несколько изгибов прямоугольного волновода в плоскости, ортогональной оси круглого волновода для выравнивания фаз на этаже. Для выравнивания фаз между этажами длины всех каналов ДМ выбраны равными, также как и фазовые скорости в секторных и прямоугольных волноводах. В первом варианте АР (АР1) возбуждающий круглый волновод разделен на 16 секторов с углом раствора  $\beta_1 = 22.5^\circ$ , а во втором (АР2) – на 24

сектора с углом раствора  $\beta_2 = 15^\circ$ .

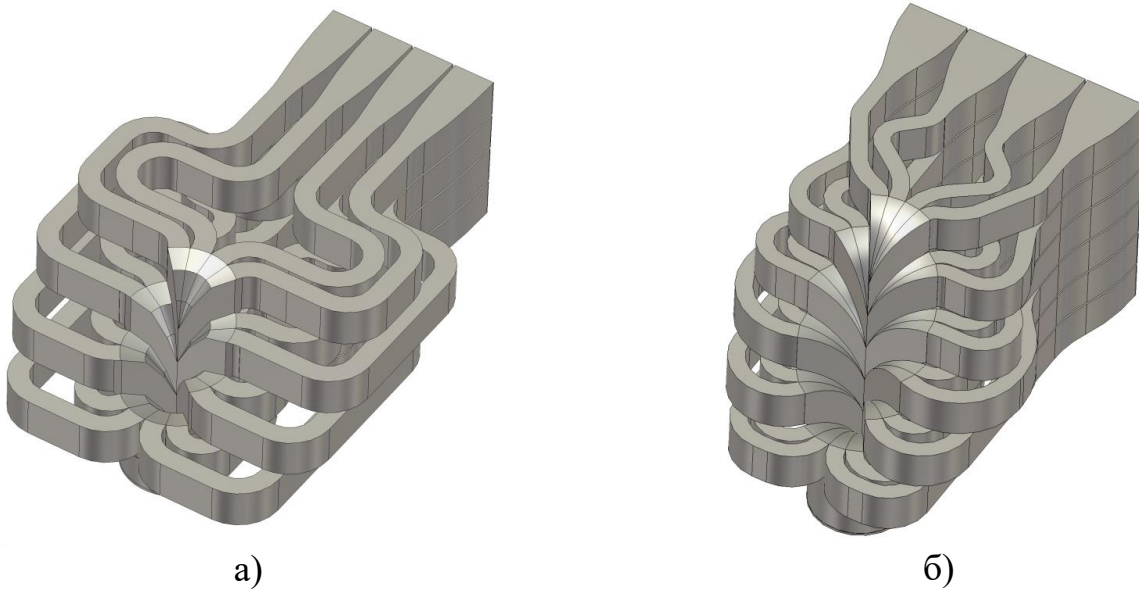


Рис. 10. Конструкции волноводных решеток из 16 элементов (а) и 24 элементов (б)

Результаты моделирования частотных зависимостей коэффициента отражения от входа АР с использованием МКЭ и МКРВО показали, что коэффициент отражения АР1 в полосе частот 25.6...45 ГГц (относительная полоса частот 55%) и АР2 - в полосе частот 27...38 ГГц (относительная полоса частот 33.8%) не превышает уровень  $-15$  дБ. При этом в полосе частот 25...38 ГГц КУ АР1 достигает уровня 22 дБ, КУ АР2 – 26 дБ (рис.11а), а уровень КИП обеих решеток более 0.85 (рис.11б).

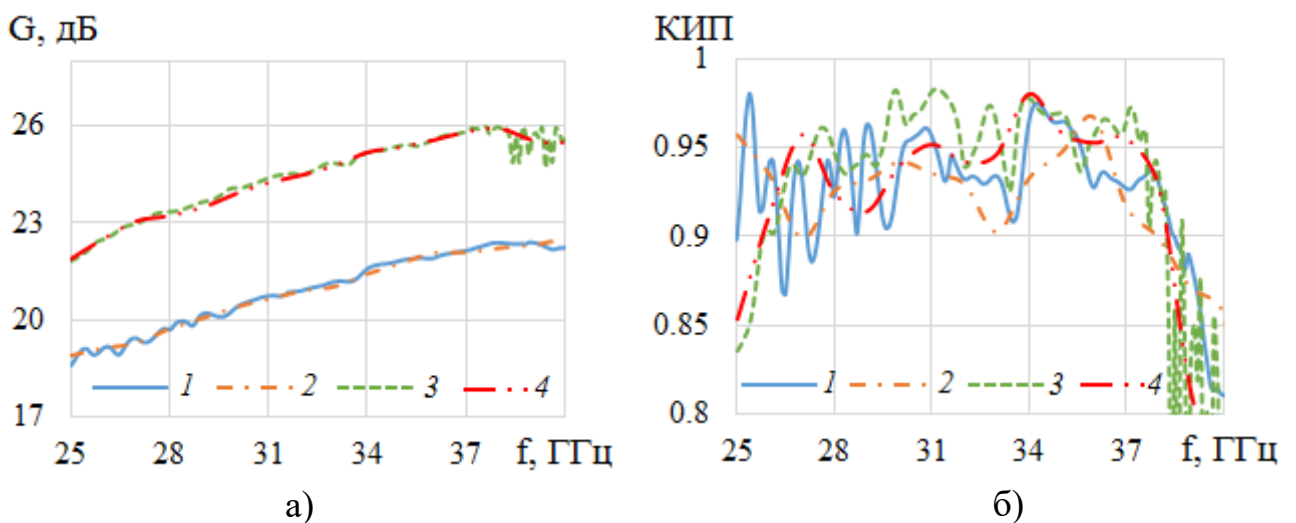


Рис. 11. Зависимости коэффициента усиления (а) и величины КИП (б) АР1 (1,2) и АР2 (3,4) от частоты, рассчитанные с использованием МКЭ (1,3) и МКРВО (2,4)

**В третьей главе** разработаны и исследованы два варианта двухполяризационного СШП облучателя с рабочей модой  $HE_{11}$ . В начале главы дан обзор известных облучателей с рабочей модой  $HE_{11}$  круглого волновода.

В разделах 3.1, 3.2 разработаны и исследованы трехслойные металлодиэлектрические рупорные облучатели (рис.12), в том числе - четырехреберный (рис.13). Первые два конических слоя облучателей заполнены

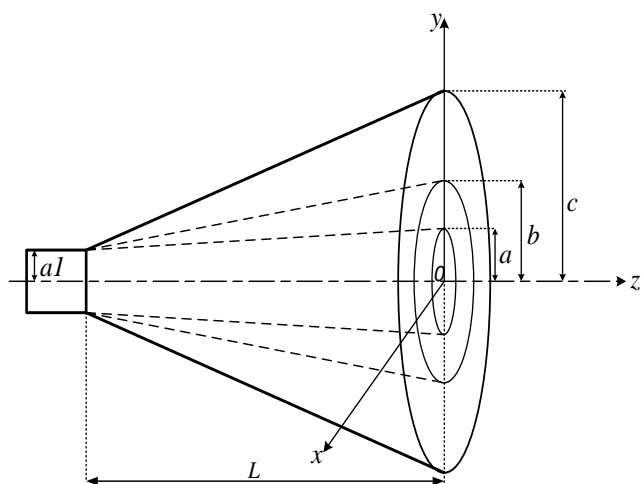


Рис. 12. Металлодиэлектрический рупорный облучатель

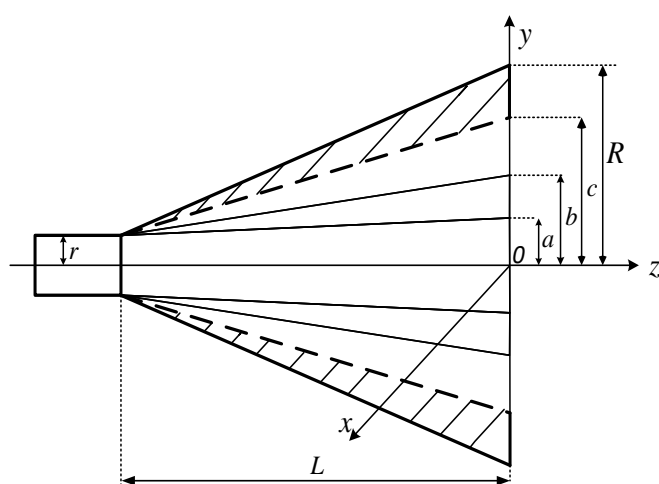


Рис. 13. Четырехреберный металлодиэлектрический облучатель

диэлектриком с диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ , и радиусами апертуры  $a$  и  $b$ , соответственно, а третий - заполнен воздухом. Рупор с радиусом апертуры  $c$  возбуждается полностью заполненным диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$  металлическим волноводом радиусом  $a1$ . С использованием МКЭ и МКРВО исследованы частотные зависимости ширины главного лепестка ДН и коэффициента отражения от входа рупорного облучателя. В процессе моделирования проводилась оптимизация по всем параметрам рупора длиной  $L = 250$  мм с целью максимизации полосы частот, в которой уровень главного лепестка ДН на заданном угле находится в интервале  $-10 \dots -15$  дБ. В результате для угла отклонения от оси  $28^\circ$  были найдены оптимальные значения параметров:  $a1 = 11$  мм,  $a = 15.25$  мм,  $b = 28$  мм,  $c = 60$  мм,  $\epsilon_1 = 1.4$ ,  $\epsilon_2 = 1.18$ . Для возбуждения двух ортогональных мод  $HE_{11}$  в металлодиэлектрическом рупоре использован известный возбудитель полого круглого волновода, модифицированный в диссертации. В отличие от прототипа, центральные

проводники коаксиальных входов модифицированного возбуждателя не имеют скачков поперечного сечения, наличие которых усложняет технологию изготовления. Кроме того, между ребрами, расположенными внутри волновода, установлен нерегулярный диэлектрический конус, а к короткозамкателью примыкают две металлические ленты. С использованием МКЭ и МКРВО исследованы частотные зависимости коэффициента отражения  $S_{11}$  от входа рупора и возбуждателя, а также коэффициентов возбуждения на основной ( $S_{13}$ ) и ортогональной поляризации ( $S_{14}$ ). В процессе моделирования проведена оптимизация по всем параметрам возбуждателя.

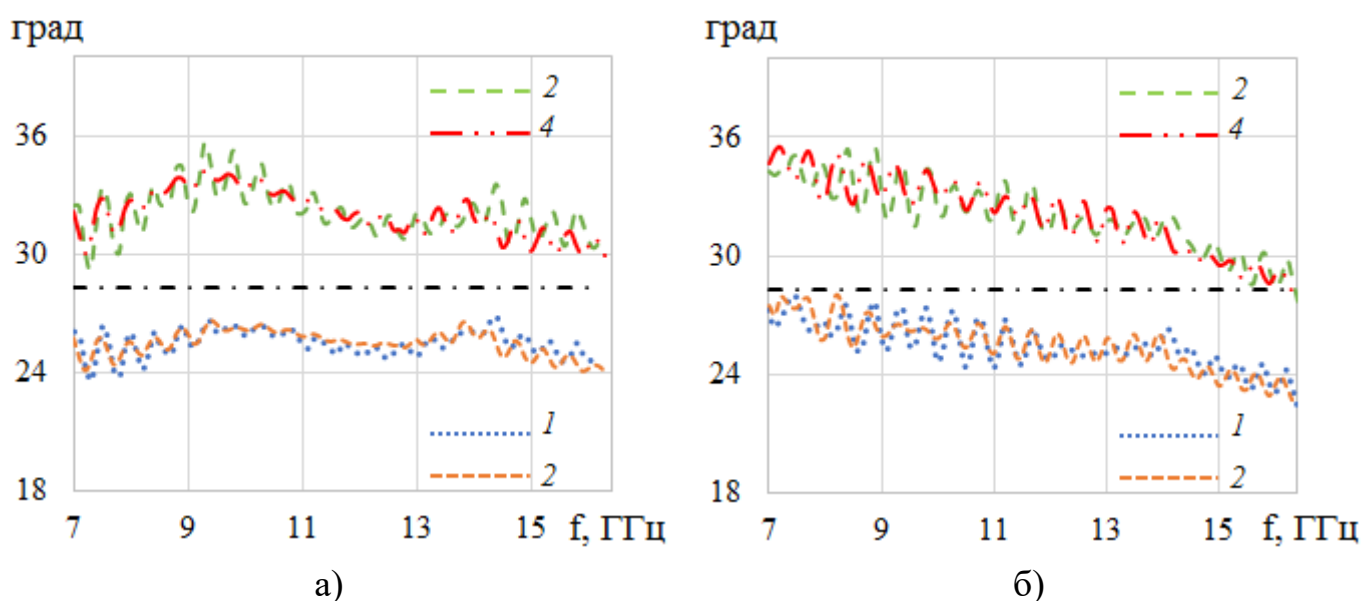


Рис. 14. Частотные зависимости полуширины главного лепестка ДН облучателя в Е (а) и Н плоскостях (б) по уровню  $-10$  (1, 3) и  $-15$  дБ (2, 4), рассчитанные с использованием МКЭ (1, 2) и МКРВО (3, 4), штрих-пунктир - заданный угол ( $28^\circ$ )

Моделирование показало, что рупорный металлодиэлектрический облучатель согласован с круглым заполненным диэлектриком волноводом по уровню отражения  $-15$  дБ в полосе частот  $7.3 \dots 19$  ГГц, а при подключении возбуждателя – в полосе частот  $7.5 \dots 19$  ГГц. Поляризационная развязка облучателя по выходу равна  $-20$  дБ, а по входу не превышает  $-35$  дБ. Ширина главного лепестка ДН в полосе частот  $7 \dots 16.3$  ГГц меняется в пределах  $-10 \dots -15$  дБ (рис.14), при этом неравномерность фазовой ДН в главном лепестке – менее  $7^\circ$ .

В разделе 3.2 разработан и исследован трехслойный четырехреберный металлодиэлектрический рупорный облучатель (рис. 13). С использованием МКЭ

и МКРВО исследованы частотные зависимости ширины главного лепестка ДН. В процессе моделирования проводилась оптимизация по всем параметрам облучателя длиной  $L = 250$  мм с целью максимизации полосы частот, в которой уровень главного лепестка ДН на заданном угле находится в интервале  $-10 \dots -15$  дБ. В результате для угла отклонения от оси  $25^\circ$  были найдены оптимальные значения параметров:  $r = 11$  мм,  $R = 64$  мм,  $a = 11.12$  мм,  $b = 33.88$  мм,  $c = 38.64$  мм,  $\varepsilon_1 = 1.4$ ,  $\varepsilon_2 = 1.15$ . Здесь  $a$  и  $b$  - радиусы апертуры первого и второго диэлектрического конуса с диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , соответственно,  $2c$  - расстояние между ребрами в апертуре рупора, а  $R$  - радиус апертуры металлического рупора. Пространство между диэлектрическим конусом и металлическим рупором, как и в предыдущем случае, заполнено воздухом.

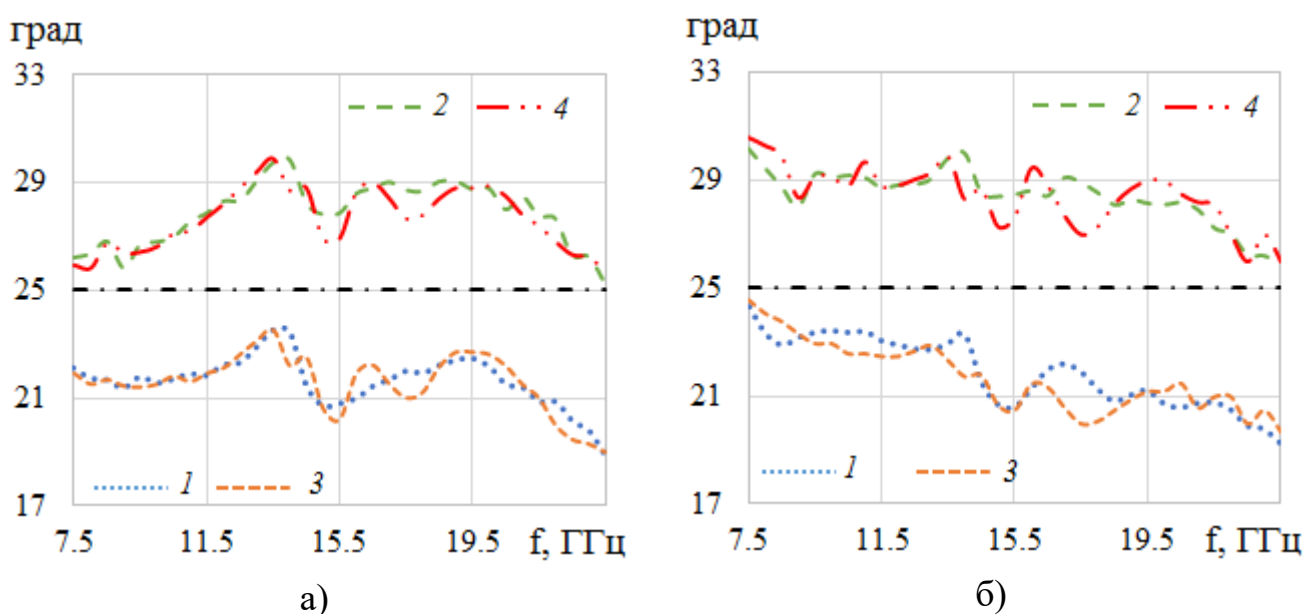


Рис. 15. Частотные зависимости полуширины главного лепестка ДН излучателя в Е (а) и Н плоскостях (б) по уровню  $-10$  (1, 3) и  $-15$  дБ (2, 4), рассчитанные с использованием МКЭ (1, 2) и МКРВО (3, 4), штрих-пунктир – заданный угол ( $25^\circ$ )

С использованием численного моделирования показано, что разработанный и исследованный рупорный облучатель с возбудителем согласован по уровню отражения ниже  $-15$  дБ в полосе частот  $7.5 \dots 19$  ГГц. Уровень спадающего главного лепестка ДН рупорного облучателя на углах  $\pm 25^\circ$  в полосе частот  $7.5 \dots 23.5$  ГГц (103%) меняется в пределах  $-10 \dots -15$  дБ. Аберрации фазовой ДН в пределах угла  $\pm 25^\circ$  относительно в полосе частот  $7.5 \dots 23.5$  ГГц менее  $10^\circ$  (рис.15).

**В Заключение** проведены основные результаты диссертации:

1) Разработаны и исследованы новые широкополосные возбуждители мод  $E_{01}$  и  $H_{01}$  с волноводным входом. По уровню отражения  $-20$  дБ полоса согласования возбуждителя моды  $E_{01}$  более 55%, а возбуждителя  $H_{01}$  – более 47%.

2) Разработаны и исследованы новые широкополосные возбуждители мод  $E_{01}$  и  $H_{01}$  с коаксиальным входом. По уровню отражения  $-20$  дБ полоса согласования возбуждителя моды  $E_{01}$  более 48%, а возбуждителя  $H_{01}$  – более 16%.

3) Исследованы частотные характеристики излучателя Пангониса и Пангониса – Власова. Показано, что диаграмма направленности излучателя Пангониса с модой  $H_{01}$  имеет высокий уровень первого бокового лепестка (около 5 дБ), а излучатель Пангониса – Власова обладает астигматизмом.

4) Исследованы частотные характеристики рупорного излучателя скалярных мод круглого волновода с двумя вариантами анизотропной пластины. Показано, что в полосе частот более 20% излучатель формирует игольчатую ДН, при этом излучатель моды  $E_{01}$  с разными вариантами пластины обеспечивает близкие коэффициенты усиления, а уровень кросс-поляризации у излучателя с пластиной из восьми однородных секторов ниже, чем с неоднородной пластиной, излучатель моды  $H_{01}$  с пластиной из восьми однородных секторов обеспечивает уровень усиления выше, а кросс-поляризации – ниже, чем рупор с неоднородной пластиной.

5) Разработаны и исследованы два варианта широкополосной антенной решетки с системой питания на основе круглого волновода с рабочей модой  $H_{01}$ . Показано, что полоса согласования решеток по уровню  $-15$  дБ более 33%, а КИП в указанной полосе – более 0.85.

6) Разработаны и исследованы два СШП излучателя в виде круглого трехслойного металлодиэлектрического и четырехреберного металлодиэлектрического рупора с рабочей модой  $HE_{11}$ . Показано, что металлодиэлектрический излучатель может быть использован в качестве облучателя в полосе частот 76%, а четырехреберный металлодиэлектрический излучатель – в полосе частот 103%.

7) Разработана конструкция, изготовлен и исследован экспериментальный образец круглого рупора с возбудителем моды  $E_{01}$  и полосой рабочих частот 28.5%, результаты измерения которого подтвердили результаты электродинамического моделирования.

Основные результаты опубликованы в указанных ниже работах.

#### Список публикаций

1. В.А. Калошин, Фам Ван Чунг. Возбудители скалярных мод круглого волновода // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.8>
2. Калошин В.А., Фам Ван Чунг. Сверхширокополосный возбудитель моды  $H_{01}$  круглого волновода // Радиотехника и электроника. 2021. Т 66. № 6. С. 565-570. DOI: 10.31857/S0033849421060140
3. В.А. Калошин, Фам Ван Чунг. Широкополосные антенные решетки на основе круглого волновода с модой  $H_{01}$  // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66. № 6. С. 594-601. DOI: 10.31857/S0033849421060152
4. В.А. Калошин, Фам Ван Чунг, Фролова Е.В. Излучатели скалярных мод круглого волновода // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.11>
5. В.А. Калошин, Фам Ван Чунг. Сверхширокополосный металлодиэлектрический рупорный облучатель // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66. № 7. С. 649-653. DOI: 10.31857/S0033849421070056
6. В. А. Kaloshin, Pham Van Chung. Ultra wideband four ridge metal-dielectric feed horn // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, March, 2021. Moscow. DOI:10.1109/IEEECONF51389.2021.9416035