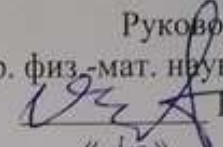


Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра радиофизики

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП
д-р. физ.-мат. наук, профессор
 В. П. Якубов
« 17 » 06 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛОСКОСЛОИСТЫХ
МАТЕРИАЛОВ

по основной образовательной программе подготовки магистров
направление подготовки 03.04.03 – Радиофизика

Барков Федор Андреевич

Руководитель ВКР
канд. физ.-мат. наук

 А. С. Мироньчев
« 12 » 06 2019 г.

Автор работы
студент группы № 731

 Ф. А. Барков

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра радиофизики (РФ)

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ООП
д-р физ.-мат. наук, профессор
В.П. Якубов
« 17 » 09 2017 г.

ЗАДАНИЕ
по подготовке ВКР магистра
студенту Баркову Федору Андреевичу № 731

1. Тема ВКР: Измерение электрофизических параметров плоскостойких материалов
2. Срок сдачи студентом выполненной ВКР:
 - а) на кафедре 17.06.2019,
 - б) в ГЭК 24.06.2019.
3. Краткое содержание работы:
Работа направлена на определение диэлектрической и магнитной проницаемостей плоских материалов, создание новой установки.
4. Календарный график выполнения ВКР:

- а) изучение литературы по теме ВКР
- б) освоение методики измерений
- в) проведение экспериментов
- г) обработка результатов и написание ВКР
- д) подготовка презентации работы

19.09.2017–10.12.2017
17.10.2018–10.12.2018
13.02.2019–15.04.2019
17.04.2019–27.05.2019
29.05.2019–12.06.2019

Руководитель ВКР –
канд. физ.-мат. наук




А. С. Мироньчев

Задание принял к исполнению

Ф. А. Барков

5. Дата выдачи задания « 17 » 09 2017 г.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация состоит из введения, четырёх глав, каждая из которых включает несколько разделов, заключения и списка использованной литературы общим объемом 68 страниц. Работа содержит 50 рисунков и 1 приложение о патентном поиске, включающее в себя 1 таблицу.

Целью магистерской диссертации является создание стенда по измерению электрофизических параметров плоскостойких материалов.

В работе предложена модель измерительного стенда для измерения электрофизических параметров плоскостойких материалов. Одним из компонентов стенда является параболическое зеркало. Оно выбрано с целью преобразования сферической волны в плоскую волну. В качестве излучателя выбрана сверхширокополосная комбинированная антенна с рабочей полосой частот от 3 до 13 ГГц. В качестве регистрирующего устройства выбран векторный рефлектометр.

Измерительный стенд был смоделирован в программе CST Microwave Studio, а на кафедре радиофизики был изготовлен макет.

Оглавление

Список используемых сокращений	5
Введение.....	6
1 Композиционные материалы и их назначение	10
1.1. История возникновения композитных материалов	10
1.2. Радиопоглощающие материалы.....	13
2 Известные способы измерения электрофизических параметров.....	17
2.1 Термометрический метод измерения коэффициента отражения композиционных полимерных материалов.....	17
2.2 ГОСТ 30381-95 (ГОСТ Р50011-92)	19
2.3 Стенд для измерения коэффициентов отражения и прохождения и электрофизических параметров материалов в свободном пространстве .	22
2.4 Измерение коэффициента отражения от радиопоглощающего материала	23
2.5 Измерение коэффициента отражения от радиопоглощающего материала	24
2.6 Эпсилометр	26
2.7 Безэховая камера для проведения измерений ДОР и ЭПР объектов ..	27
2.8 Стенд для измерения радиофизических параметров и свойств материалов и покрытий	29
3 Моделирование СШП измерительного комплекса	32
4 Экспериментальное исследование	37
4.1 Методика измерения.....	37
4.2 Экспериментальная установка	38
4.3 Расчет теоретического коэффициента отражения.....	44
4.4 Обработка данных и анализ полученных результатов	46
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	64

Список используемых сокращений

СШП – сверхширокополосный,

ДН – диаграмма направленности,

АФУ – антенно-фидерные устройства,

ПК – персональный компьютер,

СВЧ – сверхвысокочастотное излучение,

ШП – широкополосное поглощающее покрытие,

РПМ – радиопоглощающий материал,

ПЭВ – поглотитель электромагнитных волн.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянный рост применения устройств, которые используют высокочастотную радиоэлектронику, приводит к тому, что происходит повсеместное увеличение загрязнения электромагнитными полями. Этот факт требует принятия мер защиты для снижения воздействия электромагнитного излучения, в первую очередь, на человека.

Самым простым условием снижения влияния уровня э/м излучения является размещение оборудования и приборов на максимальное расстояние от биологических объектов, что сложно осуществимо на практике.

Эта задача может быть решена путем применения материалов, которые, взаимодействуя с электромагнитным излучением, могут отражать или поглощать его, обеспечивая безопасную интенсивность действия на окружающие объекты.

Другой, не менее важной, проблемой является обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств. Постоянное увеличения количества приборов, которые излучают электромагнитные волны, приводит к снижению ЭМС приборов, что в свою очередь приводит к сбоям в работе жизненно необходимых устройств.

Разработка новых радиоматериалов стала основной задачей военной и гражданской промышленности. Для построения таких материалов, лучше всего использовать слоистые композиты, образованные регулярной последовательностью слоев из изотропных упругих или вязкоупругих материалов. Компоненты их сохраняют свою индивидуальность, между ними существуют границы раздела. Один из компонентов, заполняющий связным образом пространство, называют матрицей или связующим. Другие компоненты, занимающие изолированные области, носят название включений (иногда армирующего материала или арматуры). Обычно размеры включений и расстояния между ними с одной стороны велики в сравнении с молекулярными, а с другой стороны малы по сравнению с характерными размерами задачи. Знание электрофизических параметров

таких материалов позволяет управлять характеристиками композитных моделей.

При изготовлении композитных материалов для конкретных задач необходимо знать электрофизические параметры отдельных слоев и в случае необходимости оперативно изменить состав компонентов материалов.

Предлагаемый СШП измерительный комплекс позволит в режиме реального времени узнавать такие параметры материала как диэлектрическая и магнитная проницаемости (ϵ , μ), показатель преломления (n), коэффициенты отражения и прохождения. Это позволит производить композиционный материал для любой сферы деятельности человека, избавляясь от перечисленных проблем.

Цель работы – разработка СШП измерительного комплекса для определения электрофизических параметров плоскостойких материалов.

Основные задачи

1. Исследование известных комплексов по измерению э/ф параметров плоскостойких материалов, выявление их недостатков и преимуществ;
2. Расчет параметров измерительного комплекса;
3. Создание измерительного комплекса;
4. Написание программного обеспечения;
5. Калибровка комплекса;
6. Верификация метода измерения;
7. Разработка инструкций по использованию комплекса.

Объект исследования – процессы взаимодействия ЭМВ с плоскостойкими материалами.

Предмет исследования – электрофизические параметры плоских материалов в СШП частот.

Методы исследования

Работа с математическими методами расчета электромагнитных полей в плоскостойких средах. Для описания взаимодействия плоских волн с

материалом применялись методы электродинамического анализа: преобразование Фурье, обратное преобразование Фурье. Расчет параметров измерительного комплекса проводился с использованием численного моделирования в среде CST Microwave Studio. СШП комплекс основан на использовании СШП антенн, рефлектометра CABAN R140 компании Planar. Обработка данных производилась с помощью написанного автором специального программного обеспечения.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) Сверхширокополосный измерительный комплекс на основе векторного рефлектометра CABAN R140, СШП антенны и фокусирующего параболического зеркала, обеспечивает коллимированный пучок с равномерной фазой в плоскости измерений в диапазоне 3 – 13 ГГц. Диаметр пучка на частоте 3,5 ГГц составляет 12 см, при этом неравномерность фазы составляет 5° при диаметре фокусирующего зеркала 66 см.

2) Бесконтактные измерения коэффициентов отражения от исследуемого образца с размещенным на нем металлом и без него с помощью плоского коллимированного пучка с погрешностью 1 ДБ при уровне сигнала -40 ДБ позволяют из системы уравнений для этих коэффициентов определить частотные характеристики комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей образца.

Достоверность НПВЗ обеспечивается тем, что корректность измерений выбранной методики проверяется сначала на стандартных диэлектрических структурах типа органическое стекло, шифер и текстолит. Наблюдается совпадение результатов с известными параметрами для этих тестовых сред с той точностью, с которой они известны и приводятся в справочной литературе, т.е. 0,05%. Важно, что по выбранной методике измерений найденные значения электрофизических параметров тестовых сред сохраняются во всем выбранном частотном диапазоне от 3 ГГц до 13 ГГц.

Научная новизна работы заключается в том, что методика позволяет одновременно определять электрофизические параметры (μ , ϵ , n), что невозможно на известных установках.

Практическая значимость

Разработанный СШП комплекс демонстрирует перспективу использования на предприятиях и лабораториях, разрабатывающих СШП материалы. Представленный измерительный комплекс превосходит своей компактностью (у реализованной установки размер практически в 3 раза меньше аналогов), использование СШП антенны (рабочая полоса частот 3-13 ГГц, по сравнению с используемыми в других установках коническими рупорами). Для проведения измерений не требуется безэховая камера. Предложен метод измерения и обработки полученных данных, который позволяет определить электрофизические параметры, такие как μ , ϵ , n в реальном времени.

1 Композиционные материалы и их назначение

1.1. История возникновения композитных материалов

В настоящее время высокими темпами идет разработка высокопрочных, легких и достаточно недорогих материалов для различных отраслей промышленности. В связи с этим многие используемые материалы достигли предела своих эксплуатационных свойств. Это стало причиной того, что ученые вынуждены создавать принципиально новые материалы, такие как композиты.

На самом деле, композиты – не такие и новые материалы, чтобы их создавать «с нуля». Композитами называют материалы, которые состоят из двух и более компонентов, а такие материалы известны еще с древних времен. Под эту классификацию можно отнести бетон, кости, раковины моллюсков, так как в их основе лежит несколько материалов с разными свойствами.

Древесина служит примером естественных волокнистых композитов. Продольные полые ячейки древесины состоят из спиральных волокон целлюлозы. Эти волокна соединяются лигнином. В средние века древесина, как композит, использовалась в оружейном ремесле для изготовления лука.

Для того чтобы материал можно было рассматривать как композитный, необходимо выполнение нескольких условий. Во-первых, доля всех компонентов должна быть не более 5%. Во-вторых, свойства компонентов должны быть различны. В-третьих, искусственные композиты производятся путем смешения неоднородных компонентов.

В последние пятьдесят лет растут темпы производства искусственных композитов на основе высокопрочных волокон и различных полимерных матриц.

Причиной развития композитных материалов стала разработка в начале 1960-х годов углеродистых волокон и борных волокон в США. Высокий модуль упругости таких волокон привел к росту жесткости композитов, что

позволило увеличить область применения этих компонентов – от авиационной и космической промышленности до производства бытового инвентаря и спортивных предметов.

Разработка высокопрочных волокон карбида кремния (SiC) и окиси алюминия (Al_2O_3), которые могут сохранять свои свойства при высоких температурах, привело к развитию композитов при применении металлических матриц и керамики [1].

В 1944 году во время войны Германия пыталась создать самолет-невидимку. В то время необходимо было использовать такой композитный материал, где между слоями фанеры находился бы наполнитель из легкой бальзы – это дерево, которое растет в Южной Америке. Но использовать этот материал в тот период не удалось, поэтому немцы применяли эрзац-композит «формхольц»: между слоями 1,5-миллиметровой фанеры была смесь пропитанных смолой древесных опилок и пористого угля.

Во второй половине XX века композиты стали лучше и сложнее. Компания под управлением Стефани Кволек, разработала арамидные волокна, известные нам как кевлар. Кевлар в пять раз прочнее стали. Создавали его материал для армирования автомобильных шин, он и сейчас применяется в этих целях. Также им армируют медные и волоконно-оптические кабели.

Например, межконтинентальная баллистическая ракета «Тополь-М» на 90% состоит из композитов, включая конструкции двигателей и головную часть.

Одним из наиболее перспективных и востребованных классов материалов для современной промышленности являются полимерные композиционные материалы (ПКМ). Типичными представителями ПКМ являются углепластики – армированные углеродными волокнами полимеры. Такие полимерные материалы должны обладать биосовместимостью, прогнозируемой резорбцией, отсутствием токсичности как самих материалов, так и продуктов их разложения.

Дальнейшее развитие разрабатываемых технологий может служить основой при получении трехмерных тканеинженерных конструкций для использования их в качестве имплантатов органов или их частей, как для животных, так и для человека. Композиционные материалы прочно вошли в нашу жизнь, подчас абсолютно незаметно для нас [2].

1.2. Радиопоглощающие материалы

Рост числа СВЧ – радиоэлектроники и постоянное увеличение мощности устройств, приводит к тому, что появляются помехи, влияющие на радиоэлектронную аппаратуру и спутниковую связь. Воздействие электромагнитных полей различной природы на технические средства, живые организмы оказывает существенное влияние на их функционирование. Данная тенденция делает необходимым разработку новых широкополосных радиопоглощающих материалов, на основе композиционных материалов, которые должны не только уменьшить производимые помехи или подавить их, но и также выполнить условия электромагнитной совместимости устройств.

При создании радиопоглощающих материалов используют такие материалы, которые обладают способностью поглощать электромагнитные волны в широком диапазоне частот. Важными свойствами материалов, которые входят в радиопоглощающие комплексы, являются удельная электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемости.

Процесс поглощения э/м энергии происходит за счет диэлектрических и магнитных потерь, которые пытаются сделать максимальными, чтобы обеспечить максимум эффективности экранирования. Но одновременно с этим при падении э/м волн существует отражение от границы раздела сред. И чем больше не соответствие между средами, тем выше величина коэффициента отражения. При разработке широкополосных радиопоглощающих покрытий основной проблемой является согласование поглощающей структуры с окружающим пространством.

В то же время при падении электромагнитных волн на материал имеет место отражение от границы раздела сред. Чем больше не соответствие волновых сопротивлений сред, тем больше величина коэффициента отражения. При создании широкополосных поглощающих (ШП) покрытий ключевой задачей является согласование поглощающей структуры с

окружающим пространством, при котором интегральный эффект отражения минимален. Существует несколько способов уменьшения отражения монохроматических электромагнитных волн от проводящих (отражающих) поверхностей.

Простым и эффективным способом уменьшения отражения является резонансный тип радиопоглощающих материалов (РПМ), который основан на основе экрана Солсбери. Слой поглощающего или проводящего материала расположен на расстоянии четверти волны перед проводящей поверхностью. Падающая энергия излучения отражается от поверхностей РПМ с образованием интерференционной картины нейтрализации исходной волны. Таким образом, происходит подавление падающего излучения.

Другим поглотителем электромагнитных волн (ПЭВ) является поглотитель, который состоит из слоя РПМ, перед которым находится согласованный четвертьволновый слой из непоглощающего материала. Недостатком данной конструкции поглотителя является то, что она работает только при фиксированной частоте и в случае нормального падения волны на проводящую поверхность.

По принципу действия ПЭВ можно разделить:

1. Интерференционные – в них используются принцип взаимного гашения э/м волн путем наложения в противофазе отраженной и падающей волны,
2. Рассеивающие – уменьшение отраженной волны в одном направлении происходит за счет рассеивания волны в других направлениях,
3. Поглощающие – преобразование э/м волны в другие виды энергии,
4. Комбинированные – использование вышеперечисленных типов в одном типе поглотителя.

Также радиопоглощающие материалы можно разделить на металлические, неметаллические, пирамидальные, резонансные, нерезонансные магнитные и объемные.

При создании безэховых камер обычно применяются пирамидальные поглощающие материалы. Внутреннюю поверхность безэховой камеры покрывают радиопоглощающими материалами на основе углерода, что обеспечивает стабильность радиотехнических и эксплуатационных характеристик поглотителя. А внешний слой покрывают защитной оболочкой. Защитную оболочку могут покрывать влагозащитным и огнезащитным покрытием. Пирамидальная форма отлично подходит для рассеяния и поглощения электромагнитного излучения.

Если рассматривать процесс отражения электромагнитной энергии, то наиболее эффективными являются металлические экраны. Но, с другой стороны, использование их «отражающей способности» создает проблемы работающим радиоэлектронным приборам, а также неблагоприятную обстановку для людей, находящихся в помещении. Для решения этих проблем при изготовлении экранов электромагнитного излучения применяют неметаллические компоненты и композиционные материалы, которые компенсируют различного рода механические потери, диэлектрические и магнитные потери, дисперсию, дифракцию и т.п.

Резонансными радиопоглощающими материалами обеспечивается неполная нейтрализация отраженного излучения, часть из которого прошла по толщине материала. Полный эффект от такого поглотителя достигается при толщине поглотителя равной четверти волны излучения. Использование данного типа РПМ возможно только в узком диапазоне частот.

Нерезонансные магнитные радиопоглощающие материалы созданы на основе частиц феррита, которые распределены в эпоксидном покрытии. Данный поглощающий материал рассеивает энергию высокочастотного излучения по большой поверхности. Преимущество нерезонансных поглотителей в том, что их можно использовать в широком диапазоне частот.

Объемные радиопоглощающие материалы используются толстыми слоями, поглощающие большую часть электромагнитной энергии до подхода и возможного отражения от металлической пластины, которая находится на

дне объемного РПМ. Принцип действия основан на использовании диэлектрических и магнитных потерь. Магнитные потери достигаются после введения в материал соединений феррита.

2 Известные способы измерения электрофизических параметров

Для того чтобы начать разработку нового измерительного комплекса, необходимо ознакомиться с уже известными методами измерения электрофизических параметров.

После изучения литературы были выбраны наиболее адаптированные установки для измерения э/ф параметров материалов, используемые на предприятиях и в лабораториях. Рассмотрены разные методы определения э/ф параметров, чтобы выявить общие недостатки и учесть их при разработке собственного СШП комплекса.

2.1 Термометрический метод измерения коэффициента отражения композиционных полимерных материалов

Контроль качества термореактивных композитных материалов на входе и выходе производства проводят с целью нахождения внутренних дефектов. Для этого можно использовать ультразвуковой, тепловой и другие способы неразрушающего контроля. Главным условием поиска дефекта является точное определение местоположения дефекта. Увеличить точность можно при комбинировании радиоволновой диагностики и термометрического метода, который заключается в измерении коэффициента отражения на небольших участках термореактивных материалов в СВЧ диапазоне при контроле количества теплоты.

При фиксированной мощности излучения коэффициент отражения может быть определен по значению поглощенной мощности. Таким образом, поглощенная мощность выделяется в материале в виде тепла и может быть измерена по изменению температуры ΔT . Искомую величину можно найти из соотношения:
$$\Delta T = \frac{P_2 t_H}{Q_w S d \rho q_c}.$$

Для комбинирования двух методов контроля установка может иметь следующий вид (рис 2.1). Схема включает генератор нужного диапазона частот, который обеспечивает требуемую мощность, облучатель, датчик температуры.

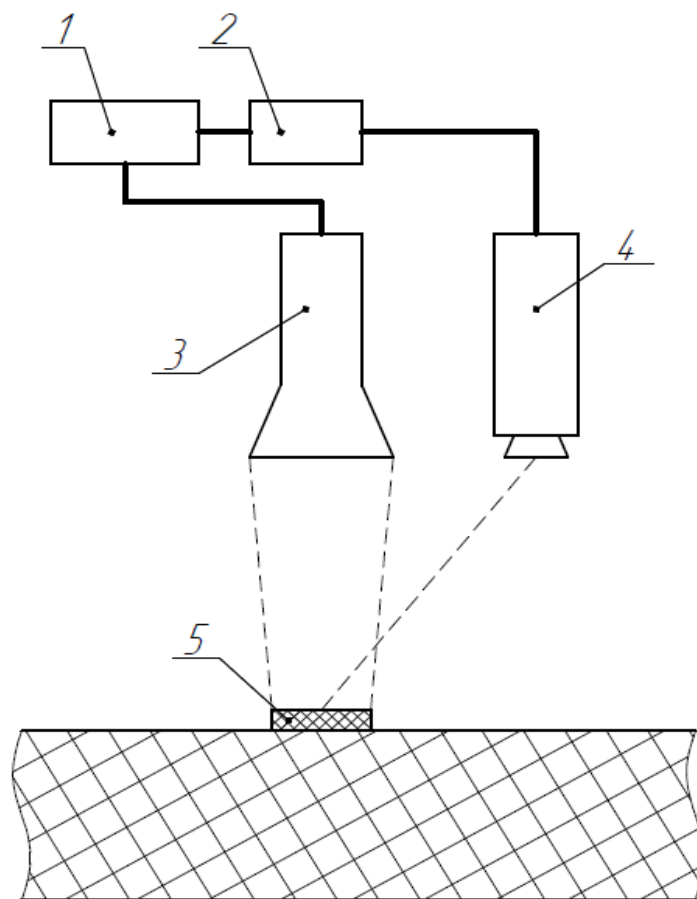


Рисунок 2.1. Вариант схемы измерений качества изделий из ТПКМ: 1 – генератор; 2 – пк, 3 – излучатель; 4 – измеритель температуры; 5 – область фокусировки

Измерение проходит следующим образом. Облучатель устанавливается так, чтобы облучать нужный участок поверхности. Датчик температуры формирует тепловое изображение участка поверхности. В качестве датчика температуры можно использовать тепловизор или бесконтактный пирометрический датчик.

Данный вариант измерения композиционных материалов неудобен тем, что используется два типа диагностики материала, которые постоянно нужно контролировать. Из-за использования термометрического метода может снижаться точность измерения при колебании температуры окружающей

среды. Поле фокусировки необходимо настраивать при каждом новом измерении, что значительно усложняет измерения.

2.2 ГОСТ 30381-95 (ГОСТ Р50011-92)

Этот документ создан для того, чтобы образцы радиопоглощающего материала проходили сертификационные испытания для подтверждения их сходств к требованиям ГОСТ на частотах от 0,03 ГГц до 37,5 ГГц.

Для начала рассмотрим установку для измерения коэффициента отражения РПМ в диапазоне от 0,03 до 0,4 ГГц (рис. 2.2). Установка состоит из генератора 1 колебаний с полосой частот 0,03-0,4 ГГц, направленный ответвитель 2, двухпроводная линия длиной не менее 10000мм и шириной не менее 1200мм (3), калибратора (4). Исследуемого образца 5, механизм, при помощи которого перемещается калибратор и испытуемый образец 6, 7 – трансформатор импедансов, 8 – анализатор спектра с полосой частот 0,03-0,4 ГГц,

Проведение эксперимента: регулируя генератор, устанавливают максимальный уровень излучаемого сигнала. Затем, настраивая приемник, выставляют максимальный уровень принимаемого сигнала. Устанавливают калибратор и испытуемый образец ПЭВ в возвратно-поступательное движение вдоль ленточной двухпроводной линии. Фиксируют размах колебания величины суммарного отраженного сигнала. Изменяя расстояние A между образцом ПЭВ и калибратором добиваются величины суммарного отраженного сигнала в минимуме.

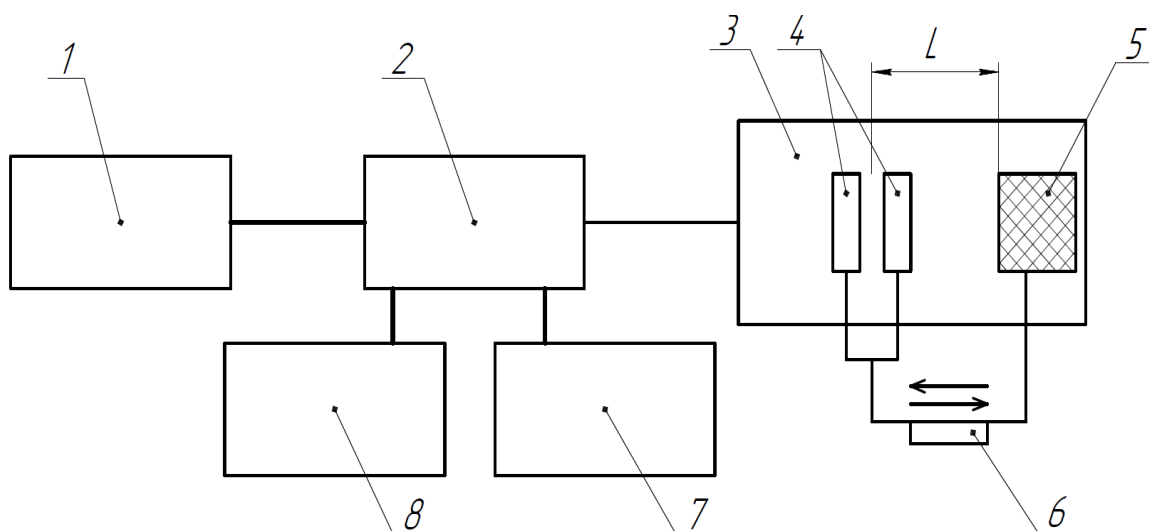


Рисунок 2.2. Блок схема стенда для измерения коэффициента отражения в диапазоне частот 0,03-0,4 ГГц. 1 – генератор; 2 – ответвитель направленный; 3 – ленточная линия; 4 – калибратор; 5 – образец ПЭВ; 6 – механизм изменения расстояния; 7 – трансформатор импедансов; 8 – приемник

При работе в полосе частот от 400 МГц до 37.5 ГГц используется следующий измерительный стенд (рис 2.3). Генератор 1 монохроматических колебаний с сеткой частот колебаний от 400 МГц до 37.5 ГГц с шагом 100 МГц, 1 ГГц, 3 ГГц, 6 ГГц, 10 ГГц, 37. ГГц. Детекторная головка должна иметь квадратичную характеристику и быть калиброванной на частотах из указанной сетки частот. Под образец РПМ 6 подкладывается лист металла 7. Антенна или образец РПМ имеют возможность перемещения для изменения расстояния между ними. Пространство за образцом РПМ должно быть закрыто поглотителем 8. Рупорная антенна 3 должна иметь зонд, встроенный в одну из стенок рупора. Зонд представляет собой металлический штырь длиной $\frac{\lambda}{4}$ длины волны на рабочей частот.

Методика измерений заключается в измерении коэффициента отражения измеряемого материала в поиске минимального $U_{\min}$ и максимального $U_{\max}$ значения напряжения на выходе зонда. Сначала образец РПМ прижат к раскрытию рупора и при увеличении расстояния от рупора до образца РПМ проводится измерение.

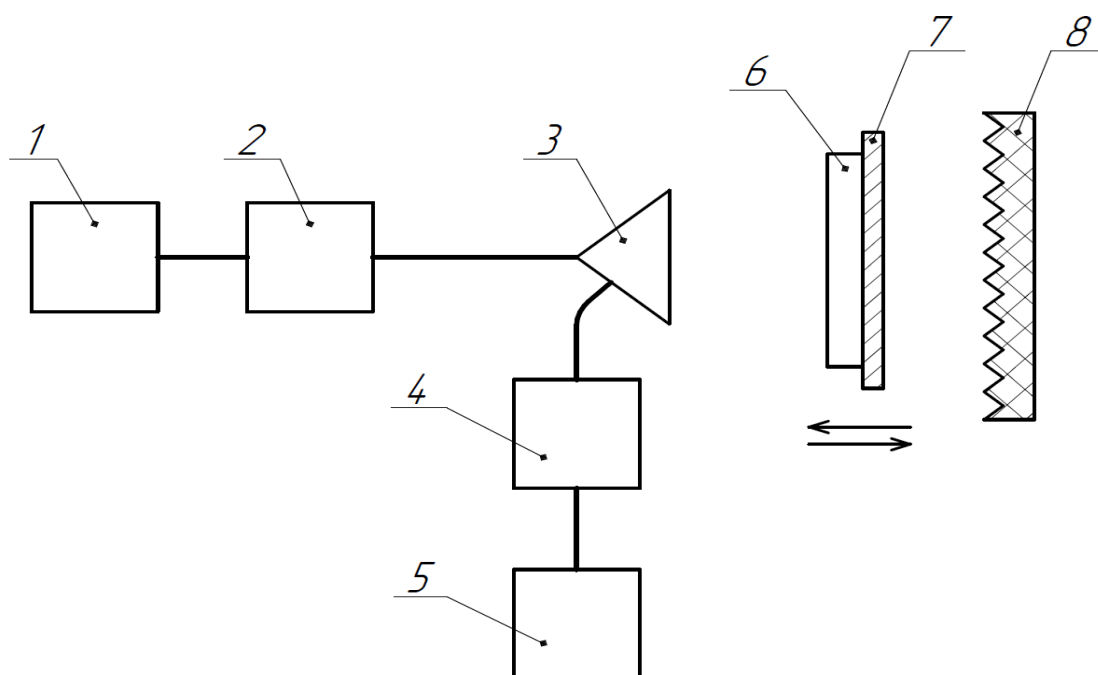


Рисунок 2.3. Блок схема стенда для измерения коэффициента отражения РПМ в диапазоне от 400 МГц до 37.5 ГГц: 1 – генератор; 2 – аттенюатор; 3 – рупорная антенна; 4 – детекторная головка; 5 – усилитель селективный; 6 – исследуемый образец РПМ; 7 – металлический лист; 8 – поглотитель ЭМВ

Для потокового контроля образцов РПМ в условиях производства указанные в ГОСТ 30381-95 (ГОСТ Р 50011-92) методики трудно применимы вследствие необходимости калибровки детекторной секции при каждом изменении частоты и сложности прецизионных перемещений образца РПМ относительно антенны для поиска $U_{\min}$ и $U_{\max}$.

В установке на рис. 2.2 используется анализатор спектра, у которого ограниченная чувствительность, а также восприимчивость к перегрузкам. Также препятствиями являются, во-первых, необходимость использования неких специализированных антенн со встроенным зондом, либо модификации готовых измерительных антенн с неконтролируемым изменением их параметров. Во-вторых, узкий частотный диапазон – для исследования в широкой полосе частот требуется создание множества однотипных установок на различные диапазоны частот, что приводит к необходимости стыковки данных, зарегистрированных на разных установках. В-третьих, образец РПМ должен находиться в ближней зоне излучателя(2).

2.3 Стенд для измерения коэффициентов отражения и прохождения и электрофизических параметров материалов в свободном пространстве

Измерительный комплекс предназначен для измерения комплексных проницаемостей листовых материалов в низкочастотной области СВЧ-диапазона. Зона А предназначена для проведения исследования в частотной области 1-24 ГГц, а зона В, в области 22-40 ГГц.

Рассматриваемый стенд может проводить измерения частотных зависимостей коэффициентов прохождения при разных углах падения (от 0 до 75 градусов). Угол наклона изменяется автоматически, при этом производится фиксация коэффициента прохождения исследуемого образца от угла на разных частотах. Также фиксация проводится частотных зависимостей коэффициента прохождения при различных углах наклона.

Можно отметить, что в данной установке измеряется температурная зависимость коэффициентов отражения образцов в температурном диапазоне от -70 °С до + 200 °С в интервале частот от 2-24 ГГц (3).

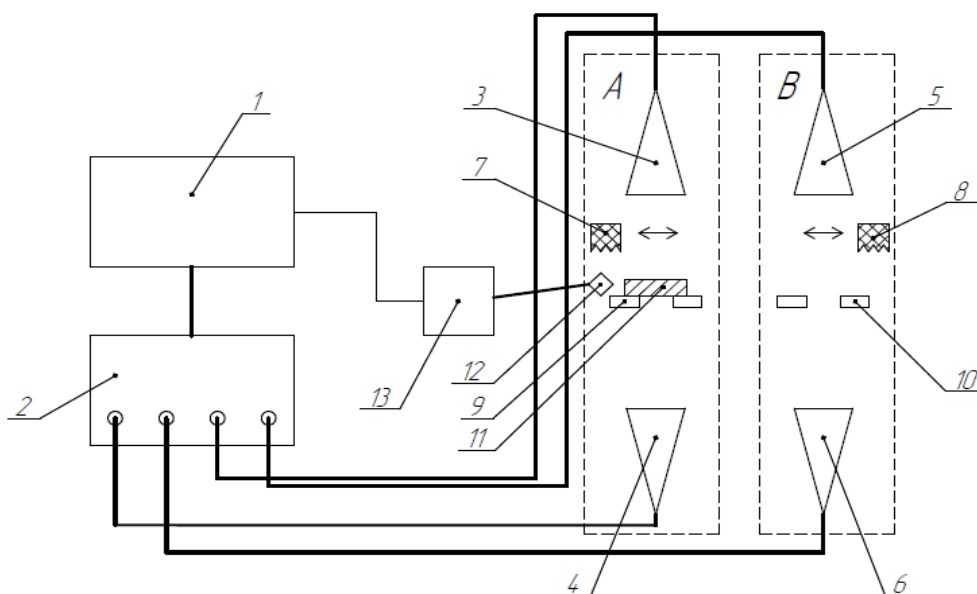


Рисунок 2.4. Блок схема измерительной установки: 1 – ПК, 2 – векторный анализатор цепей, 3 – 6 – рупорная антенна, 7 – 8 – РП блок, 9 – 10 – подставка под образец, 12 – датчик угла и температура, 13 – АЦП

К недостаткам этого измерительного комплекса стоит отнести использование рупорных антенн, наличие безэховой камеры. Измеряемый образец находится на подложке, которая позволяет облучать лишь узкий участок в материале.

2.4 Измерение коэффициента отражения от радиопоглощающего материала

Для данного эксперимента была оборудована полубезэховая камера, представляющая каркас с размерами $1.1 \times 1.1 \times 2$ м. Установка обклеена радиопоглощающим материалом со всех сторон (4).

Измерения экспериментальных объектов представляет собой измерение комплексного коэффициента отражения. После при помощи преобразования Фурье производится переход во временную область и фильтруется тот отрезок времени, которых соответствует моменту отражения э/м волны от экранированного пола. Далее устанавливается измеряемый объект, измеряется комплексный коэффициент отражения и фильтруется на временном участке тот же участок, что шагом ранее. Временной промежуток рассчитывается исходя из скорости распространения волны и пройденного расстояния волной. Нужный коэффициент отражения есть разность (дБ) характеристик, которые получены на рассчитанном интервале частот.

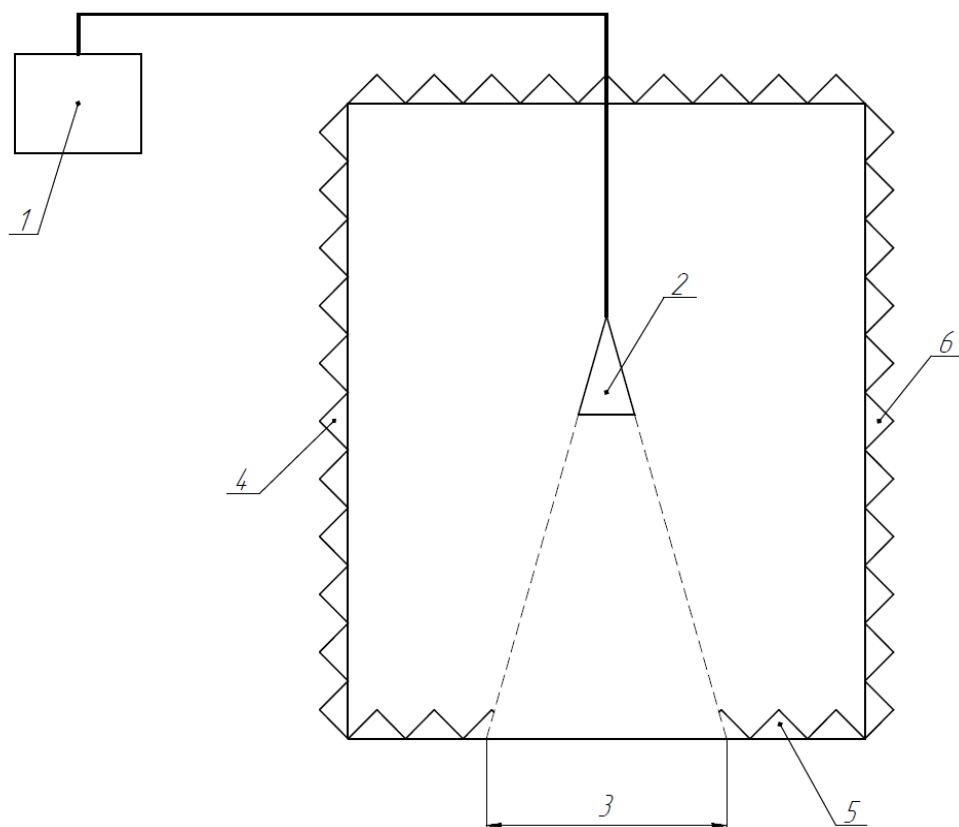


Рисунок 2.5. Блок схема измерительной установки: 1 – векторный анализатор цепей, 2 – рупорная антенна, 3 – область облучения, 4 – 6 – РПМ, 5 – измеряемый РПМ

В качестве измерительной антенны использовалась рупорная антенна с диапазоном работы 8 – 12 ГГц.

Использование безэховой камеры заметно усложняет установку, вносит ограничения на выбор облучаемой области и высоту расположения антенны, а также приходится измерять коэффициент отражения в ближней зоне антенны.

Недостатком является выбранная рупорная антенна с диапазоном работы всего 8 – 12 ГГц. Для измерения образцов на более широкополосной антенне необходимо переоборудовать всю установку, для того, чтобы дальняя зона и область облучения могли уложиться в габариты полубезэховой камеры.

2.5 Измерение коэффициента отражения от радиопоглощающего материала

Особенностью радиопоглощающих материалов является эффективность поглощения электромагнитного излучения. Одна из характеристик, которая определяет качество такого материала, является коэффициент отражения $K_{отр}$.

Коэффициент отражения РПМ определялся в свободном пространстве. Схема установки для измерения коэффициента отражения в свободном пространстве приведена на рис. 2.6.

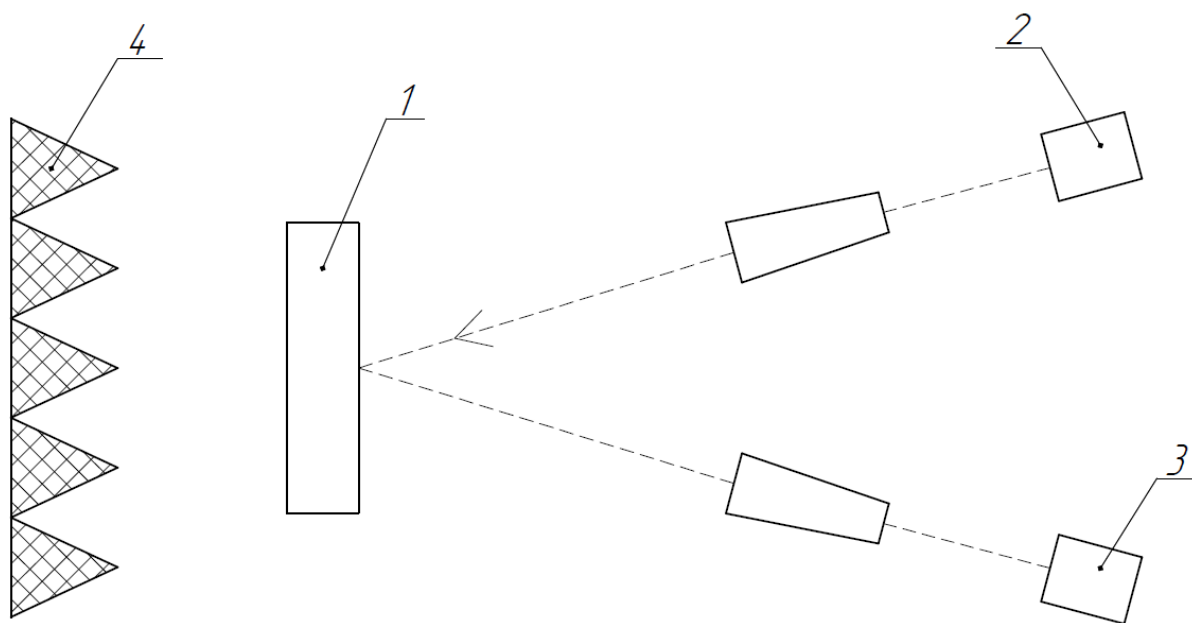


Рисунок 2.6. Блок схема измерительной установки: 1 – исследуемый объект, 2 – передающая антенна, 3 – приемная антенна, 4 – РПМ

Для передачи и приема сигнала использовались две одинаковые рупорные антенны пирамидального типа. Сигнал, сгенерированный передатчиком, поступает на вход передающей антенны, затем излученный сигнал попадает на поверхность испытуемого образца. Приемная антенна принимает отраженный сигнал и передает его на вход регистрирующего устройства.

Измерение проводилось в свободном пространстве при угловом падении э/м волны на исследуемый объект – радиопоглощающий материал. Измерения проводились при помощи рупорных антенн пирамидальной

формы (в диапазоне частот 8-12 ГГц), в качестве передающего и приемного устройства был использован анализатор цепей Agilent Field Fox типа N9917A (в диапазоне частот от 30 кГц до 18 ГГц).

Недостатками рассматриваемой установки является использование рупорных антенн и наличие безэховой камеры, что делает данный метод измерения коэффициента отражения громоздким и достаточно неточным.

2.6 Эпсилометр

Эпсилометр представляет собой устройство, которое измеряет материалы диэлектрической подложки для определения комплексной диэлектрической проницаемости от 3 МГц до 6 ГГц. Устройство представляет собой новый метод измерения, основанный на концепции конденсатора с параллельными пластинами, который определяет комплексную диэлектрическую проницаемость диэлектрических пластин толщиной до 3 мм.

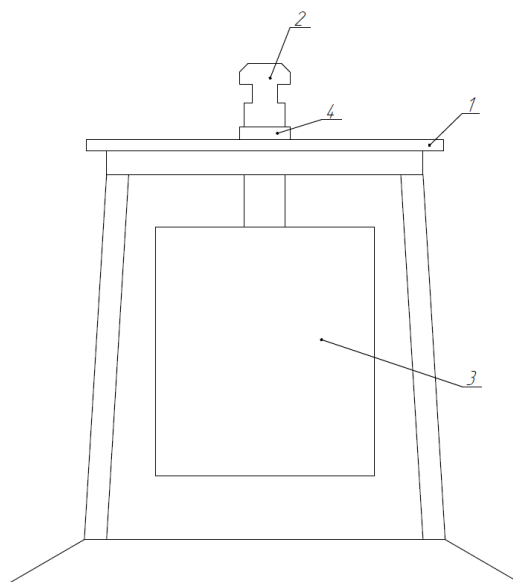


Рисунок 2.7. Блок-схема измерительной установки: 1 – исследуемый объект, 2 – винт, ограничивающий крутящий момент, 3 – интегрированный анализатор, 4 – верхний электрод

В отличие от обычных емкостных измерительных приборов, этот новый метод использует значительно упрощенную процедуру калибровки и способен проводить измерения на частотах от 3 МГц до 2 ГГц, а в некоторых случаях до 6 ГГц. Он решает ограничения паразитного импеданса в традиционных методах конденсаторов, явно моделируя прибор с помощью полноволнового вычислительного электромагнитного кода. В частности, код с конечной разностью во временной области (FDTD) использовался не только для проектирования прибора, но и для создания алгоритма инверсии на основе базы данных. Алгоритм инверсии преобразует измеренное отражение прибора (S_{11}) в диэлектрические свойства исследуемого образца.

Недостатком рассматриваемого метода является его дороговизна и ограниченность толщины измеряемого материала.

2.7 Безэховая камера для проведения измерений ДОР и ЭПР объектов

При проверке характеристик радиопоглощающих материалов (РПП РАН - 67) при различных углах падения электромагнитной волны проводились измерения диаграмм обратного рассеяния (ДОР) – однопозиционных диаграмм эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) исследуемого образца.

Эксперимент проводился в два этапа. Сначала измерялась металлическая пластина с размером 200×200 мм. Затем, проводилось измерение пластины того же размера, но с нанесением на одну из сторон РПП РАН – 67. Эксперимент проводился в безэховой камере в соответствии с аттестованной методикой измерения (рис 2.8).

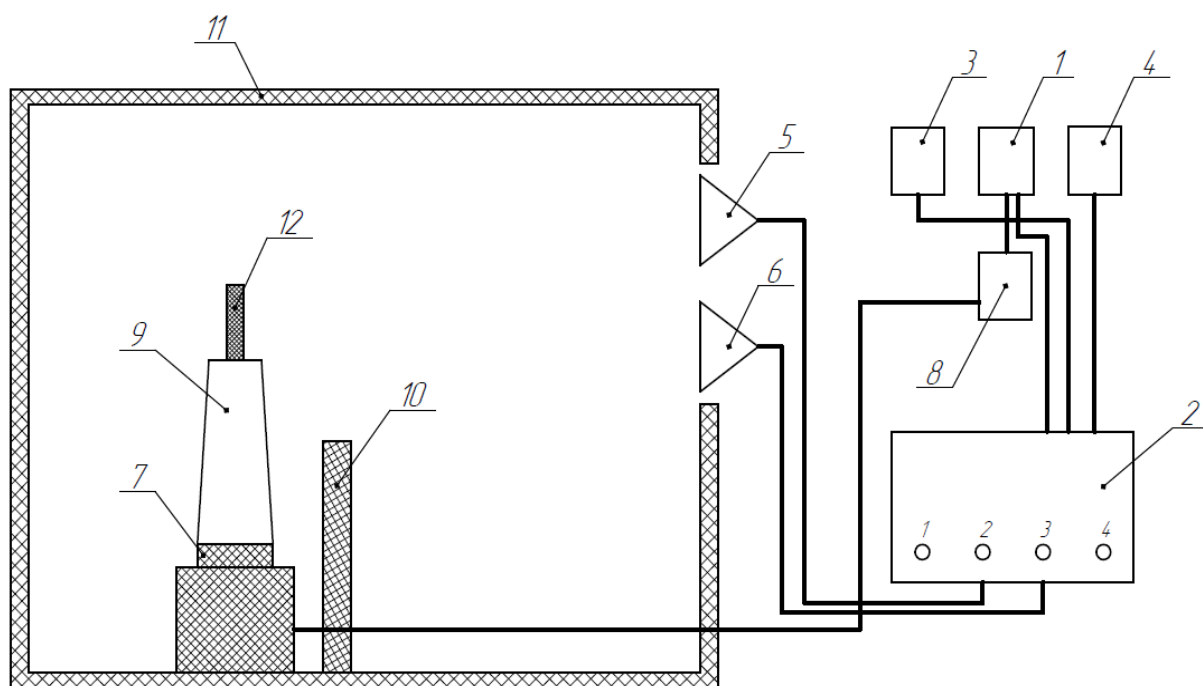


Рисунок 2.8. Схема безэховой камеры для проведения измерений ДОР и ЭПР объектов: 1 – ИБП, 2 – векторный анализатор цепей, 3 – рубидиевый стандарт частоты, 4 – ПК, 5, 6 – линзовые рупорные антенны, 7 – ОПУ, 8 – контроллер ОПУ, 9 – мало отражающая пенопластовая тумба, 10 – экран укрытия ОПУ радиопоглощающий, 11 – БЭК с РПМ типа РАН-68, 12 – объект измерений

При проведении экспериментальных исследований измеряемый образец располагался на радиопоглощающей пенопластовой подложке, которая была расположена на опорно-поворотном устройстве (ОПУ). Размеры подложки подбирались таким образом, чтобы измеряемый образец находился в центре рабочей зоны электромагнитного поля, которое создается приемной и передающей антеннами П6-23М.

Измерения ДОР измеряемого образца проводились в диапазоне частот от 2 до 18 ГГц для горизонтальной и вертикальной поляризаций электромагнитного поля. Чтобы уменьшить паразитное влияние окружающих шумов и помех и боковых БЭК с целью выделения полезного сигнала применялись методы цифровой обработки с фильтрацией по времени (Time Domain).

Отрицательной чертой в этой установке является перенасыщение рабочей зоны лишними объектами, которые будут создавать лишние шумы и переотражения. Так же использование рупорных антенн делает установку недостаточно точной, а применение безэховой камеры делает экспериментальную установку громоздкой.

2.8 Стенд для измерения радиофизических параметров и свойств материалов и покрытий

При разработке радиопоглощающих покрытий РПП РАН – 67 необходимо контролировать коэффициент отражения материала. В процессе испытания контроль осуществлялся на специальном стенде для измерения радиофизических свойств и параметров материалов и покрытий (рис. 2.9). Измерения проводились по аттестованной методике испытаний материалов в свободном пространстве в ближней зоне рупорной антенне.

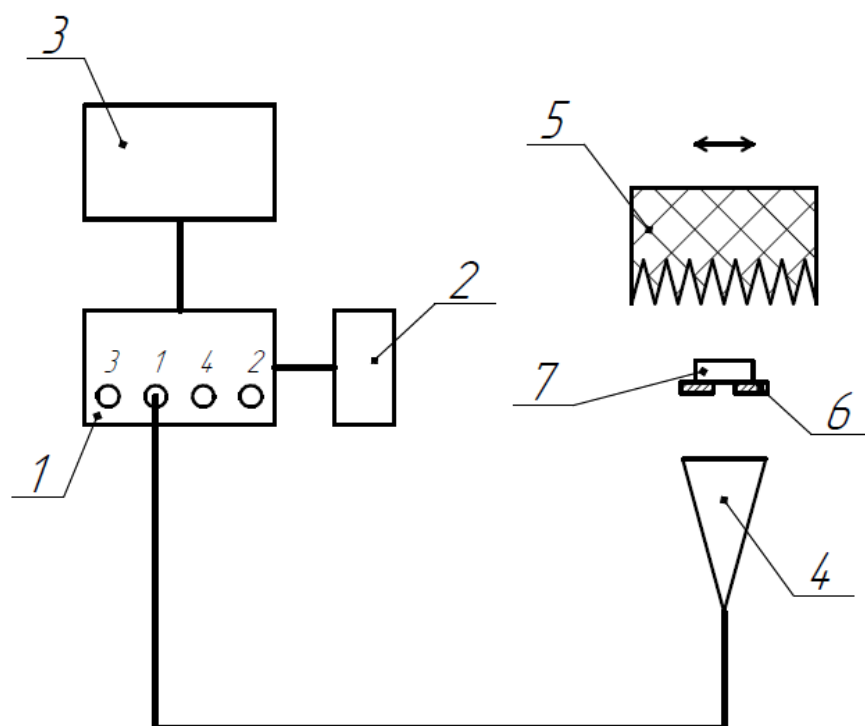


Рисунок 2.9. Схема стенда для измерения радиофизических параметров и свойств материалов и покрытий: 1 – векторный анализатор цепей, 2 – рубидиевый стандарт частоты, 3 – ПК, 4 – модифицированная рупорная антенна П6-23М, 5 – пирамидальный РП блок, 6 – металлическая радиопоглощающая диафрагма

Методика эксперимента основана на измерении коэффициента отражения S_{11} квазиплоской электромагнитной волны образцов материалов при помощи СШП диафрагмированной линзовой рупорной антенны и векторного анализатора электрических цепей.

При проведении эксперимента нужный образец помещался в окно круглой металлической РП диафрагмы, расположенной в ближней зоне рупорной антенны, для минимизации процессов дифракции на краях образца и кромках рупорной антенны. Во время измерения коэффициента отражения измеряемого образца в зоне за диафрагмой устанавливалась согласованная нагрузка – радиопоглощающий блок с низким коэффициентом отражения в рабочей полосе частот. Это сделано для того, чтобы исключить паразитные отражения и шумы от окружающих предметов.

Для устранения влияния переотражений между экспериментальным образцом и рупорной антенной использовалась временная селекция (TimeDomain) с подавлением эффекта Гиббса.

Данная методика измерений обеспечивает измерение низких значений коэффициента отражения материалов до уровня 50 дБ, погрешность при этом не более 1 дБ. Предельно высокие значения коэффициента отражения с погрешностью не более чем ± 0.1 дБ.

Минусом в данной установке является использование рупорной антенны и измерение коэффициента отражения в ближней зоне облучателя.

3 Моделирование СШП измерительного комплекса

Одним из компонентов сверхширокополосного комплекса является круглый эллиптический рефлектор – параболическая зеркальная антенна. Профиль зеркала представляет собой поверхность параболоида вращения, получаемая в результате вращения параболы. Для обеспечения коллимированного пучка в плоскости измерения необходимо сместить антенну из фокуса параболоида. Для нахождения оптимальных геометрических параметров установки необходимо было сделать 3d модель данной системы в программе CST Microwave Studio.

Поскольку линейные размеры зеркала значительно превышают λ , то при анализе параболической антенны можно воспользоваться методом геометрической оптики, таким образом можно наглядно показать, что сферическая волна, создаваемая облучателем, помещенным в фокус параболического зеркала, преобразуется зеркалом в плоскую волну, распространяющуюся вдоль его оси.

Чаще всего в параболических антеннах осуществляется преобразование широкой ДН излучающей антенны в узкую ДН. В любой точке плоскости раскрытия зеркала антенны электромагнитное поле симфазно, что определяется свойством параболы: сумма расстояний от фокуса до любой точки параболы и от этой точки до плоскости раскрытия всегда постоянна. Зеркальные антенны широко применяются во всех отраслях радиотехники из-за простоты конструкции, больших коэффициентов усиления, узкой ДН, широкой полосы пропускания, высокого КПД и др.

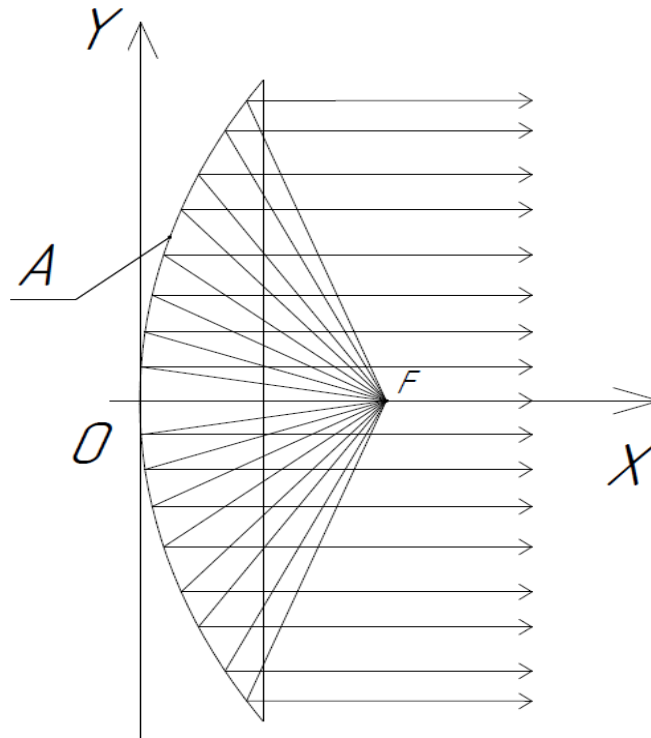


Рисунок 3.1. Плоский фронт волны

Для расчета профиля зеркала, обеспечивающего плоский фронт в раскрыве (рис 3.1), необходимо использовать закон равенства оптических длин путей между фронтами. Профиль зеркала представляет собой поверхность параболоида вращения, получаемая в результате вращения параболы.

Профиль зеркала определяется только фокусным расстоянием. Поэтому увеличение фокусного расстояния при постоянном диаметре зеркала уменьшает глубину зеркала. При уменьшении фокусного расстояния при тех же условиях делает зеркало более глубоким.

В прямоугольной системе координат уравнение параболического профиля имеет вид: $y^2 = 4 \cdot f \cdot x$, где $y = h$ – глубина зеркала, f – фокусное расстояние антенны, $x = \frac{D}{2}$ – половина размера раскрыва антенны. После подстановки $y = h$ и $x = \frac{D}{2}$ получаем $D^2 = 16 \cdot f \cdot h$ (1). Данная формула указывает, то геометрия зеркала полностью определяется заданием любой пары параметров. Решая уравнение (1) находим координаты точки параболы и составляем таблицу, по которой будет построено параболоид вращения.

Фокус f , мм	280	280	280	...
X, мм	2	3	4	...
$y^2 = 4 \cdot f \cdot x$, мм	47,3	57,9	66,9	...

После всех расчётов диаметр параболоида равен 670 мм, глубина 100 мм, угол раскрыва 73° , фокусное расстояние 280 мм.

После математического расчета координат параболы и определения размеров зеркала необходимо было построить 3d модель (рис. 3.2).

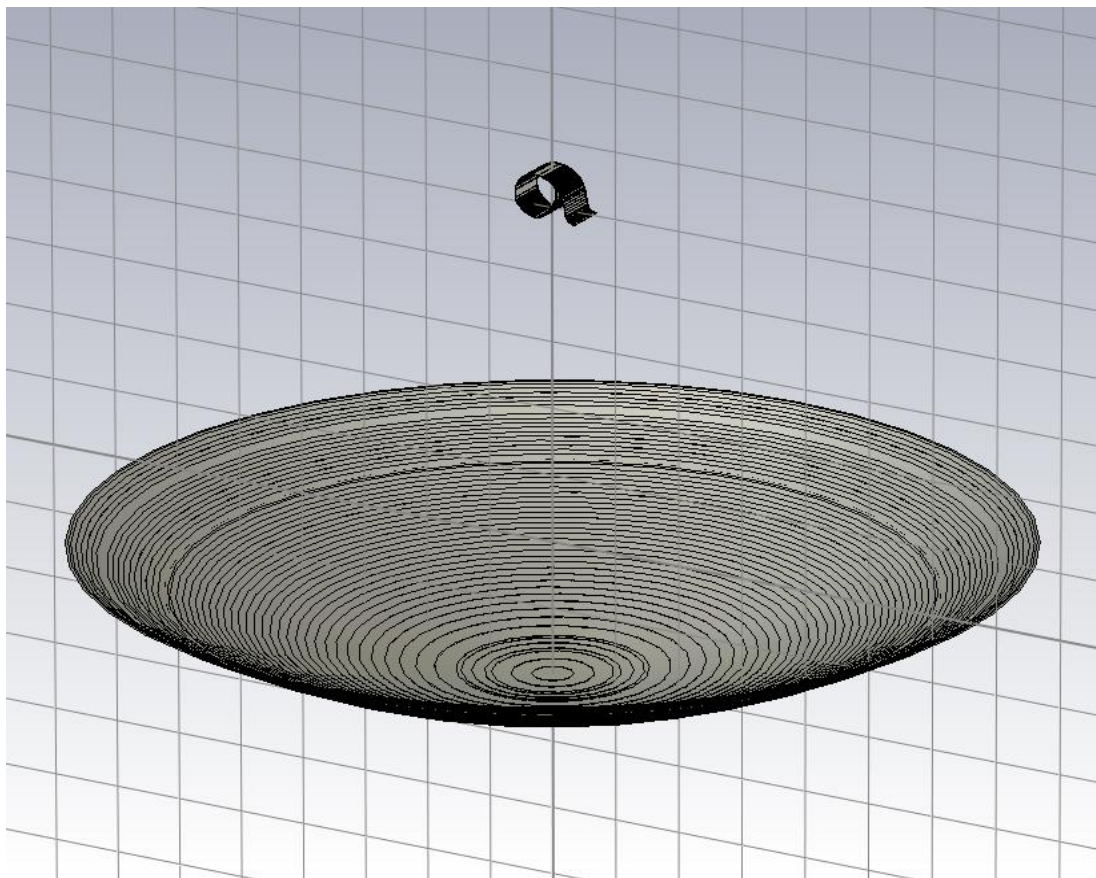


Рисунок 3.2. Модель устройства в CST Microwave Studio

На рисунке 3.3 видно, что фокус располагается на расстоянии 680 мм от параболической антенны.

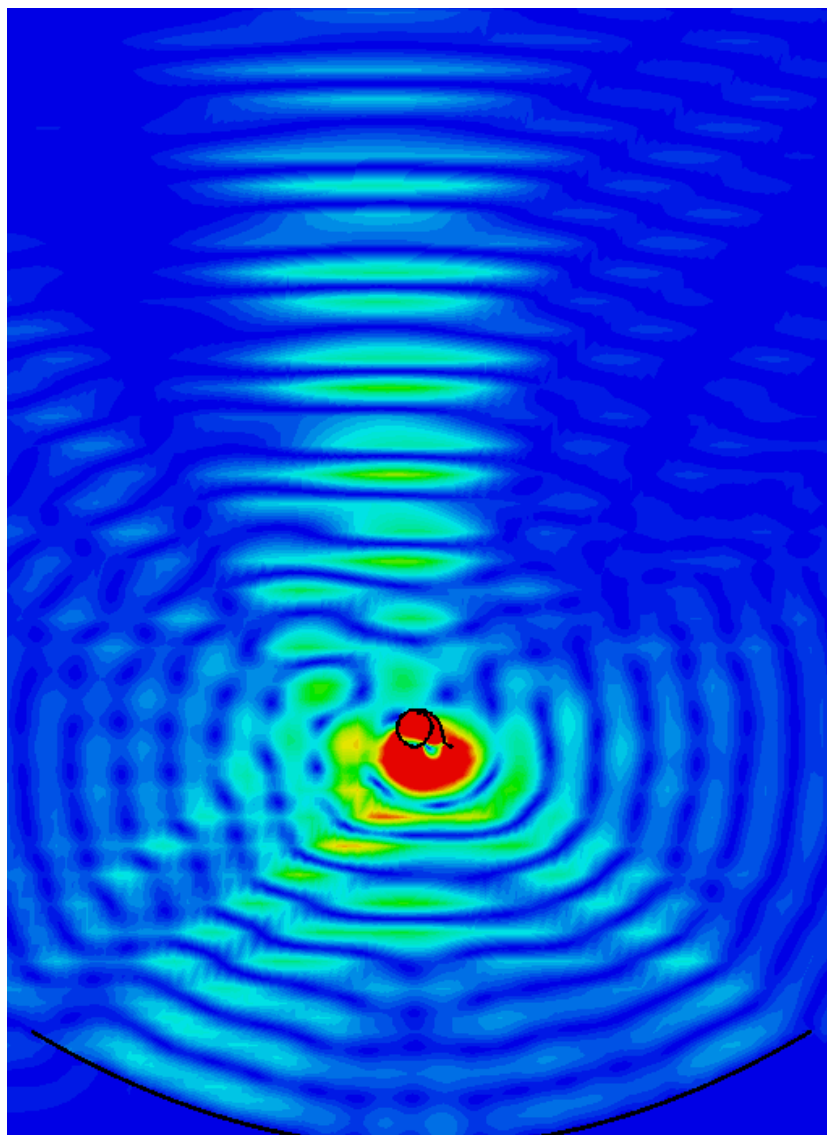


Рисунок 3.3. Распределение поля

Диаметр коллимированного пучка на частоте 3,5 ГГц равен 12 см.

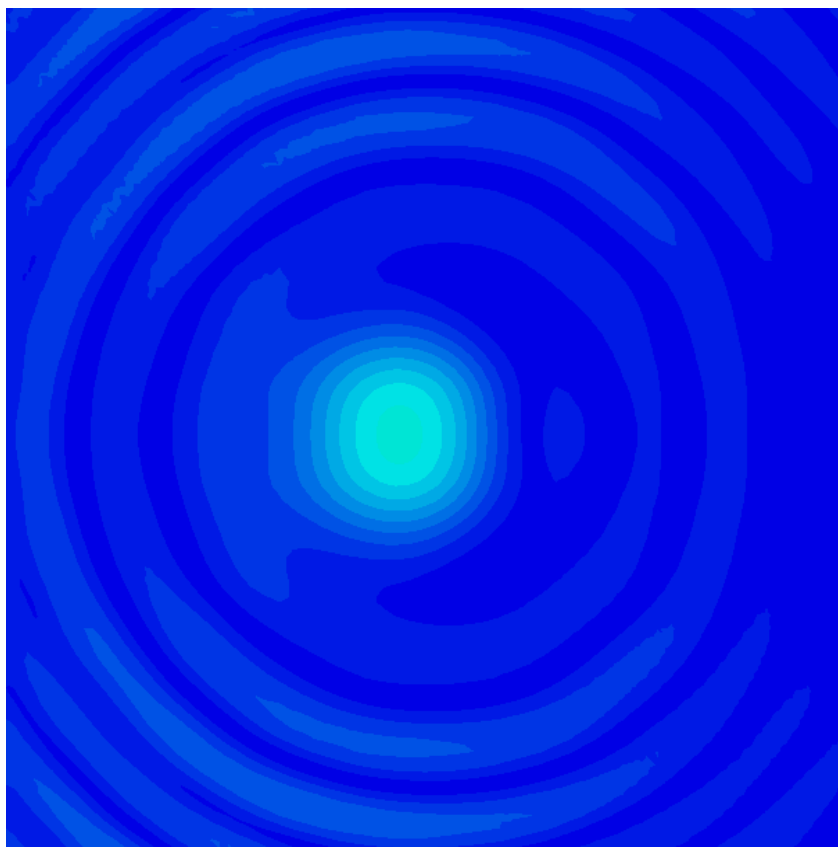


Рисунок 3.4. Диаметр фокусирующего пятна

После 3d моделирования и расчета распространения излучения на кафедре радиофизики был построен стенд для измерения электрофизических параметров плоскостойких материалов.

4 Экспериментальное исследование

4.1 Методика измерения

Для того чтобы объединить достоинства рассмотренных способов определения электрофизических параметров материалов, а также использовать рупорную антенну и применять временную фильтрацию предлагается следующий метод. В качестве регистрирующего устройства применяется векторный рефлектометр CABNR 140, который измеряет модуль и фазу отраженного сигнала в широкой полосе частот. К порту векторного рефлектометра подключена сверхширокополосная антенна облучателя, которая расположена в первом фокусе эллиптического рефлектора. Второй фокус эллиптического рефлектора расположен на верхней границе установки, выполненной из пенополистирола. Такой подход к измерению позволяет обеспечить необходимое условие измерения коэффициента отражения падение плоской волны на исследуемый объект с фронтов, параллельным плоскости образца. Плоскость измерения образца перпендикулярна фокусной оси эллиптического зеркала.

Этапы проведения измерений: сначала проводится измерение фонового сигнала, в отсутствии измеряемого образца на верхней границе установки, в районе второго фокуса. Далее на верхнюю границу установки располагается металлическая пластина, и измеряются следующие данные. После этого на измерительную поверхность кладется измеряемый образец, а поверх его располагается металлическая пластина.

По измеренным значениям амплитуды и фазы сигнала при помощи обратного преобразования Фурье рассчитывается временная функция, которая имеет вид коротких импульсов, каждый из которых соответствует отражению от характерных областей: от раскрыва антенны, от РПМ (или металлической пластины) и окружающих предметов. С использованием временной оконной фильтрации можно выбрать нужный сигнал и убрать ненужные сигналы. При расчете коэффициента отражения необходимы

сигналы, которые отражаются от исследуемого образца и металлической пластины. Затем, используя прямое преобразование Фурье, вычисляется спектральная плотность сигналов, отраженных от металла и образца исследуемого материала, на основе которых вычисляется искомая частотная зависимость R нужного образца.

4.2 Экспериментальная установка

После моделирования необходимо экспериментально подтвердить результаты теоретических выводов. Для эксперимента был изготовлен сверхширокополосный измерительный комплекс, который идентичен тому, что был рассчитан в программе CST Microwave Studio.

СШП измерительный комплекс представляет собой куб, высота которого 1 метр, из вспененного полистирола, на основе векторного рефлектметра CABANR140, состоящего из СШП антенны и фокусирующего параболического зеркала.

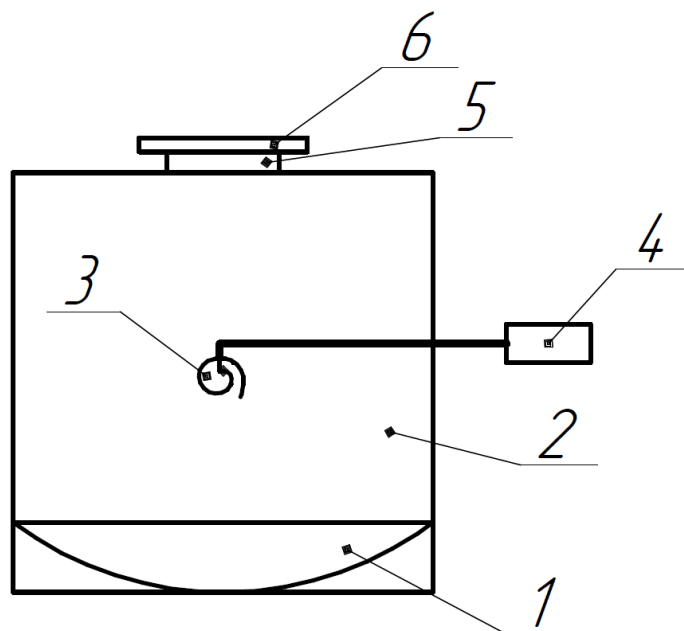


Рисунок 4.2. Функциональная схема установки: 1 – эллиптический рефлехтор; 2 – опора из полистирола; 3 – сверхширокополосный облучатель; 4 – векторный рефлектметр; 5 – измеряемый образец; 6 – лист металла

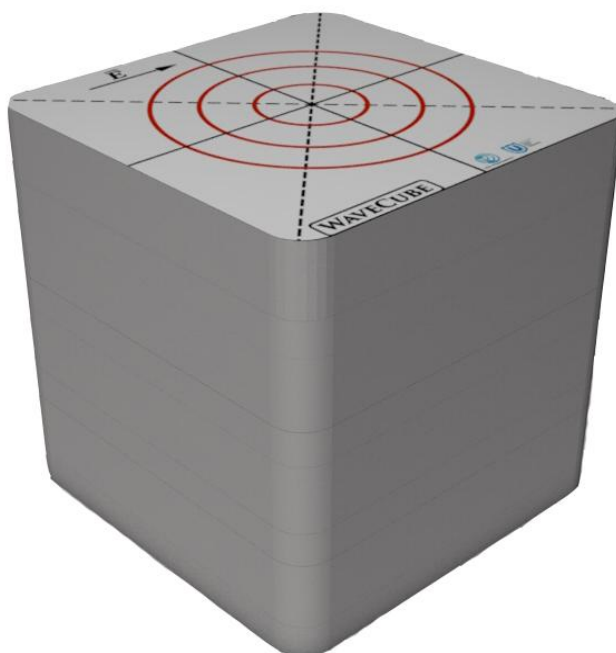


Рисунок 4.3. Внешний вид СШП измерительного комплекса

И вид в разрезе рис 4.4.

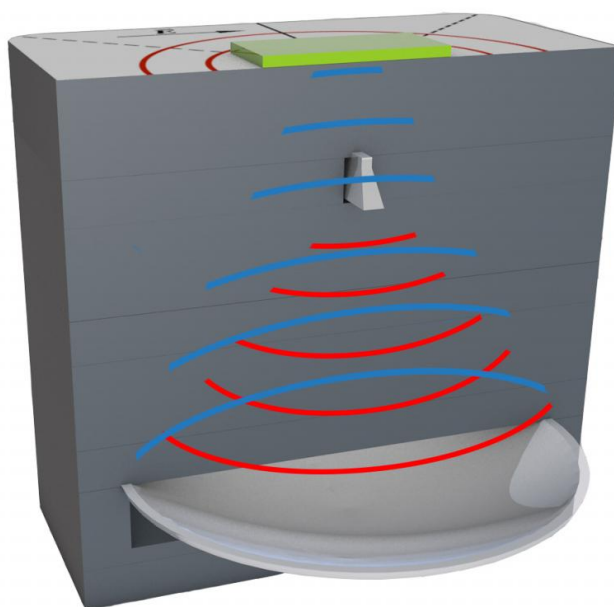


Рисунок 4.4. Внешний вид СШП измерительного комплекса в разрезе

Облучатели зеркальных антенн определяют характеристики антенного комплекса. Таким образом в качестве облучателей применяются слабонаправленные антенны, такие как: вибраторные с рефлектором,

волноводные, рупорные, спиральные и т.п. Данные антенны выделяют по следующим требованиям:

- Диаграмма направленности должна быть осесимметричной, уровень боковых лепестков минимальным;
- Фронт волны вблизи параболоида должен быть близким к сферическому;
- Размеры облучателя должны быть минимальны, для минимизирования затенения раскрыва зеркала;
- Облучатель должен иметь нужную поляризацию, чтобы обеспечить нужную полосу пропускания и электрическую прочность;
- Конструкция облучателя должна обеспечивать защиту от метеоусловий.

Невыполнение некоторых из требований может привести к искажению фазового распределения в раскрыве зеркала, что ухудшает характеристики излучения антенны. Затенение раскрыва вызывает рассеяние энергии на облучателе, увеличение уровня боковых лепестков, уменьшение КНД антенны.

В предложенном методе использовалась сверхширокополосная комбинированная антенна, которая представляет собой конструктивное объединение электрического и магнитного облучателя, что позволяет расширить полосу пропускания антенны в область низких частот и тем самым уменьшить размер облучателя. При достаточно небольших габаритах $50 \times 40 \times 40$ мм антенна согласована в полосе частот 1.2-18 ГГц, что позволяет с небольшими искажениями излучать и принимать сверхширокополосные электромагнитные импульсы длительность от 0.15 до 0.5 нс. Антенна выполнения из медного листа, размер антенны 4 см.



Рисунок 4.5. Комбинированная СШП антенна типа «Улитка»

На рис. 4.6 приведена частотная зависимость коэффициента стоячей волны (КСВН) для используемых антенн. Видно, что рабочей полосой частот используемых антенн является диапазон от 3 до 20 ГГц.

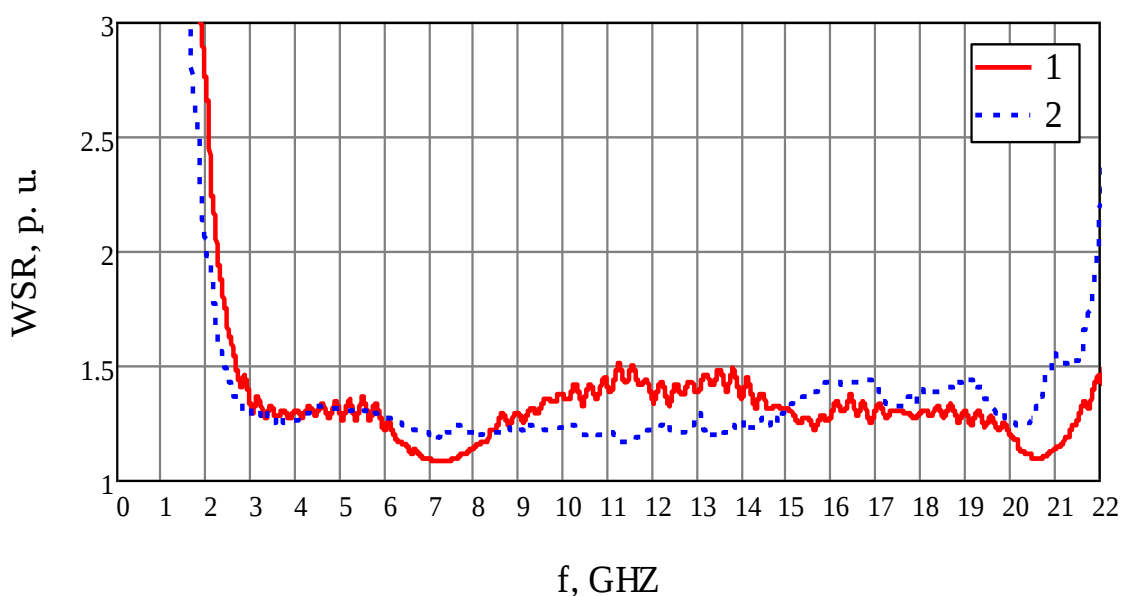


Рисунок 4.6. КСВН СШП антенн «Улитка», 1 – первая антенна, 2 – вторая антенна

Диаграмма направленности по пиковой напряженности поля при подаче на вход антенн биполярного импульса напряжения рис. 4.6.

Диаграмма направленности (ДН) излучателя в горизонтальной плоскости симметрична и составляет порядка 90° по уровню 0.7. в вертикальной плоскости ДН имеет наклон, ввиду асимметричной формы антенны.

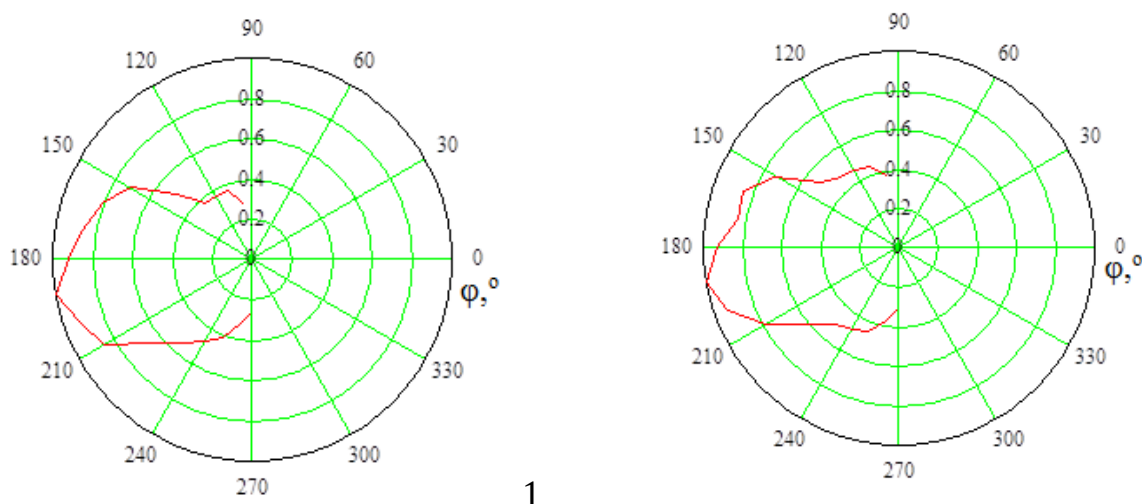


Рисунок 4.7. Диаграмма направленности СШП антенн «Улитка» на частоте 8 ГГц, 1 – первая антенна, 2 – вторая антенна

Векторный рефлектометр CABANR140 (рис. 4.7) предназначен для измерений комплексного коэффициента отражения многополюсников. Данный рефлектометр предназначен для применения во время проверки, настройки и разработки разнообразных антенно-фидерных устройств (АФУ). Рефлектометр можно использовать в полевых условиях, в промышленном производстве, в лабораториях, а также в условиях применения в составе автоматизированных измерительных приборов и стендов.



Рисунок 4.8. Векторный рефлектометр CABAN R140

Векторный рефлектометр позволяет осуществлять дистанционное управление в соответствии с программной технологией COM/DCOM.

Векторный рефлектометр состоит из генератора испытательного и гетеродинного сигнала, аттенюатора регулировки мощности, блока направленного ответвителя и других узлов, обеспечивающих работу рефлектометра. Измерительный порт рефлектометра является источником испытательного сигнала. Падающая и отражённая волны блока ОН преобразуются смесителями в колебания промежуточной частоты 240 кГц и поступают в двухканальный приёмник обработки на ПЧ. В двухканальном приёмнике сигналы фильтруются, преобразуются в цифровые коды и подаются на дальнейшую обработку (фильтрация, измерение разности фаз, измерение амплитуды) в сигнальный процессор. Измерительные фильтры на ПЧ реализованы в цифровой форме и имеют полосу пропускания от 100 Гц до 30 кГц. Сочетание узлов ОН, СМ и двухканального приёмника обработки на ПЧ образуют два идентичных измерительных каналов приёмника сигнала.

Принцип измерения комплексного коэффициента отражения заключается в подаче на исследуемое устройство от измерительного порта испытательного сигнала на заданной частоте, последующего измерения амплитуды и фазы, отражённого исследуемым устройством сигнала и сравнения их с амплитудой и фазой испытательного сигнала.

Технические особенности векторного рефлектометра CABANR140:

- Диапазон частот от 85 МГц до 14 ГГц
- Измерения модуля и фазы коэффициента отражения, потерь в кабеле
- Измерение модуля коэффициента передачи
- Измерения во временной области, временная селекция
- Время измерения на одной частоте 200 мкс
- Шаг по частоте 25 Гц
- Питание прибора от интерфейса USB

Векторный рефлектометр CABANR 140 предназначен для измерения комплексного коэффициента отражения в диапазоне рабочих частот от 85 МГц до 14 ГГц. Нижняя граница выбранного диапазона обусловлена КСВН

антенны и размерами зоны фокусировки, которая равна наибольшей длине волны или наименьшей частоте нужного диапазона.

Размеры измеряемых материалов имеют форму квадрата со сторонами 220 мм. Это соответствует частоте $f = 1,4 \text{ ГГц}$. Начиная с частоты $f = 2,5 \text{ ГГц}$, КСВН антенны располагается ниже уровня 2. С учетом всех особенностей минимальная частота для измерительного комплекса равна $f_H = 2,5 \text{ ГГц}$. Для данного измерительного комплекса пятно фокусировки имеет размер $\varnothing 15 \text{ см}$ по уровню -10дБ.

Верхняя граница частоты измерений также обусловлена характером измерений. Образец РПМ должен располагаться в дальней зоне облучателя, которая описывается формулой $r = \frac{2d^2}{\lambda}$, где d – апертура антенны, λ – длина волны излучения, для коротких волн граница дальней зоны находится на значительном расстоянии. Это условие выполняется за счет малых габаритов антенны и фокусировки с использованием эллиптического зеркала. Таким образом, $f_6 = 13 \text{ ГГц}$.

4.3 Расчет теоретического коэффициента отражения

Для расчета поля после прохождения через слой диэлектрика и отраженного от металлической пластины производился теоретический расчет коэффициента отражения.

Коэффициент отражения от границы раздела полупространств «воздух-диэлектрик» имеет вид: $v = \frac{z-1}{z+1}$, где $z = \frac{\mu}{n}$ – волновое сопротивление среды, $n = \sqrt{\mu\epsilon}$ – показатель преломления среды, $a = \exp(iknd)$

При рассмотрении случая, когда рассчитывается отражение от границы раздела «воздух-диэлектрик-воздух» комплексная амплитуда имеет вид:

$$A = - \frac{(1 + v)a^2 \cdot v}{1 - v^2 \cdot a^2}$$

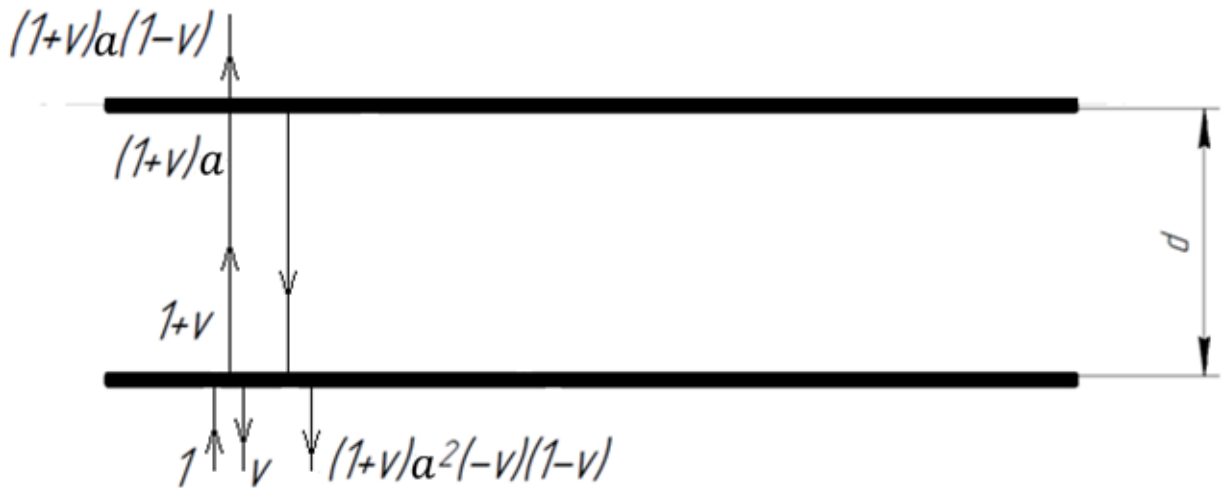


Рисунок 4.10. Отражение от границы раздела «воздух-диэлектрик-воздух».

В таком случае коэффициент отражения по напряженности поля имеет вид $R = v + (1 - v) \cdot A$.

Для случая, когда рассчитывается отражение от границы раздела «воздух-диэлектрик-металл» комплексная амплитуда поля находится как:

$$A1 = -\frac{(1 + v)a^2}{1 - v \cdot a^2}$$

Коэффициент отражения по напряженности поля имеет вид $R1 = v + (1 - v) \cdot A1$

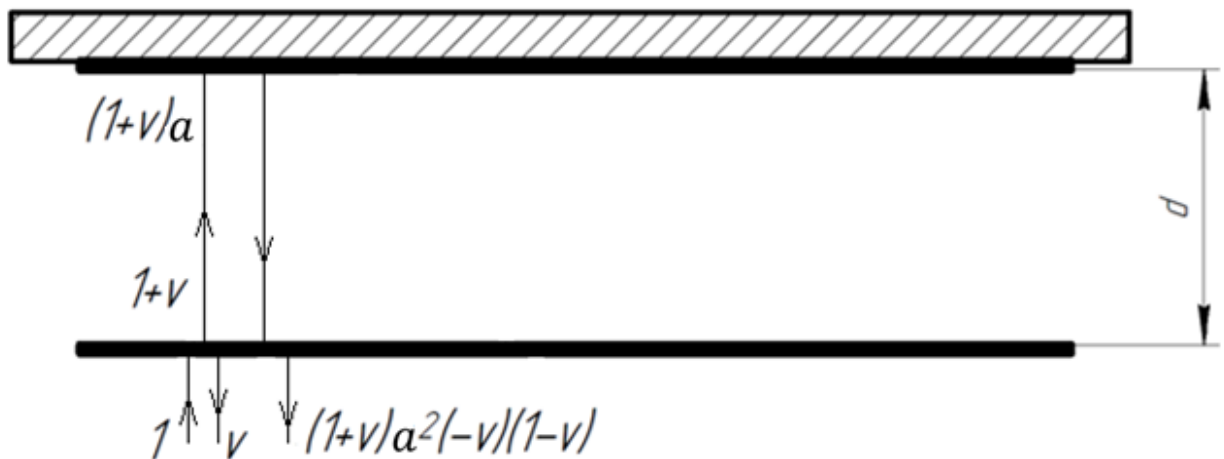


Рисунок 4.9. Отражение от границы раздела «воздух-диэлектрик-металл».

Для поиска показателя преломления n необходимо решить систему уравнений R и $R1$:

$$\begin{cases} R = v + (1 - v) \cdot \left(-\frac{(1 + v)a^2 \cdot v}{1 - v^2 \cdot a^2}\right) \\ R1 = v + (1 - v) \cdot \left(-\frac{(1 + v)a^2}{1 - v \cdot a^2}\right) \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений, находим значение $\varepsilon^2 = \frac{v-R}{1-R \cdot v}$, а для магнитной проницаемости было взято значение $\mu=1$.

Для расчета, показатель преломления возьмем $n = const$, после этого имеет вид: $n = Re(n) + ilm(n)$, где $Re(n) = \frac{(t2-t1) \cdot c}{2 \cdot d}$, $Im(n) = -\ln\left(\frac{A_{max2}}{A_{max1}}\right) \cdot \frac{d}{2 \cdot c \cdot (t1-t2)}$. Здесь $t1$ – это задержка первого максимума, которая соответствует отражению от листа металла. А $t2$ – это задержка второго максимума, которая соответствует отражению от листа металла и образца, A_{max1} – амплитуда первого максимума сигнала металл, A_{max2} – амплитуда второго максимума сигнала образец и металл.

4.4 Обработка данных и анализ полученных результатов

На рисунке 4.10 приведен график зависимости амплитуды S_{11} , где 1 – сигнал в отсутствии образца, 2 – сигнал, прошедший через исследуемый образец (текстолит). Для того чтобы избавиться от шумов, многократных переотражений, необходимо произвести дополнительную математическую обработку.

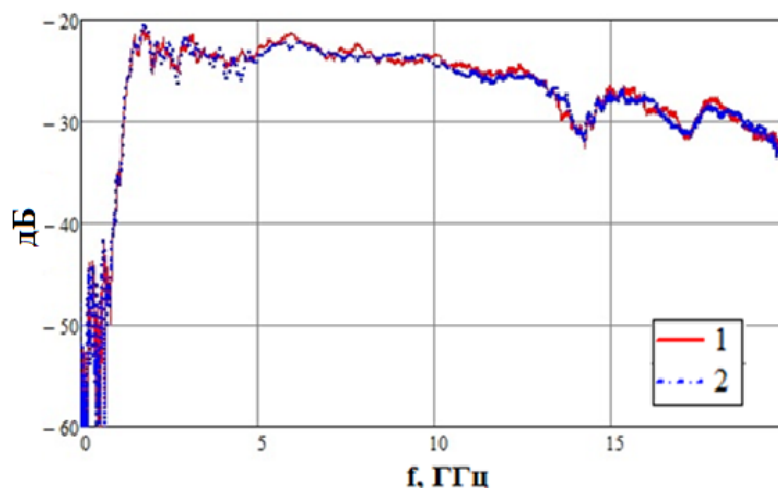


Рисунок 4.10. Спектр сигнала: 1 – сигнал в отсутствии образца, 2 – сигнал, прошедший через исследуемый образец (текстолит).

Математическая обработка заключалась в следующем. Из полученных данных были записаны комплексные сигналы. Это сделано для того, чтобы уменьшить лишние периодичности сигнала при переходе во временную область.

Далее было произведено обратное преобразование Фурье для перехода во временную область. Это необходимо для того, чтобы увидеть основной сигнал и избавиться от посторонних сигналов рис 4.11.

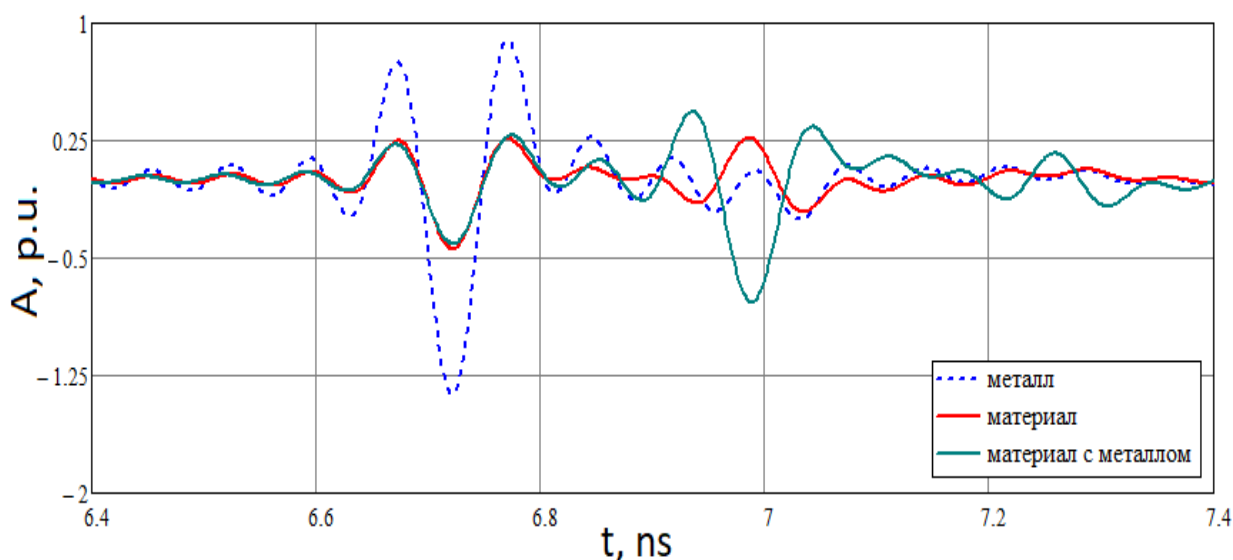


Рисунок 4.11. Сигналы во временной области

После перехода во временную область, необходимо выделить основной сигнал. Его можно определить по задержки, которая соответствует прохождению сигнала через исследуемый материал. Основной сигнал

определяется по сигналу, который соответствует измерениям в отсутствии образцов – воздух.

Далее применим временную фильтрацию сигнала. Данная операция заключается в том, что используется оконная функция – W , которая позволяет выделить основной импульс и избавиться от шумов, возникающих в результате переотражений от окружающих предметов.

$$W(t) = e^{-(\frac{t-t_0}{b})^6}$$

где, b – ширина окна, t_0 – соответствует максимуму сигнала.

Ширина окна выбирается с учетом электрической толщины исследуемого образца по формуле $b = \frac{dRe(n)}{c}$, где d – толщина образца, n – показатель преломления образца, c – скорость света. В случае если показатель образца не известен, то выбор ширины окна основывается на анализе графика временной зависимости сигнала, отраженного от образца. Фильтрация сигнала рассчитывается по формуле:

$$S^w(t) = S(t)W(t).$$

На рисунке 4.12 приведены сигналы во временной области после фильтрации с изображением оконной функции.

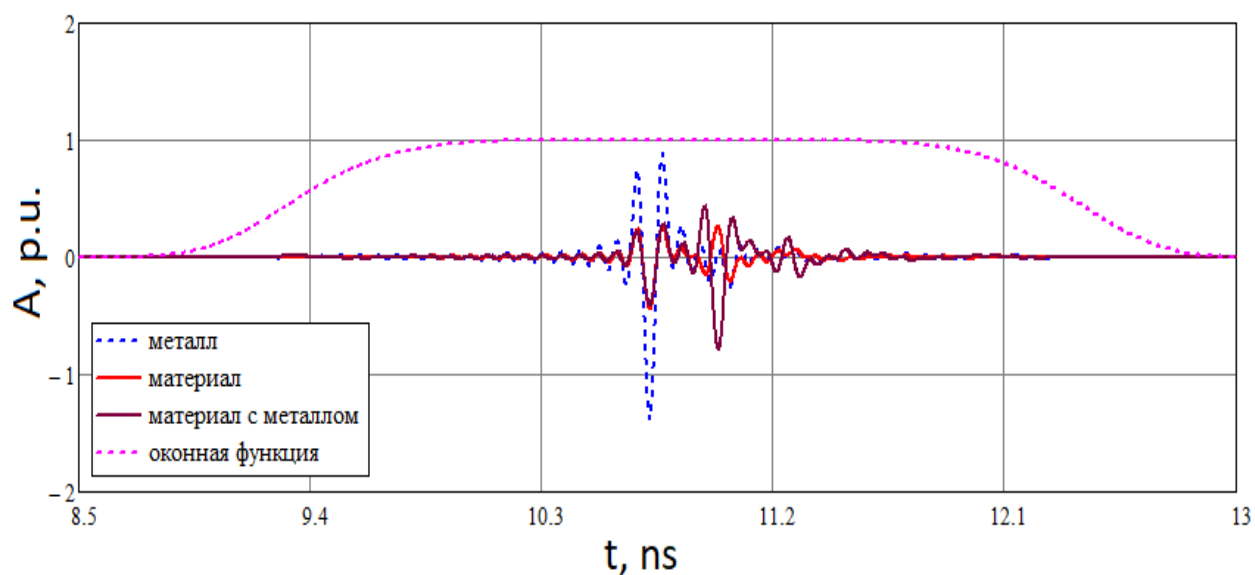


Рисунок 4.12. Отраженные сигналы во временной области оконной функцией

Выше описанные операции сигналов позволяют устранить помехи, вызванные отражением от соединительных разъемов и окружающих предметов.

После операции фильтрации сигналы переводятся из временной области в спектральную, с использованием прямого преобразования Фурье (рисунок 4.13).

$$s^w(f) = \int_0^T S^w(t) e^{i2\pi ft} dt$$

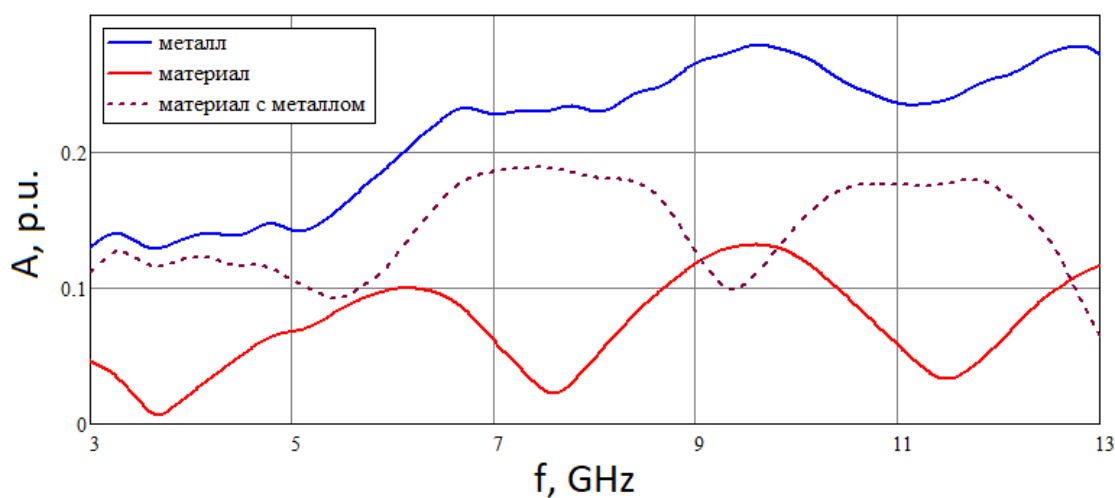


Рисунок 4.13. Сигналы в спектральной области

Для нахождения комплексного показателя преломления сначала необходимо произвести нормировку сигнала, прошедшего через

исследуемый образец на сигнал, полученный в его отсутствии. Для этого хорошо подходит метод регуляризации по Тихонову [7]:

$$S(f) = \frac{S_2(f)S_1^*(f)}{|S_1(f)|^2 + \alpha},$$

где S_1 – сигнал в отсутствии образца, S_2 – сигнал, прошедший через исследуемый образец, α – коэффициент регуляризации.

Далее проводилось несколько измерений. Были рассчитаны диэлектрическая и магнитная проницаемость фторопласта толщиной 1,72 см, оргстекло 1,41 см и текстолит 2,06 см. Так же измерялось значение параметров при повороте материала на 90° , чтобы определить насколько влияют неровности измеряемого образца при проведении эксперимента и последующую обработку данных. Измерялся только текстолит толщиной 2,06 см.

На рисунке 4.14 представлены результаты измерения оргстекла с толщиной листа 1,41 см.

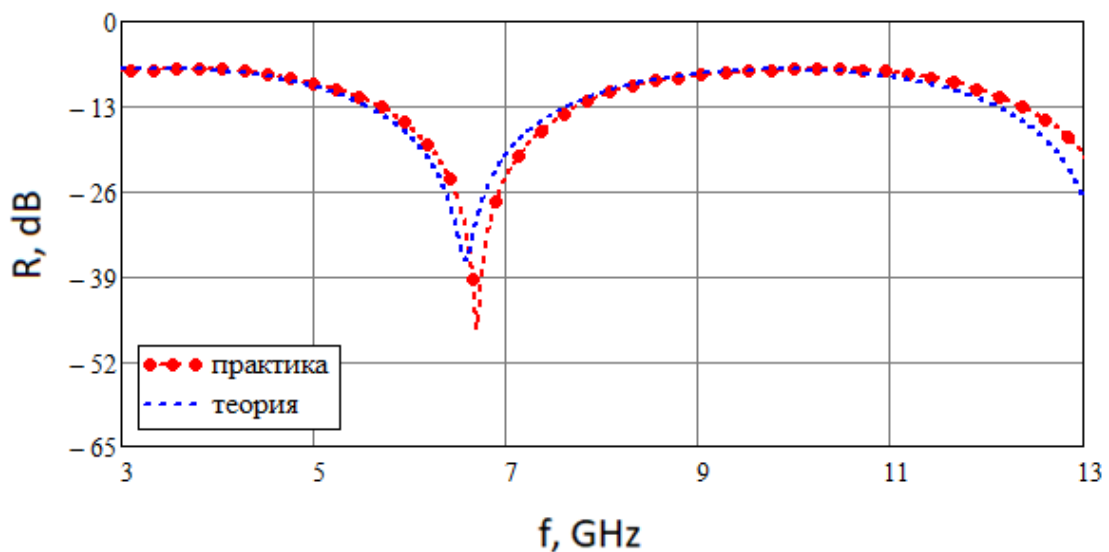


Рисунок 4.14. Значения коэффициента отражения от листа оргстекла

Для фазы коэффициента отражения от листа оргстекла получим следующие графики (рис. 4.15).

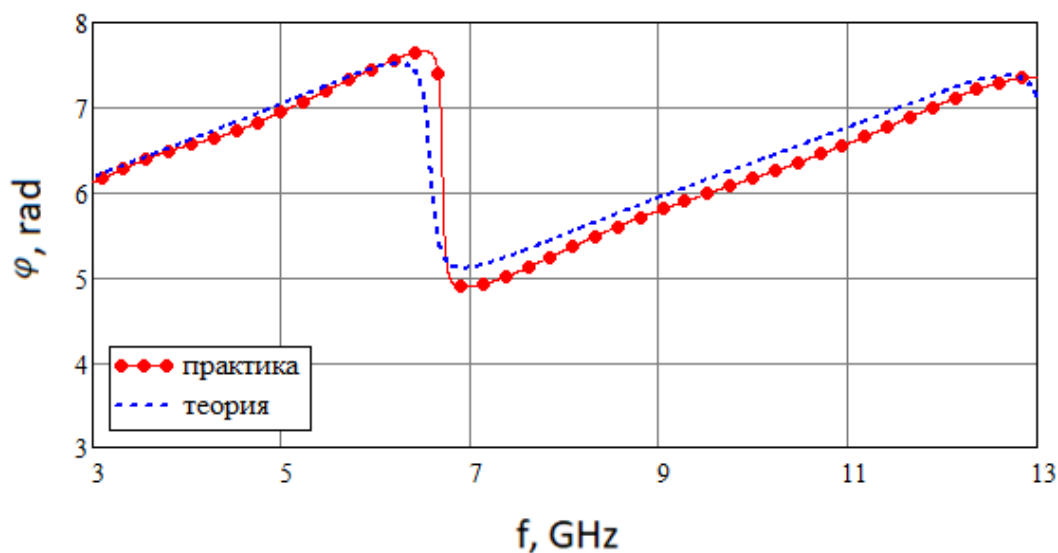


Рисунок 4.15. Значение фазы коэффициента отражения от листа оргстекла

Результаты для варианта «воздух-диэлектрик-металл» коэффициент отражения будет иметь вид, представленный на рисунке 4.16.

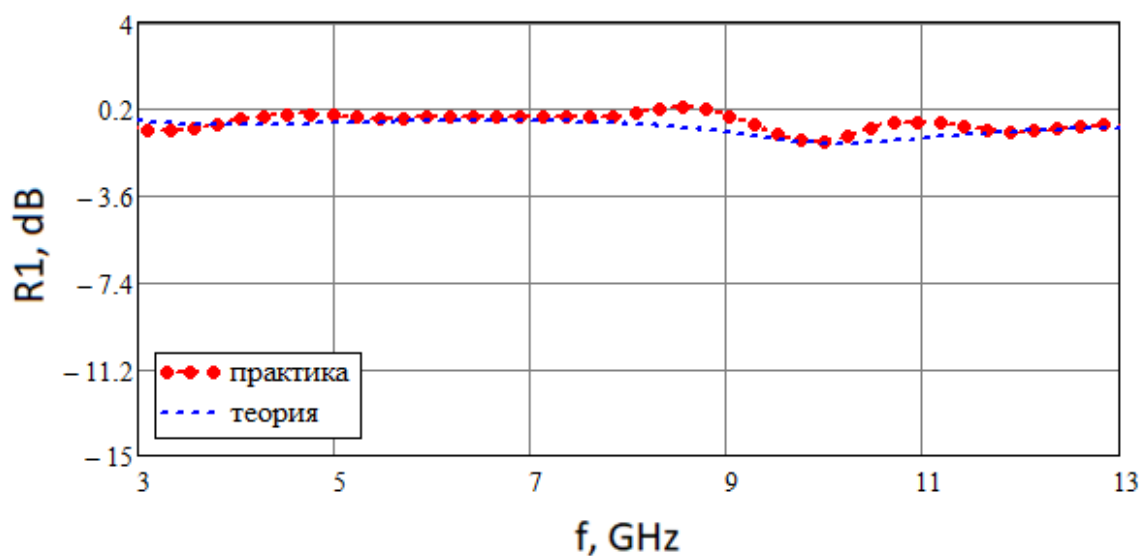


Рисунок 4.16. Значения коэффициента отражения от листа оргстекла расположенного с металлической подложкой

Фаза для варианта с металлом представлена на рисунке 4.16. На рассматриваемом диапазоне частот можно наблюдать совпадение теоретического и расчетного коэффициента отражения.

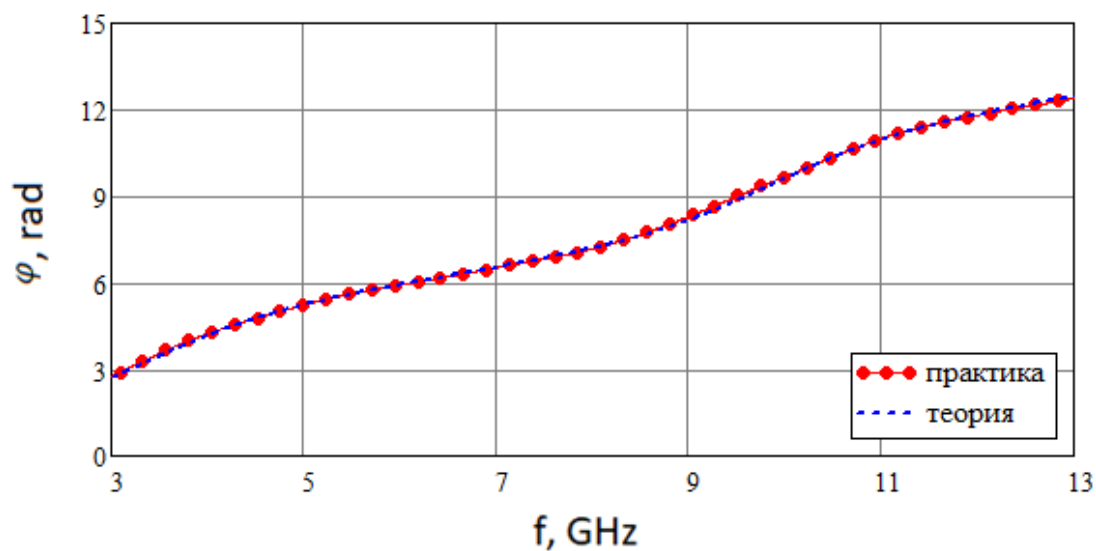


Рисунок 4.17. Зависимость фазы коэффициента отражения от частоты для оргстекла расположенного с металлической подложкой

Значения комплексной диэлектрической проницаемости представлены ниже. Для оргстекла с заявленной толщиной $\epsilon=2,612$.

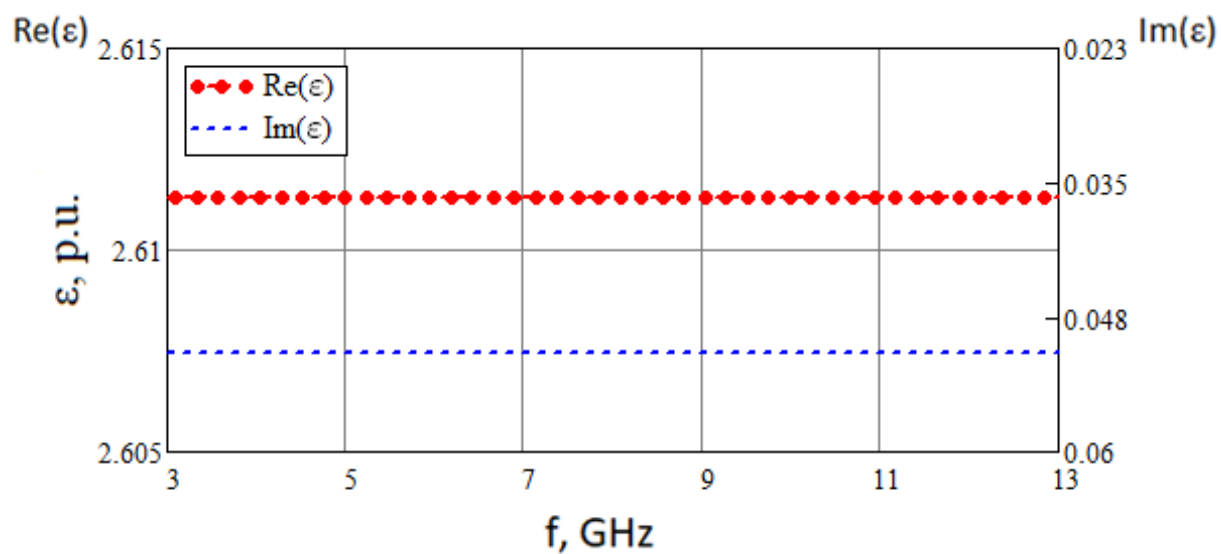


Рисунок 4.18. Значение относительной диэлектрической проницаемости для оргстекла

Значения комплексной магнитной проницаемости $\mu=1$.

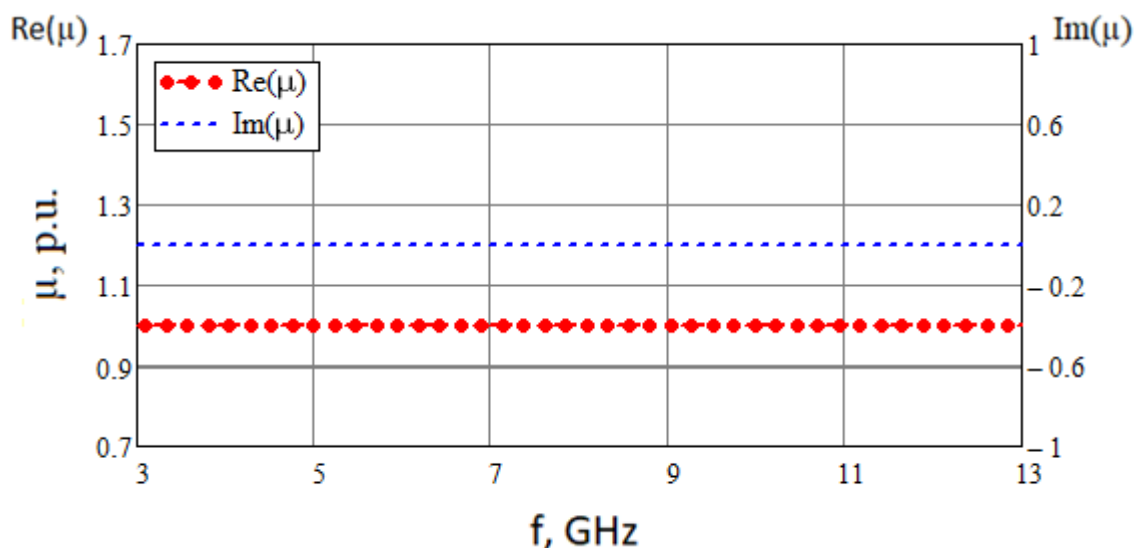


Рисунок 4.19. Значение относительной магнитной проницаемости для оргстекла

Для второй серии экспериментов по измерению диэлектрической и магнитной проницаемостей был взят лист фторопласта толщиной 1.72 см. Представлены следующие графики.

На рисунке 4.20 изображено значение коэффициента отражения. Видно несоответствие теории с практикой.

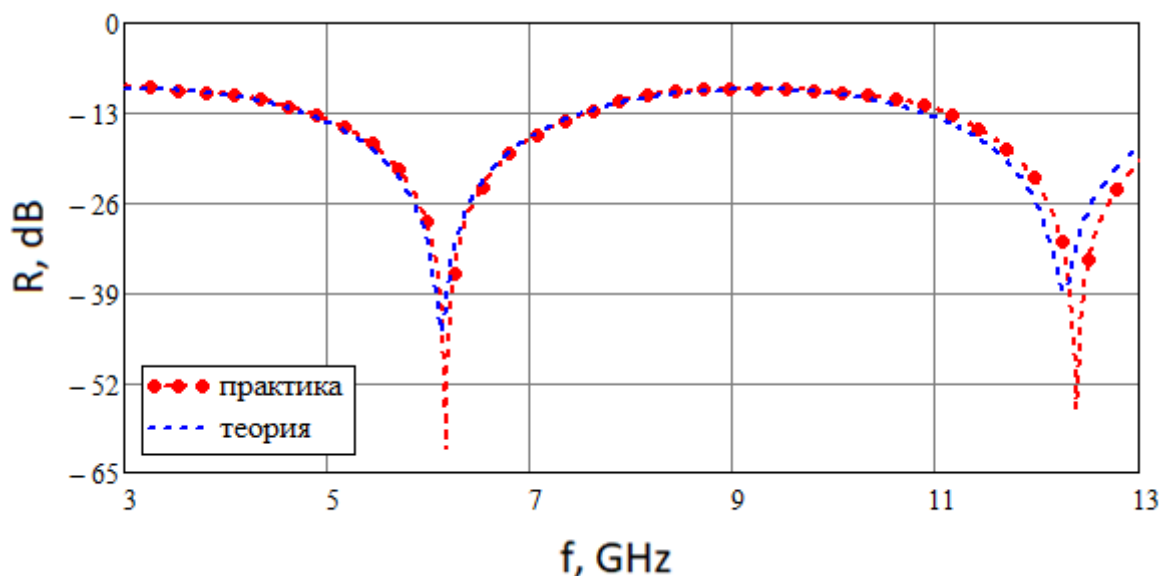


Рисунок 4.20. Зависимость амплитуды коэффициента отражения от частоты для листа фторопласта

Для фазы коэффициента отражения от листа фторопласта с толщиной листа 1.72 см расположенного без металла получим следующие графики (рис. 4.21).

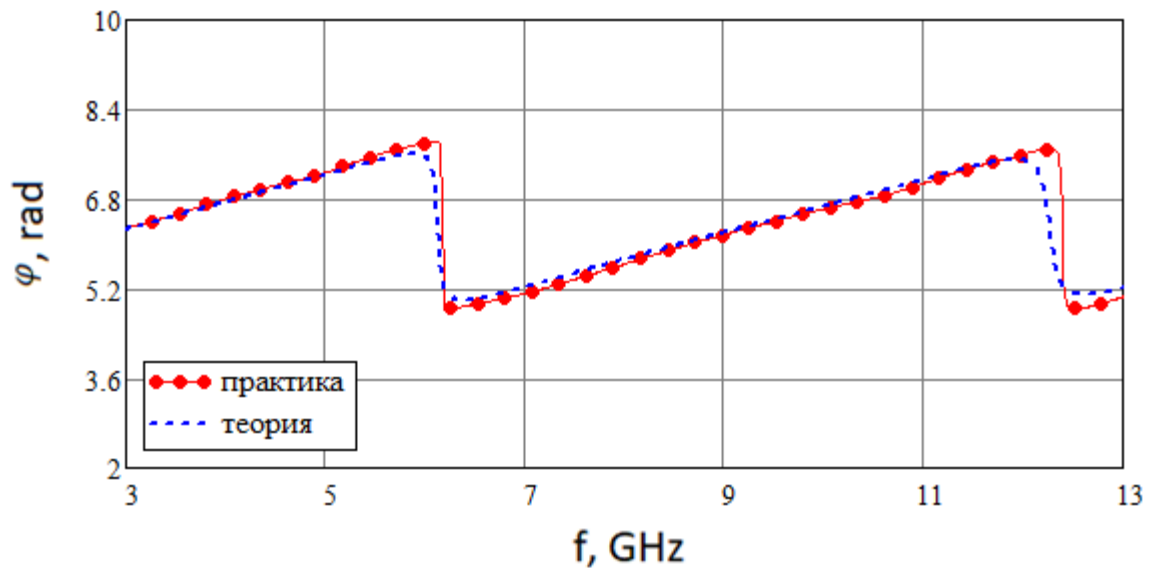


Рисунок 4.21. Зависимость фазы коэффициента отражения от частоты для листа фторопласта

Результаты для варианта «воздух-диэлектрик-металл» коэффициент отражения будет иметь вид, представленный на рисунке 4.21.

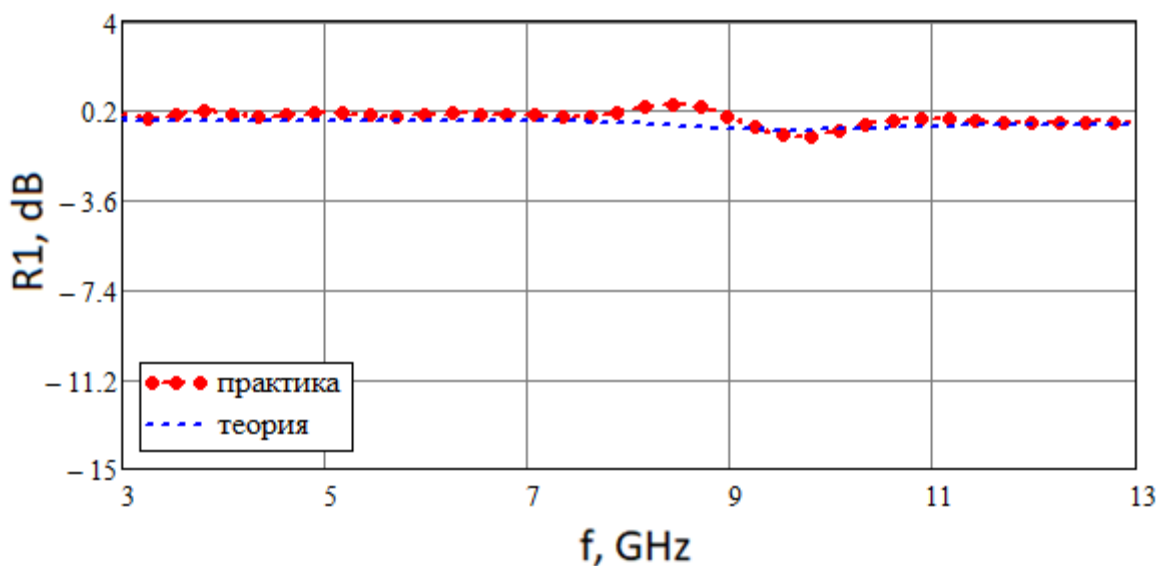


Рисунок 4.22. Зависимость амплитуды коэффициента отражения от частоты для фторопласта расположенного с металлической подложкой

Фаза для варианта с металлом представлена на рисунке 4.23. На рассматриваемом диапазоне частот можно наблюдать совпадение теоретического и расчетного коэффициента отражения.

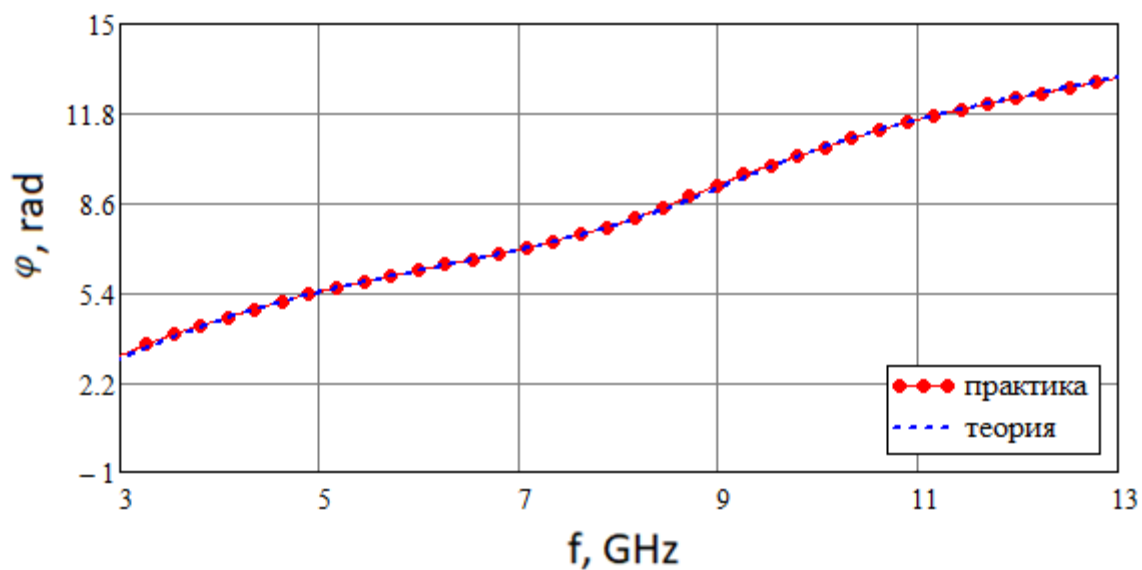


Рисунок 4.23. Значение фазы коэффициента отражения от листа фторопласта расположенного с металлической подложкой

Значения комплексной диэлектрической проницаемости представлены ниже. Для оргстекла с заявленной толщиной $\epsilon=2,02$.

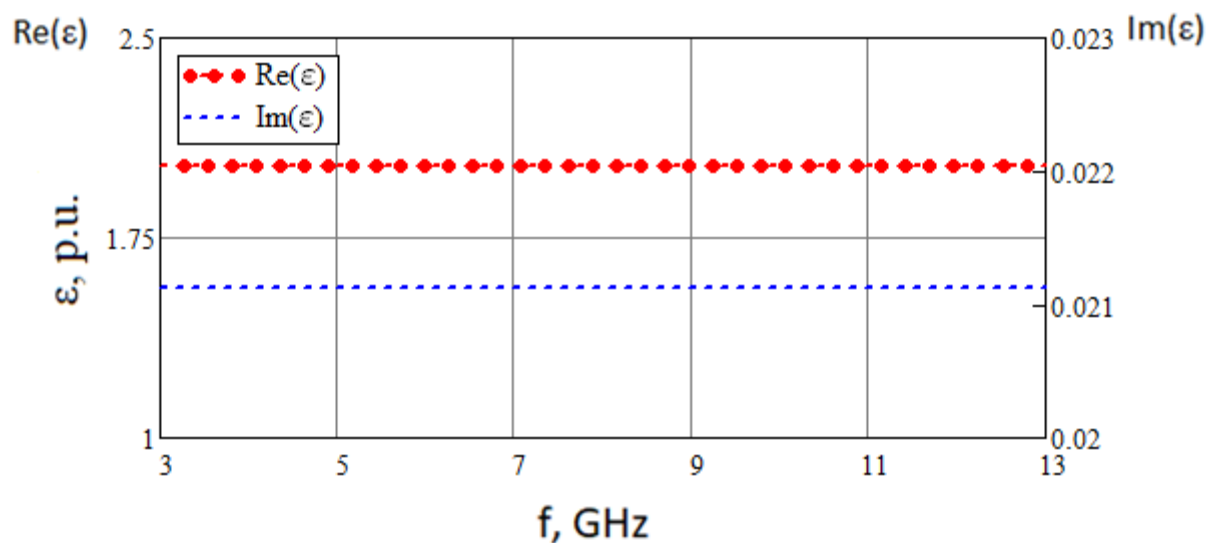


Рисунок 4.24. Значение относительной диэлектрической проницаемости для фторопласта

Значения комплексной магнитной проницаемости $\mu=1$.

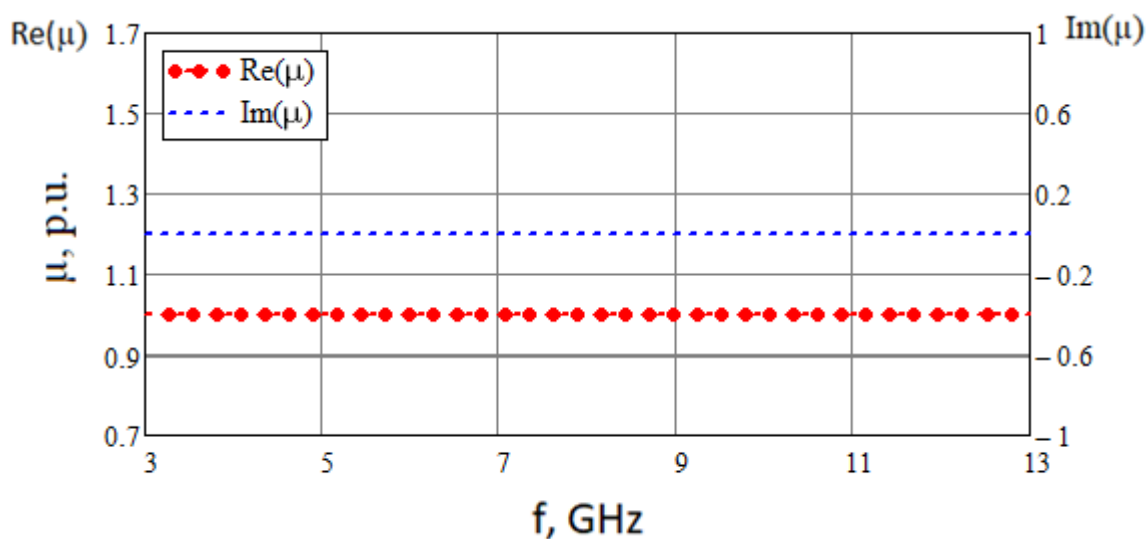


Рисунок 4.25. Значение относительной магнитной проницаемости для фторопласта

Для материала текстолит толщиной 2,06 см результаты измерений представлены ниже. На рисунке 4.26 изображено значение коэффициента отражения.

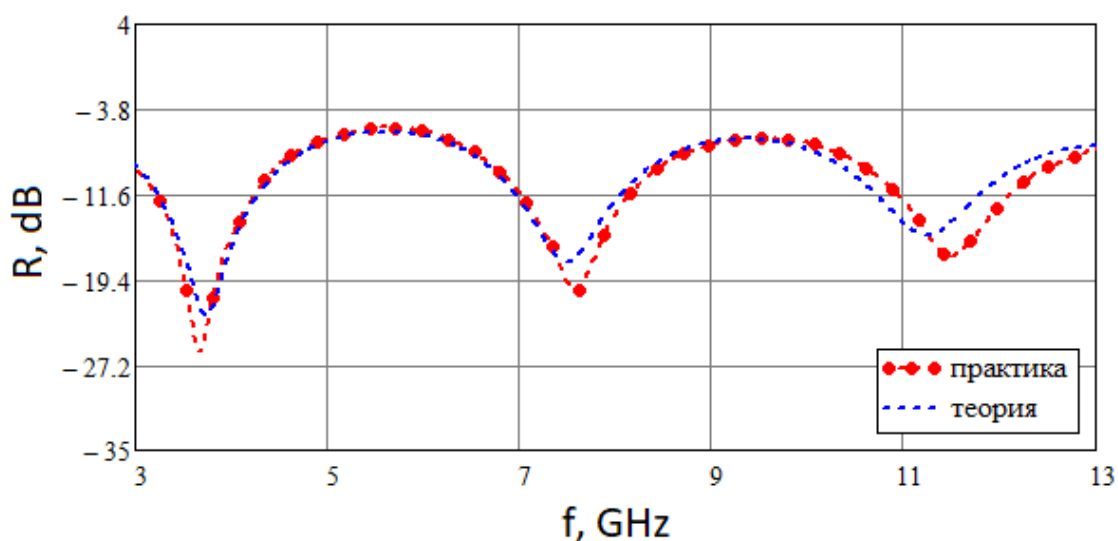


Рисунок 4.26. Значения коэффициента отражения от листа текстолита

Для фазы коэффициента отражения от листа текстолита с толщиной листа 2,06 см, расположенного без металла, получим следующие графики (рис. 4.27).

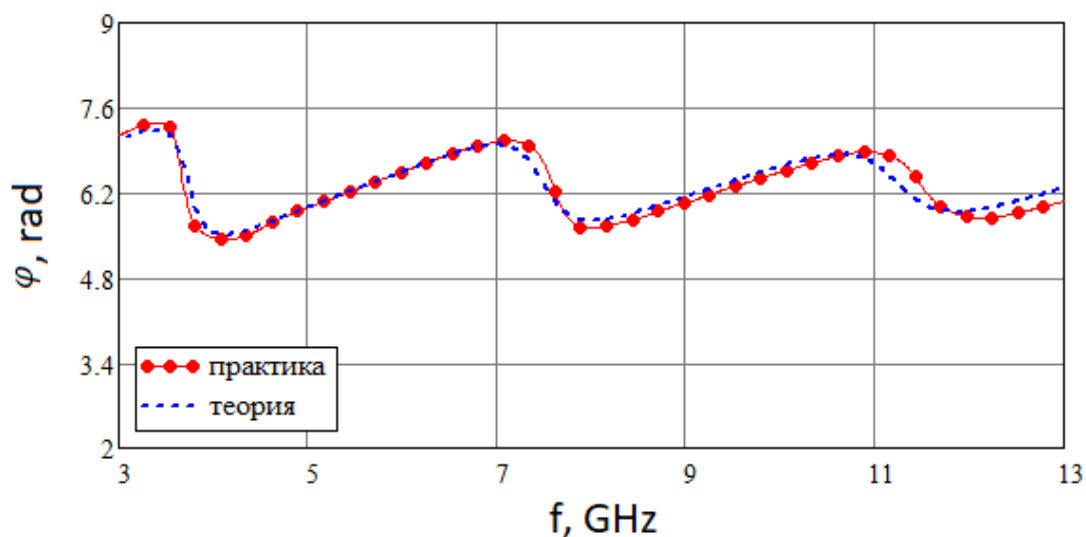


Рисунок 4.27. Значение фазы коэффициента отражения от листа текстолита

Результат для варианта расположения измеряемого образца с металлом коэффициент отражения будет иметь вид, представленный на рисунке 4.28. Совпадение теории и практики присутствует на всём интервале частот.

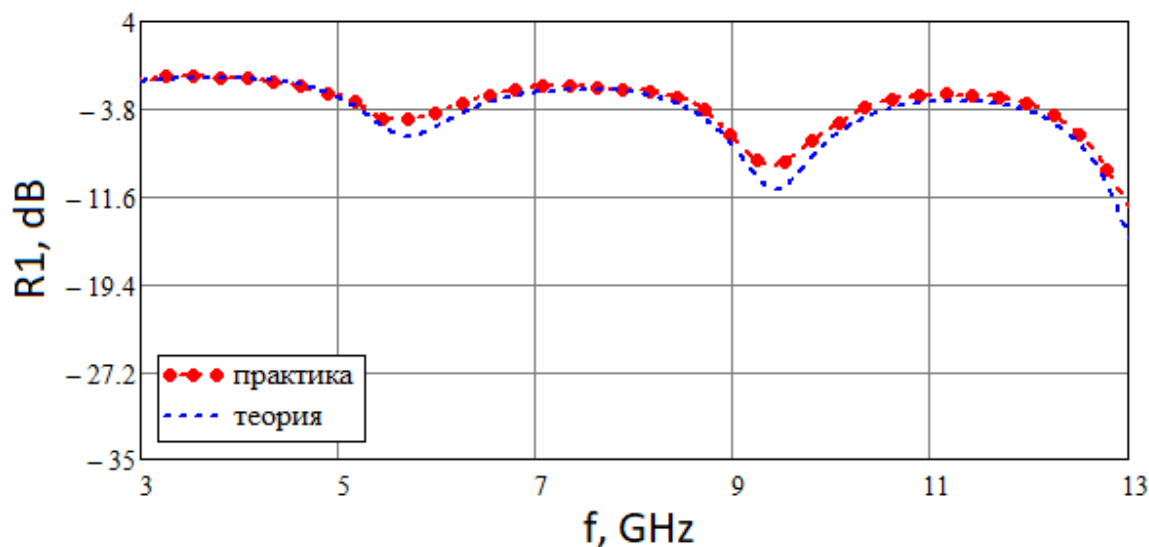


Рисунок 4.28. Значения коэффициента отражения от листа текстолита расположенного с металлической подложкой

Фаза для варианта с металлом представлена на рисунке 4.29. На рассматриваемом диапазоне частот можно наблюдать совпадение теоретического и расчетного коэффициента отражения.

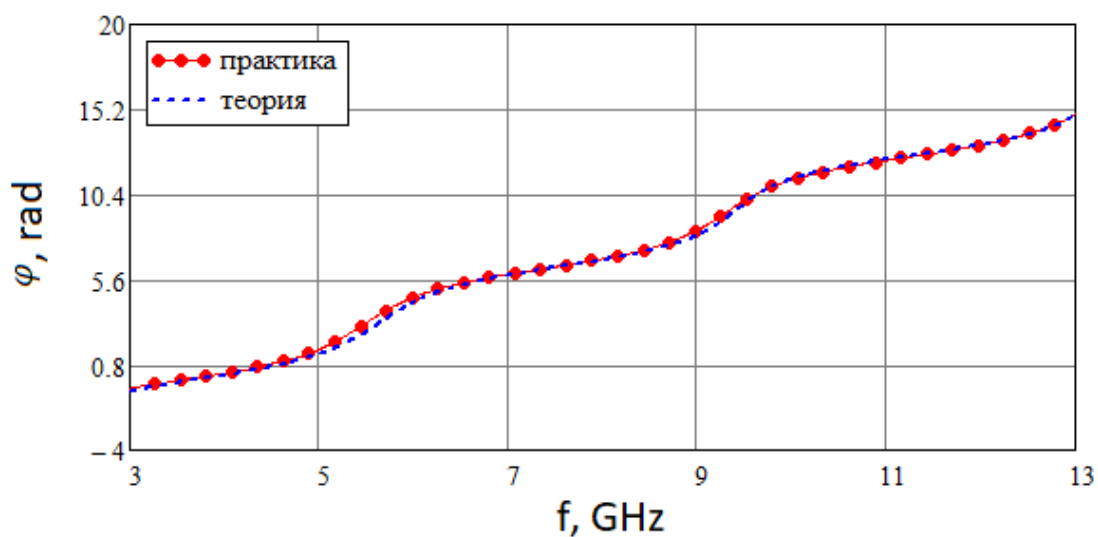


Рисунок 4.29. Зависимость фазы коэффициента отражения от частоты для текстолита расположенного с металлической подложкой

Значения комплексной диэлектрической проницаемости представлены ниже. Для текстолита с заявленной толщиной $\epsilon=3,765$.

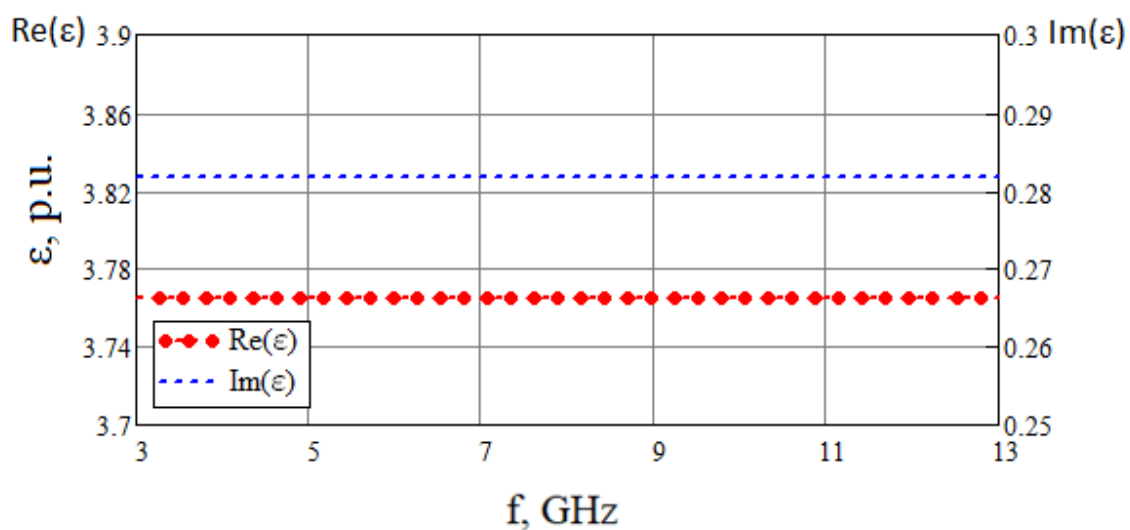


Рисунок 4.30. Значение относительной диэлектрической проницаемости для текстолита
Значения комплексной магнитной проницаемости $\mu=1$.

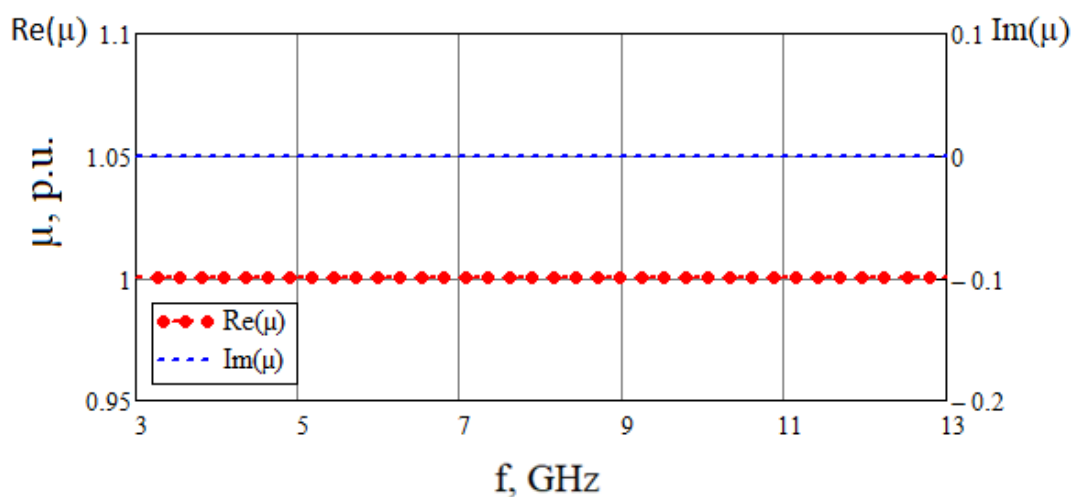


Рисунок 4.31. Значение относительной магнитной проницаемости для текстолита

Для материала толщиной 2,06 см из текстолита, который был повернут на 90° , результаты измерений представлены ниже. На рисунке 4.32 изображено значение коэффициента отражения. Видны соответствия теории с практикой.

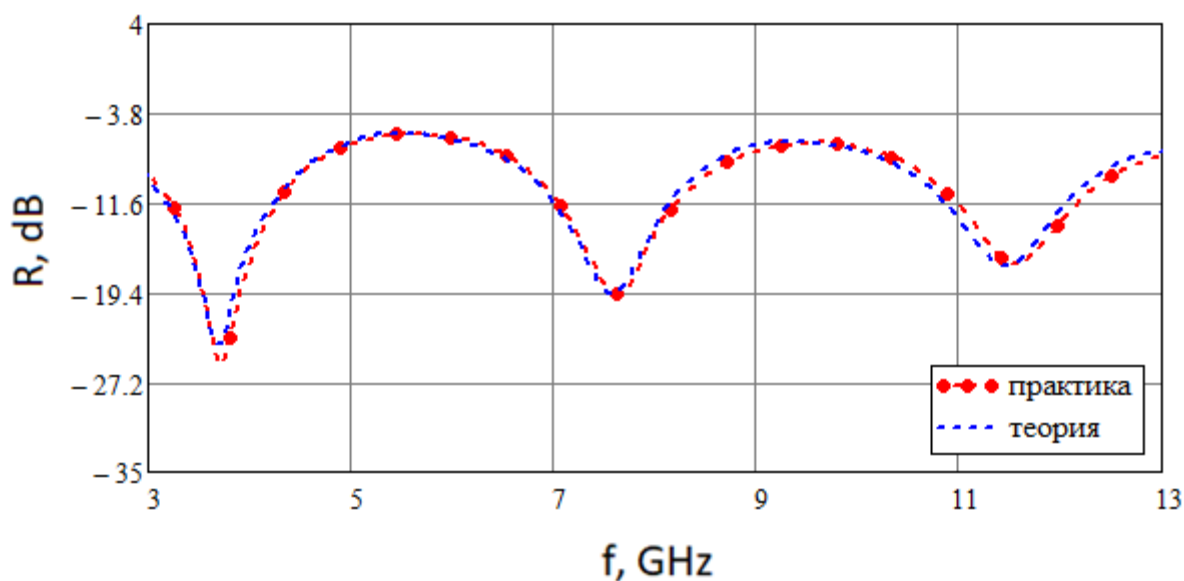


Рисунок 4.32. Значения коэффициента отражения от листа текстолита

Для фазы коэффициента отражения от листа текстолита с толщиной листа 2,06 см получим следующие графики (рис. 4.33).

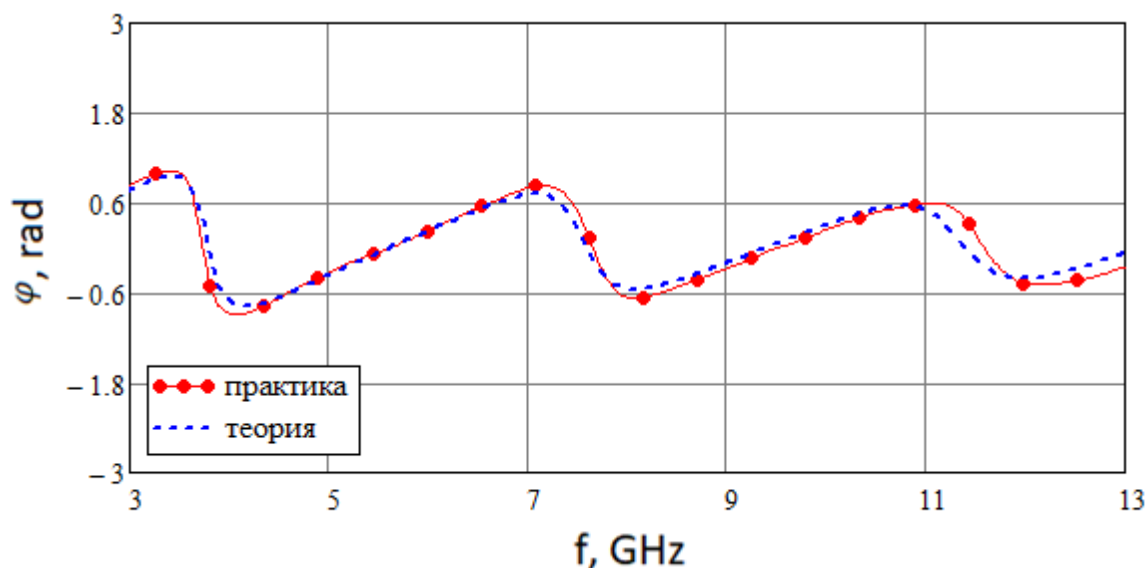


Рисунок 4.33. Значение фазы коэффициента отражения от листа текстолита

Результаты для варианта с металлом коэффициент отражения будет иметь вид, представленный на рисунке 4.34.

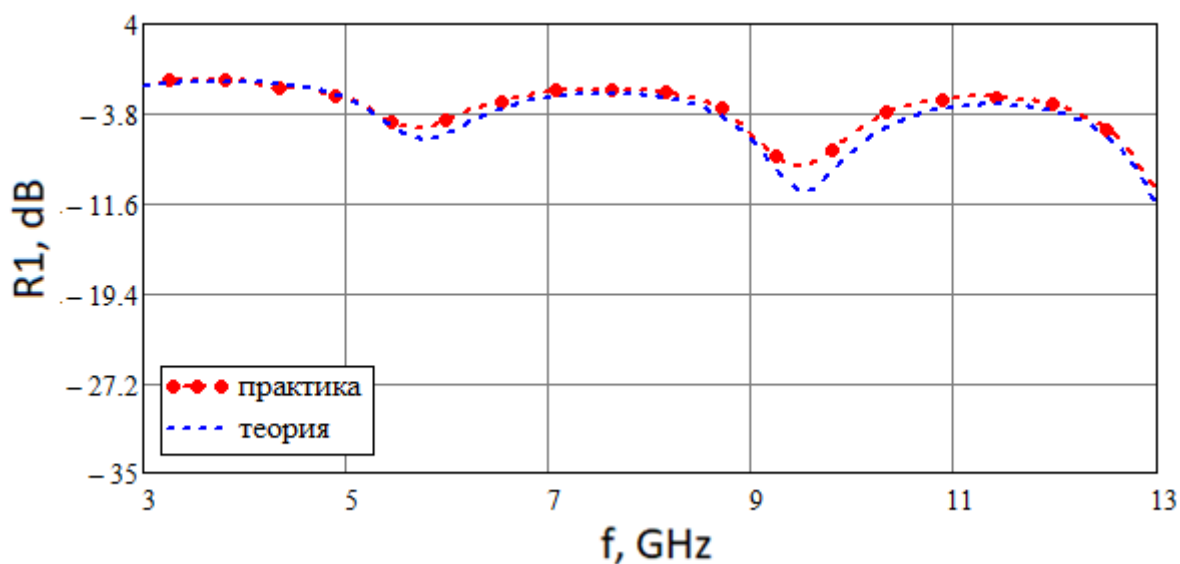


Рисунок 4.34. Значения коэффициента отражения от листа текстолита расположенного с металлической подложкой

Фаза для варианта с металлом представлена на рисунке 4.35. На рассматриваемом диапазоне частот можно наблюдать совпадение теоретического и расчетного коэффициента отражения.

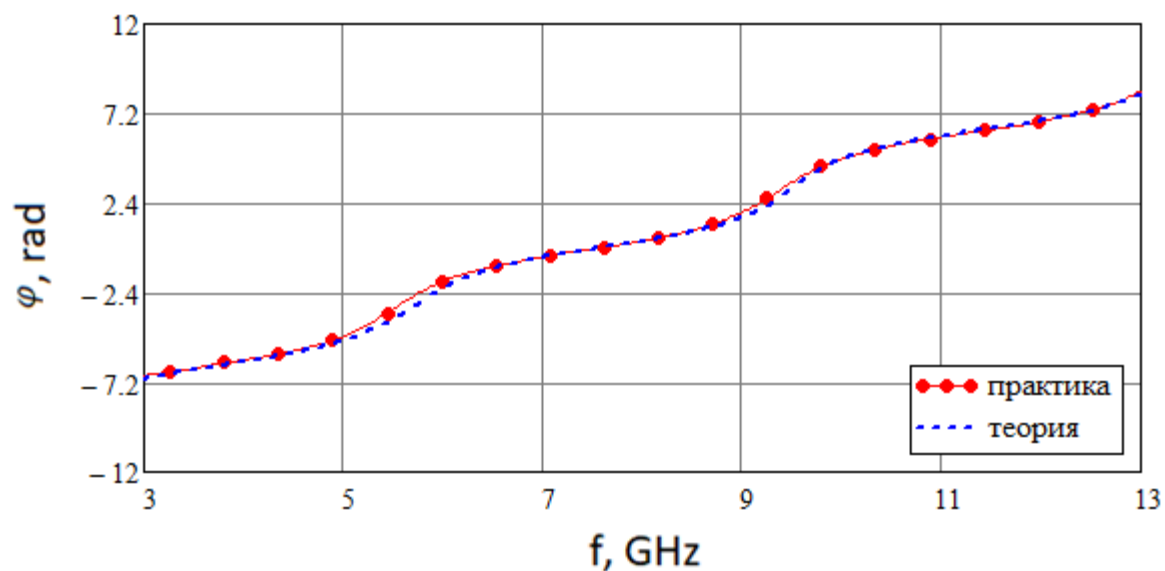


Рисунок 4.35. Зависимость фазы коэффициента отражения от частоты для текстолита расположенного с металлической подложкой

Значения комплексной диэлектрической проницаемости представлены ниже. Для текстолита с заявленной толщиной $\epsilon=3,691$.

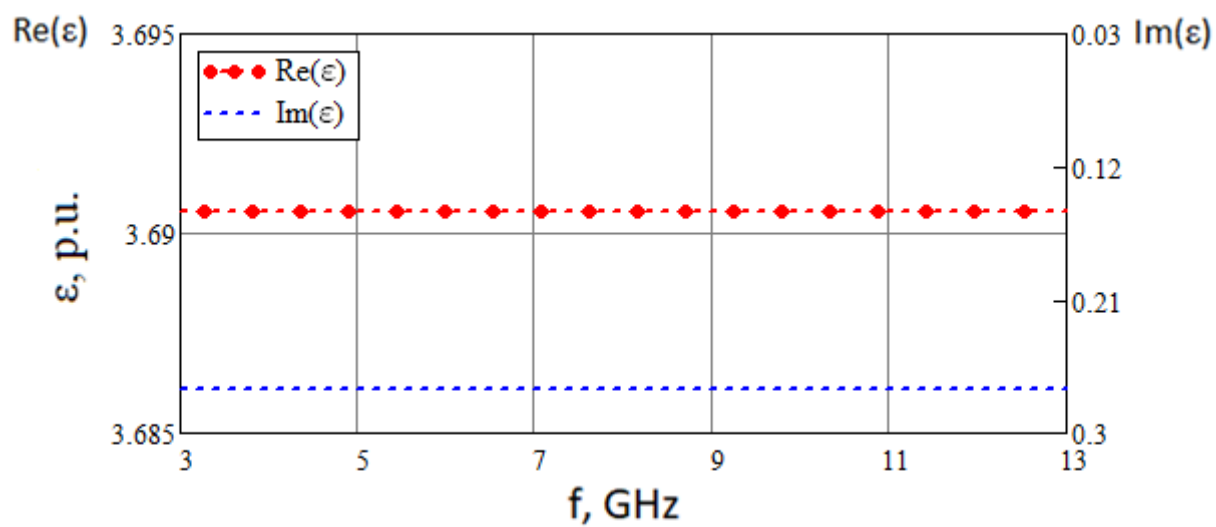


Рисунок 4.36. Значение относительной диэлектрической проницаемости для текстолита
Значения комплексной магнитной проницаемости $\mu=1$.

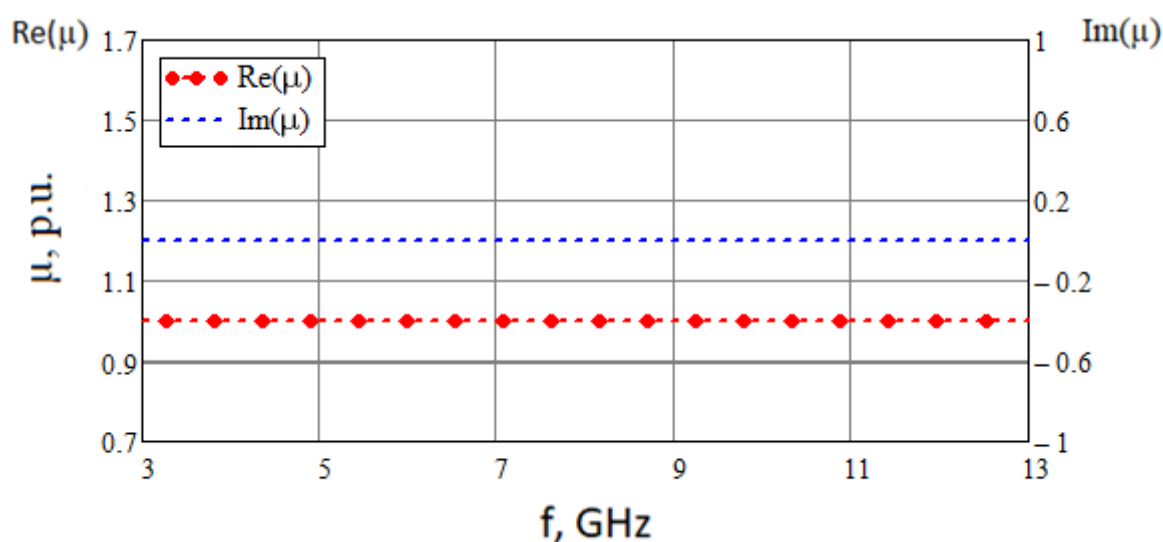


Рисунок 4.37. Значение относительной магнитной проницаемости для текстолита

При повороте на 90° есть изменения в значениях диэлектрической проницаемости, но в пределах погрешности. Данная неточность связана с неровностями на измеряемой поверхности.

Проведенные исследования доказали, что рассматриваемый метод в состоянии точно и быстро проводить измерения диэлектрической и магнитной проницаемости. Неточности, наблюдаемые на графиках, исправляются дополнительной калибровкой измерительного комплекса.

Заключение

По результатам выполнения диссертационной работы проведен обзор литературы по теме и изучены существующие варианты определения электрофизических свойств плоских материалов. Выявлена необходимость создания нового метода поиска диэлектрической и магнитной проницаемостей у плоских материалов.

Проведено моделирование измерительной установки в среде CST Microwave Studio. При моделировании были рассчитаны геометрические размеры параболической антенны, найдены два фокусных расстояния.

На кафедре радиофизики был изготовлен измерительный стенд и написано программное обеспечение. Были проведены эксперименты с плоскими материалами для подтверждения правильности метода измерения с уже известными значениями диэлектрической и магнитными проницаемостями. После этого был проведен ряд экспериментов для поиска значений диэлектрической и магнитной проницаемостями.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что разработанный измерительный стенд позволяет получать все электрофизические параметры исследуемого образца. Данная установка отличается от известных способов измерения электрофизических параметров малыми габаритами стенда, возможностью размещения вне безэховой камеры, скоростью обработки данных, стоимостью применяемых компонентов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мэттьюз Ф. Композитные материалы. Механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс. – М. : Техносфера, 2004. – 408 с.
2. Кербер М. Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии / М. Л. Кербер. – СПб. : Профессия, 2008. – 560 с.
3. ГОСТ 30381-95 (ГОСТ Р 50011-92). Совместимость технических средств электромагнитная. Поглотители электромагнитных волн для экранированных камер. Общие технические условия. Введ. 96-05-15. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2005. – 20 с.
4. Политико А. А. Стенд для измерения коэффициентов отражения и прохождения и электрофизических параметров материалов в свободном пространстве / А. А. Политико, В. Н. Семененко, В. А. Чистяев // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 20-й международной крымской конференции [10–16 сентября 2010 г., г. Севастополь]. Севастополь, 2010. – С. 1267 – 1273.
5. Измерение коэффициента отражения от радиопоглощающего материала [Электронный ресурс] / Д. А. Булычев [и др.] // Электронные средства и системы управления. – 2016. – № 1 (1). – С. 113 – 115. – Электрон. версия печат. публ. – Доступ из научн. электрон. б-ки «eLIBRARY.RU».
6. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах / Л. М. Бреховских. – М. : Наука, 1973. – 343 с.
7. Балзовский Е. В. Плоская сверхширокополосная антенна для систем радиовидения [Электронный ресурс] / Е. В. Балзовский, Ю. И. Буянов, С. Э. Шипилов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – № 9 (2). – С. 102 – 106. – Электрон. версия печат. публ. – Доступ из научн. электрон. б-ки «eLIBRARY.RU».
8. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М. : Наука, 1986. – 288 с.

9. Белоус А. И. Космическая электроника : в 2-х книгах / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – М. : Техносфера, 2015. – 487 с.
10. Лыньков Л. М. Экраны электромагнитного излучения на основе порошкообразного шунгита [Электронный ресурс] / Л. М. Лыньков, М. Ш. Махмуд, Е. А. Криштопова // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2012. – № 4. – С. 103 – 108. – Электрон. версия печат. публ. – URL: <http://elib.psu.by:8080/handle/123456789/51> (дата обращения: 10.04.2019).
11. Якубов В. П. Основы электродинамики излучения и его взаимодействие с веществом : учебное пособие / В. П. Якубов, В. П. Беличенко, В. В. Фисанов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2010. – 296 с.
12. Бензарь В. К. Техника СВЧ–влагометрии / В. К. Бензарь. – Минск: Вышэйшая школа, 1974. – 352 с.
13. Беличенко В. П. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы / В. П. Беличенко, Ю. И. Буянов, В. И. Кошелев. – М. : Наука, 2015. – 484 с.
14. Буянов Ю. И. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства : учебное пособие / Ю. И. Буянов, Г. Г. Гошин. – Томск: ТУСУР, 2013. – 300 с.
15. Марков Г. Т. Антенны / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. – М. : Энергия, 1975. – 528 с.
16. Беличенко В. П. Излучение сверхширокополосных электромагнитных импульсов : метод. пособие / В. П. Беличенко, Ю. И. Буянов, В. И. Кошелев. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2004. – 31 с.
17. Семененко В. Н. Сверхширокополосная методика измерения электрофизических параметров листовых материалов в свободном пространстве / В. Н. Семененко, В. А. Чистяев // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 20-й международной

крымской конференции [10–16 сентября 2010 г., г. Севастополь].
Севастополь, 2010. – С. 1091 – 1092.

18. Измерение коэффициента отражения радиопоглощающих покрытий в диапазоне рабочих температур / В. Н. Семененко [и др.] // Доклады 2-й Всероссийской Микроволновой конференции, ИРЭ РАН, Москва, 26–28 ноября 2014 г. – С. 409 – 414.

19. Измерение коэффициента отражения радиопоглощающих покрытий в широком диапазоне температур / С. Г. Кибец [и др.] // Шестнадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН, Москва, 18–21 мая 2015 г. – С. 44 – 45.

20. Разработка широкополосного радиопоглощающего покрытия с высокими эксплуатационными свойствами / В. И. Иванова [и др.] // Шестая общероссийская научно-практическая конференция «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем» («СВЧ–2016») – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. – С. 180 – 195.

21. Гошин Г. Г. Устройства СВЧ и антенны : в 2 ч. / Г. Г. Гошин. – Томск: ТУСУР, 2012. – Ч. 2: Антенны – 159 с.

22. Тулебаева А. Измерение коэффициента отражения радиопоглощающего материала [Электронный ресурс] / А. Тулебаева // Наука и образование сегодня. – 2016. – № 4 (5). – Электрон. версия печат. публ. – Доступ из научн. электрон. б-ки «КиберЛенинка».

23. Методы и средства для измерения коэффициентов отражения от плоских образцов на миллиметровых, сантиметровых и дециметровых волнах [Электронный ресурс] // URL: <http://naukarus.com/metody-i-sredstva-dlya-izmereniya-koeffitsientov-otrazheniya-ot-ploskih-obraztsov-na-millimetrovyh-santimetrovyh-i-detsim> (дата обращения: 12.04.2019).

24. Ротхаммель К. Антенны [Пер. с нем.] / К. Ротхаммель. – СПб: Издательство «Бояныч», 1998. – 656 с.

Отчет по поиску патентов

Темой магистерской диссертационной работы является «Сверхширокополосный измерительный комплекс для определения электрофизических параметров плоских материалов». В процессе подготовки обзорного раздела диссертации были изучены публикации на русском языке по указанной и смежной тематикам. Также был проведен патентный поиск по ключевым фразам «электрофизические измерения» и «коэффициент отражения», были проанализированы рефераты и описания изобретений из баз данных патентных ведомств России. В результате анализа были отобраны следующие патенты, которые сведены в таблицу 1 – Патентная документация.

Таблица 1.

Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета.	Назначение изобретения
1.пат. № 2362176 Рос. Федерация: МПК G 01 R 27/06 (2006.01)	Покусин Д.Н., Субботин И.Ю., Мартынов А.П., Теселкин В.А., Игнатьев В.И.; патентообладатель Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт имени академика А.И. Берга. – № 2007147711/28; заявл. 24.12.2007	Изобретение относится к технике сверхвысоких частот и предназначено для измерения коэффициента отражения плоских образцов радиопоглощающего покрытия (РПП) в миллиметровом, сантиметровом и дециметровом диапазоне радиоволн.
2.пат. №2079144 Рос. Федерация: МПК G 01 R 27/06 (2006.01)	Аплеталин В.Н., Зубов А.С., Казанцев Ю.Н., Солосин В.С.; патентообладатели Аплеталин В.Н., Зубов А.С., Казанцев Ю.Н., Солосин В.С. – №94026120/09; заявл. 14.07.94; опубл. 10.05.97.	Устройство для измерения коэффициента отражения в квазиоптическом тракте.

3. G01R 27/26 (1995.01)	Резников М.А. 94012374/06, 07.03.1994 Дата публикации заявки: 27.07.1996	Изобретение относится к способам измерения электрофизических характеристик диэлектриков и может найти использование для неразрушающего контроля непроводящих материалов, например, полимеров в химико-технологической промышленности, энергетике, машиностроении.
4. пат. №008122332/28, РФ 03.06.2008 G01R 27/26 (2006.01)	Усанов Дмитрий Александрович (RU), Горбатов Сергей Сергеевич (RU), Сорокин Алексей Николаевич (RU), Кваско Владимир Юрьевич (RU) 2008122332/28, 03.06.2008	Изобретение относится к области радиотехники и электроники и может быть использовано самостоятельно для измерения электрофизических параметров материалов
5. пат. № 2234101 Рос. Федерация: МПК G 01 R 27/06 (2006.01) 6963301	Беляев В.В., Богданов Ю.Н., Леньшин А.В., Маюнов А.Т.; патентообладатель Федеральный государственный научно- исследовательский центр радиоэлектронной борьбы и оценки снижения заметности Минобороны России. – 2007143648/09, заявл. 26.11.2007; опубл. 20.11.2008, Бюл. №32.	Устройство для измерения коэффициента отражения радиоволн от поглощающих
6. пат. № 2234101 Рос. Федерация: МПК G 01 R 27/06 (2006.01)	Беляев В.В., Богданов Ю.Н., Виноградов А.Д., Кириянов О.Е., Маюнов А.Т.; патентообладатель 5-й Центральный научно- исследовательский испытательный институт Министерства обороны Российской Федерации. №2002121181/09	Способ измерения коэффициента отражения радиоволн от радиопоглощающих покрытий



Введите текст:

...или загрузите файл:

Файл не выбран...

Выбрать файл...

Укажите год публикации:

2019 ▼

Выберите коллекции

Все

Рефераты

Авторефераты

Иностранные конференции

PubMed

Википедия

Российские конференции

Иностранные журналы

Российские журналы

Энциклопедии

Англоязычная википедия

Анализировать

 Проверить по расширенному списку коллекций системы Руконтекст (<http://text.rucont.ru/like>)

Обработан файл:

ВКР.docx.

Год публикации: 2019.

Оценка оригинальности документа - 96.04%

Процент условно корректных заимствований - 0.0%

Процент некорректных заимствований - 3.96%

Просмотр заимствований в документе

Время выполнения: 29 с.

Документы из базы

Источники заимствования

1. [Анализ перспективных радиопоглощающих материалов](http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektivnyh-radiopogloschayuschih-materialov)
 (<http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektivnyh-radiopogloschayuschih-materialov>)

Авторы: Латыпова А. Ф., Калинин Ю. Е..

Год публикации: 2012. Тип публикации: статья научного журнала.

<http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektivnyh-radiopogloschayuschih-materialov>
<http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektivnyh-radiopogloschayuschih-materialov>

Показать заимствования (15)



В списке литературы Источники
 Заимствования

3.46%

2. Радиоволновая томография с использованием принципа тактирования решёток (<http://vak2.ed.gov.ru/idcUploadAutoref/renderFile/178830>)

Авторы: Сатаров Раиль Наилевич.

Год публикации: 2014. Тип публикации: автореферат диссертации.

<http://vak2.ed.gov.ru/idcUploadAutoref/renderFile/178830><http://vak2.ed.gov.ru/idcUploadAutoref/renderFile/178830>[Показать заимствования \(3\)](#)

0.51%

[Дополнительно](#)[Значимые оригинальные фрагменты](#)[Библиографические ссылки](#)[Искать в Интернете](#)© 2015 2019 Институт системного анализа Российской академии наук (<http://www.isa.ru/index.php?lang=ru>)