

УДК 621.372

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Будагян И.Ф., д.ф.-м.н., профессор, E-mail: budif@yandex.ru

Дубровин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор, E-mail: VladislavFD@yandex.ru

МГТУ МИРЭА, Москва, Россия

Аннотация. Целью работы явилась модернизация исследования волновых процессов на автоматизированной установке с использованием обработки результатов на подключенном компьютере с помощью разработанной специализированной программы. Проведение измерений диаграмм рассеяния от различных объектов в безэховой камере специальной формы и сравнение их с теоретическими данными, полученными путем моделирования, привело к апробации методики измерений. Был выявлен ряд особенностей электродинамики рассеянных полей, имеющих прикладное значение. Прделанная работа позволит проводить более сложные эксперименты и исследования в области дифракции электромагнитных волн и наносекундных импульсов, внести ощутимый вклад в развитие данной области.

Ключевые слова: Дифракция электромагнитных волн, моделирование волновых процессов, автоматизированный измерительный стенд, диаграммы рассеяния.

AUTOMATED STAND FOR RESEARCH WAVE PROCESSES

Budagyan I.F., D.Sc.(Phys-Math), Prof., E-mail: budif@yandex.ru

Dubrovin V.F., D.Sc.(Phys-Math), Prof., E-mail: VladislavFD@yandex.ru

MSTU MIREA, Moscow, Russia

Abstract. The work purpose was modernization of wave processes on an automated installation using the processing results on the connected computer by means of the developed specialized program. Carrying out measurements of scattering patterns from different objects in the echoless chamber of the special form and their comparison with the theoretical data received by modeling, has led to approbation of a measurement procedure. A number of electrodynamics features of the absent-minded fields having applied value have been revealed. The done work will allow making more difficult experiments and researches in the field of diffraction of electromagnetic waves and nanosecond impulses, to bring the notable contribution to development of the given domain.

Keywords: Diffraction of electromagnetic waves, modeling of the waves' processes, the automated measuring stand, dispersion diagrams

В настоящее время проблема уменьшения радиолокационной заметности различных объектов вооружения и военной техники привлекает серьезное внимание промышленно развитых стран. В связи с этим, актуальной темой является совершенствование стелс-технологий [1]. Под ними подразумевают комплекс технических решений, в результате которых уменьшается уровень сигналов, поступающих от объекта на приемные системы, пытающиеся его обнаружить и

уничтожить. Стелс-технология включает в себя следующие основные направления: теорию дифракции на сложных телах, разработку и исследование радиопоглощающих материалов, технологию нанесения покрытий и, наконец, радиофизический эксперимент, используемый для контроля в каждом из перечисленных направлений. Использован инновационный подход к образовательному процессу путём интегрирования средств информационно-аналитической графики для наглядного отображения исследуемых волновых процессов [2]. Известно, что зрительная информация воспринимается лучше, чем информация, поступающая по слуховому каналу, а ознакомление с материалом в виде динамического отображения может сыграть решающую роль в понимании физики процесса. В сочетании с комплексом специально разработанных компьютерных программ и экспериментального автоматизированного стенда это обеспечивает уникальные возможности в усвоении материала [3].

1. Состав и характеристики стенда

Стенд позволяет осуществлять как исследование распространения волн в условиях поднятых антенн с учетом влияния подстилающей поверхности, так и исследование процессов дифракции на различных объектах, чему будет посвящен заключительный раздел работы [2, 4].

Поясняется принцип работы автоматизированного стенда (снабженного необходимыми электрическими схемами) с обработкой результатов на компьютере, используемого при проведении лабораторных работ и в научных исследованиях.

Автоматизированный измерительный стенд состоит из генератора, аттенюатора, измерительной линии, вольтметра, согласующего трансформатора, передающей СВЧ части с антенной, вращающегося столика с исследуемым объектом, приемной антенны с детекторной головкой, усилителя сигнала, буфера управления, устройства управления и мониторинга “Mega”, персонального компьютера (ПК), миниатюрной видеокамеры с блоком питания (рисунок 1). Передающая антенна питается от генератора СВЧ, настроенного на фиксированную длину волны в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц. Высокочастотный сигнал передается на неё по волноводному каналу через аттенюатор, измерительную линию и согласующий трансформатор. Аттенюатор используется для плавного ослабления мощности СВЧ. Измерительная линия в сочетании с вольтметром необходима для ориентировочного контроля мощности, после ослабления аттенюатором. Передающая антенна неподвижно закреплена на опорной стойке. В антенне возбуждается волна, которая распространяется в пространстве, и в зависимости от вида отражающей поверхности и поляризации, создается определенная

напряженность поля в точке приема.

Для измерения напряженности поля служит приемная антенна. Приемная антенна закреплена на передвижной опорной стойке. Расстояние между передающей и приемной антеннами можно изменять от 85см до 115см с шагом от 1 см. Возможно, также изменять высоту приемной антенны в пределах 30см. Приемная антенна нагружена на кристаллический детектор, который расположен в детекторной головке. С кристаллического детектора сигнал поступает на усилитель сигнала. Усиленный сигнал поступает на устройство управления и мониторинга. В устройстве управления и мониторинга при помощи аналого-цифрового преобразователя аналоговый сигнал преобразуется в дискретный код (цифровой сигнал) для последующей обработки с помощью ЭВМ.

Для исследования процессов дифракции и отражения радиоволн на телах различной формы используется вращающийся столик. Исследуемые тела помещаются на вращающийся столик. Оператор с помощью персонального компьютера (ПК) может задать угол перемещения столика. Сигнал с ПК через COM порт и кабель RS232 поступает на устройство управления и мониторинга. Далее сигнал поступает на буфер управления. Буфер управления формирует сигнал, необходимый для включения электродвигателя, предназначенного для поворота столика. При вращении электродвигателя сигнал с датчика угла перемещения ротора через буфер управления и устройство управления и мониторинга поступает на ПК. Угол перемещения столика определяется путем подсчета импульсов, считанных с датчика угла перемещения ротора электродвигателя. При достижении заданного угла поворота столика электродвигатель отключается и столик останавливается. В приводе столика также используется датчик начального положения для начала отсчета углового перемещения с 0°.

Для передвижения приемной антенны в горизонтальном и вертикальном направлении используются 2 электродвигателя с редуктором и датчиком углового перемещения ротора. Оператор в окне программы может задать расстояние линейного перемещения антенны в миллиметрах.

Буфер управления предназначен для автоматического управления при помощи ПК, перемещения приемной антенны по горизонтали и вертикали, а также для управления вращением столика вокруг своей оси. При автоматическом управлении кодированный сигнал подается с компьютера на устройство «Mega», в котором он сначала поступает на микросхему «MAX220», которая согласовывает comport с микроконтроллером ATMEGA, после чего из устройства Mega подается напряжение на

реле в буфер управления. Устройство Mega предназначено для управления всеми движущимися частями установки и оцифровки сигнала, поступающего с приемной антенны. Через микросхему Max220 происходит передача данных с устройства Mega на ПК и управление с ПК всеми движущимися частями установки. Программа управления устройством Mega создана на языке программирования СИ++. Микросхема АТМЕГА программируется с помощью специального программатора.

Миниатюрная видеокамера устанавливается внутри безэховой камеры так, чтобы были видны передающая и приемная антенны, а также исследуемый объект. Видеокамера питается от источника питания «УИП», который включается в сеть $\sim 220\text{В}$, 50Гц. На источнике питания устанавливается напряжение $12,5 \pm 0,5\text{В}$. Камера подключается к ПК через специальную PCI карту (TV-тюнер) и выводится на экран монитора с разрешением 640 на 480 точек с помощью программы AVI_IO (версия D3.11) [5].



Рисунок 1 Структурная схема автоматизированного стенда

Основные характеристики стенда:

- коэффициент безэховости камеры: -22 дБ
- динамический диапазон измерений: от 0 до 2500 мВ
- угол поворота исследуемого объекта 360° с шагом 1°
- управление изменением расстояния между антеннами от 85 до 115см с шагом 1см

- частота генератора СВЧ колебаний: 10,325 ГГц (длина волны 3 см)
- допустимый диапазон размеров тел для измерения: от 2,5 см до 9 см
- размер рабочей зоны установки 9 x 15 см

В состав стенда входят передающая и приемная антенны. В качестве антенн выбраны с рупорные излучатели раскрывом 128 x 190 мм, обладающие наиболее равномерным распределением излучаемого поля при перемещении принимающей антенны в вертикальном положении на максимально возможное расстояние (от 0 см до 30 см). Это и обуславливает выбор этих антенн для измерений.

В специальной безэховой камере были измерены диаграммы направленности (ДН) в главных плоскостях этого варианта антенн для уточнения их истинных ДН и влияния подстилающей поверхности, на которой располагался вращающийся столик. Эти измерения подтвердили правильность выбора с точки зрения более узкой ДН и уменьшения влияния горизонтальной подстилающей поверхности [6].

Необходимо было настроить стенд для проведения исследований. В ходе настройки решались задачи по нахождению центра вращающегося столика, а также регулирования расположения антенн в правильном положении, чтобы ось между антеннами проходила через центр вращающегося столика [5].

Сначала проводились калибровочные замеры с целью установления правильного расположения антенн и центра вращающего стола. Под правильным расположением антенн понимается прохождение оси между антеннами через центр вращающегося стола при перемещении по горизонтали принимающей антенны. В результате подбора правильного положения стойки и нахождения смещения максимума распределения поля при изменении горизонтального расстояния между антеннами было найдено такое положение антенн, при котором максимум распределения поля не смещался при изменении горизонтального расстояния между антеннами.

После установки правильного расположения антенн проводилось определение центра вращающегося стола. Калибровка проводилась следующим образом. В программе по управлению стендом задавалось значение угла вращения стола на 360 градусов. При обороте на 360 градусов на столике вычерчивался круг определенного радиуса. Таким способом было начерчено несколько окружностей разного диаметра, которые служили ориентиром нахождения центра стола. Затем проводилась проверка найденного центра с помощью измерений диаграмм рассеяния вперед. В центр стола ставился проводящий цилиндр. Принимающая антенна была зафиксирована на расстоянии 95 см от излучающей антенны и более не передвигалась. Измерялась диаграмма рассеяния вперед на проводящем цилиндре, поставленном в центре стола.

По теории при вращении цилиндра диаграмма рассеяния вперед не должна была изменяться, так как цилиндр – симметричный объект. Измеренная диаграмма рассеяния была прямой и подтвердила центральное расположение объекта на столе, так как изменение амплитуды напряженности поля у принимающей антенны составило 1% от амплитуды сигнала. В результате проведенных исследований было решено использовать динамический режим измерения, так как он вносит наименьшую погрешность и наиболее удобен в использовании.

Программа, обеспечивающая автоматизированное измерение распределения электромагнитного поля.

После загрузки программы появляется главное окно. Перед началом работы необходимо запустить программу, и нажать на кнопку «Установка нуля». При этом антенна будет установлена в крайнее левое нижнее положение, а столик будет повернут до предела по часовой стрелке. Установка нулевого положения может занять некоторое время. В нижней части экрана расположены элементы управления (рисунок 2). Управление антенной осуществляется с помощью четырех кнопок «Вверх», «Вниз», «Влево» и «Вправо». При нажатии на одну из кнопок, происходит перемещение антенны в соответствующем направлении на расстояние, указанное в поле «Сдвиг», в миллиметрах. Управление столиком производится с помощью двух кнопок «По часовой» и «Против часовой», на угол, указанный в поле «Угол».

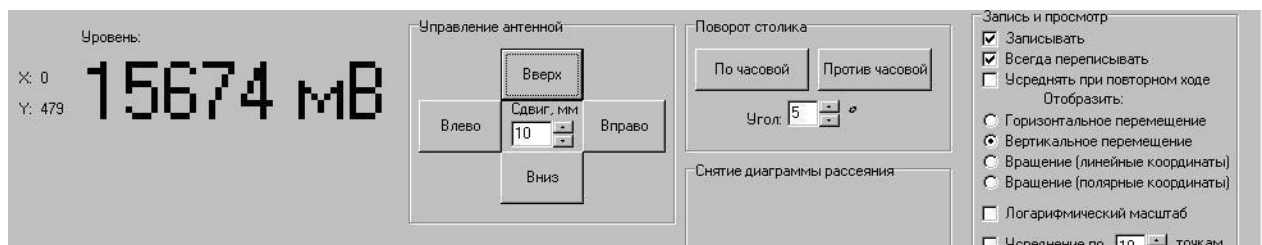


Рисунок 2. Интерфейс управления программой

Верхняя область экрана поделена таким образом, что слева находится рабочее окно, в котором расположен список измеренных точек. Под списком отображается последнее измеренное значение и текущие координаты. Основную правую часть окна занимает область построения графика зависимости напряжения на датчике от координаты.

Для снятия графика распределения электромагнитной энергии следует указать необходимое перемещение и нажать на кнопку, соответствующую выбранному направлению движения. Антенна начнёт перемещение, во время перемещения, текущее измеренное значение напряжения на датчике будет выводиться в левом нижнем углу

экрана. Там же будут отображаться текущие координаты. Каждое измеренное значение будет добавлено в список значений, с указанием координат. Для отключения записи значений в список (и в отчет при его сохранении) снимается галочка «Записывать» в разделе «Запись и просмотр». После окончания движения будет выведен график. Снятие зависимости потока электромагнитной энергии от вращения рассеивающего предмета производится аналогично.

Если произведено несколько измерений с перемещением по различным осям, то можно переключаться между графиками последних измерений по каждой оси с помощью переключателя «Отобразить». При отображении графика происходит его сглаживание (фильтрация высокочастотного шума). Количество соседних отсчетов, используемых при сглаживании, можно изменить в поле «Усреднение по ... точкам». Одновременно с видеоканала выводится изображение из видеокамеры с отображением происходящих перемещений. После завершения необходимых измерений можно сохранить в файл все записанные точки, для этого в меню «Файл» выбирается пункт «Сохранить данные».

2. Расчет безэховой камеры

Стенд располагался (для обеспечения коэффициента безэховости на уровне -22 дБ) в специально рассчитанной под него и созданной безэховой камере (рисунок 3), покрытой изнутри радиопоглощающим материалом (РПМ). Был проведен поверочный расчет профиля камеры в приближении геометрической оптики [7], в результате которого и определен коэффициент безэховости камеры. Размер безэховой зоны внутри камеры принят за 1 м. Профиль камеры выбран таким образом, чтобы луч после первого отражения не попадал в безэховую зону (БЗ), т.е. испытывал минимум два отражения. Камера с чисто прямоугольной конфигурацией не подошла бы, так как в такой камере в БЗ попадут лучи и после первого отражения. Поэтому, поверхность камеры подлежала профилированию.

Расчет безэховой камеры сводится к тому, чтобы проследить ход лучей от источника и определить какой из них попадает в БЗ. Отслеживаются лучи только после первого отражения. Рассмотрим ход лучей только в двух главных сечениях камеры (горизонтальном и вертикальном), так как в любом другом сечении, прежде чем попасть в БЗ луч минимум дважды отразится от поверхности.

Поверхность камеры в сечении XOY была разбита на участки (1-2; 2-3; 3-4; 4-5; 5-6; 6-7; 7-1). Отражение от участка 1-7 не рассматривалось, так как уровнем задних лепестков можно пренебречь. Участки 1-2 и 6-7 симметричны, относительно оси OX , поэтому достаточно рассмотреть один из них. Рассмотрим участок 1-2. Его поверхность

профилирована в виде эллипса (с фокусами f_1 и f_2), большая ось которого повернута от главной оси OX на некоторый угол. РПМ на этих участках должен иметь ярко-выраженную зеркальную компоненту. Положение передающей антенны (ее фазовый центр) совпадает с фокусом эллипса f_1 .

На рисунке 3 изображен профиль камеры в этих сечениях.

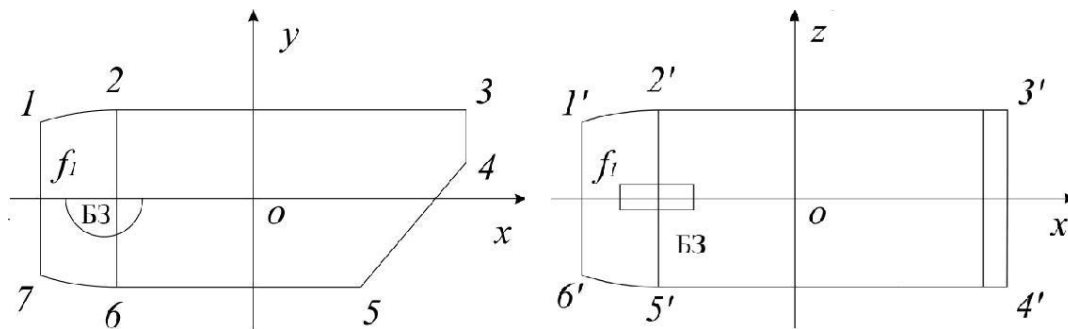


Рисунок 3. Профиль камеры в сечениях XOY и XOZ

Каждый луч, вышедший из f_1 отразившись от участка 1-2, пойдет в f'_2 (свойство эллипса). Зная координаты точки отражения на участке 1-2 и координаты f'_2 , можно найти уравнение прямой (отраженный луч), проходящий через эти две точки. А зная уравнение отраженного луча, можно определить, что он не пересекает БЗ (путем решения системы, состоящей из уравнения отраженного луча и уравнения окружности). Так как система совместных решений не имеет, то значит, отраженный луч с БЗ не пересекается.

Рассмотрим участок 2-3. Так как отражающая плоскость параллельна оси OX , то координата точки пересечения отраженного луча с осью OX будет симметрична f_1 , относительно координаты точки отражения на отражающей плоскости. Далее, решая систему, состоящую из уравнения отраженного луча и уравнения окружности (БЗ), определяем, пересекает ли отраженный луч БЗ. Так же, как и для участка 1-2, получаем, что знак дискриминанта < 0 , а, следовательно, отраженный луч не пересекает БЗ. Участок 5-6 симметричен участку 2-3 относительно оси OX , поэтому если отраженный луч от участка 2-3 не попадает в БЗ, то и от участка 5-6 он тоже не будет попадать в БЗ. Аналогичным образом рассматриваются участки 4-5 и 3-4 в сечении XOY .

Подобным образом исследуются участки и в сечении XOZ (рисунок 3, справа). Дополнительно определяются углы падения луча от источника к каждой из поверхностей в двух плоскостях (XOY и XOZ). Все расчеты были произведены по специальному разработанному алгоритму.

Анализ полученных результатов:

а) На участках 1-2 и 2-3 дискриминанты квадратных уравнений при решениях системы уравнений для всех точек участков 1-2 и 2-3 имеют отрицательные значения. Следовательно, системы уравнений совместных решений не имеют, а значит, отраженный луч после первого отражения не пересекает безэховую зону;

б) На участках 3-4 и 4-5, а также на участках $2'-3'$ и $1'-2'$, отраженный луч после первого отражения не пересекает безэховую зону;

в) При угле падения луча на РПМ до 55 градусов коэффициент отражения не превышает -22 дБ [8]. На участках 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, $1'-2'$, $2'-3'$ угол падения луча не превышает 55 градусов, следовательно, попадание луча в безэховую зону после двукратного отражения обеспечит заданную безэховость.

3. Исследования процессов дифракции

Моделирования рассматриваемых в работе процессов дифракции проводится с помощью программного алгоритма [9], базирующегося на решении соответствующих интегральных уравнений. В качестве программного обеспечения используется система Matlab, обеспечивающая широкие возможности по расчету больших алгебраических уравнений и вычислений, выполнению Фурье-преобразований и обеспечивающая простоту графического представления результатов совместно с хорошей производительностью.

Процессы дифракции [10, 11] исследуются в случае падения на цилиндр плоского монохроматического сигнала с частотой от 50 Гц до 50 ГГц. В интерфейсном окне (рисунок 4) путем выбора начальных параметров (справа) строится поперечное сечение цилиндра (слева вверху) и диаграмма рассеяния (слева внизу) [12]. Диаграмма рассеяния моделируется при разных углах падения, частотах падающей волны (принадлежащих указанному диапазону) и количестве точек коллокации. Выбор углов падения в интервале учитывает симметрию облучаемого тела. При моделировании цилиндра с сечением в виде многолистника задаются количество листов контура поперечного сечения (от двух до пяти) и некоторые дополнительные параметры, определяющие основной и вспомогательный контуры.

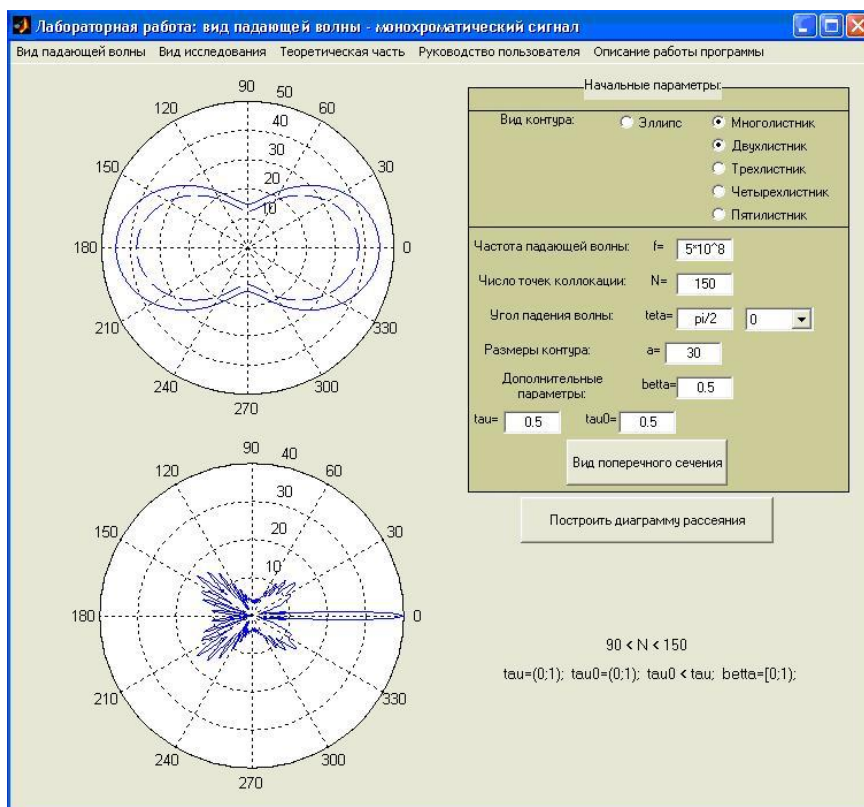


Рисунок 4. Вид главного окна программы с контуром в виде двухлистника

На рисунке 5 показаны диаграммы рассеяния на проводящем цилиндре с контуром поперечного сечения в виде двухлистника при угле падения $\theta = \pi/4$ на частотах f : 50 Гц, 5 МГц, 50 МГц, 100 МГц, 500 МГц и 800 МГц. При увеличении частоты диаграмма рассеяния становится более направленной. Расчёт проводился при числе точек коллокации $N = 150$ — синие кривые; на частоте $f = 800$ МГц при $N = 205$ можно еще наблюдать главный лепесток диаграммы рассеяния — красная кривая (тогда как при $N = 150$ он отсутствует).

Путем моделирования проведен ряд исследований диаграмм рассеяния проводящих цилиндров, которые использованы при сравнении с экспериментальными результатами. Измерение и исследование рассеяния вперед проводилось на круговых цилиндрах разного диаметра и с разным покрытием. Их целью был анализ зависимости величины рассеяния вперед (рисунок 6) от материала, из которого сделан объект, и от размера объекта (диаметра). Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы: с увеличением проводящих свойств материала цилиндра значение рассеянного поля по направлению к приемной антенне уменьшается (увеличивается рассеяние назад); с увеличением диаметра цилиндра значение рассеянного поля по направлению к приемной антенне падает, что связано с увеличением области тени. Полученные качественные выводы согласуются с теоретическими данными.

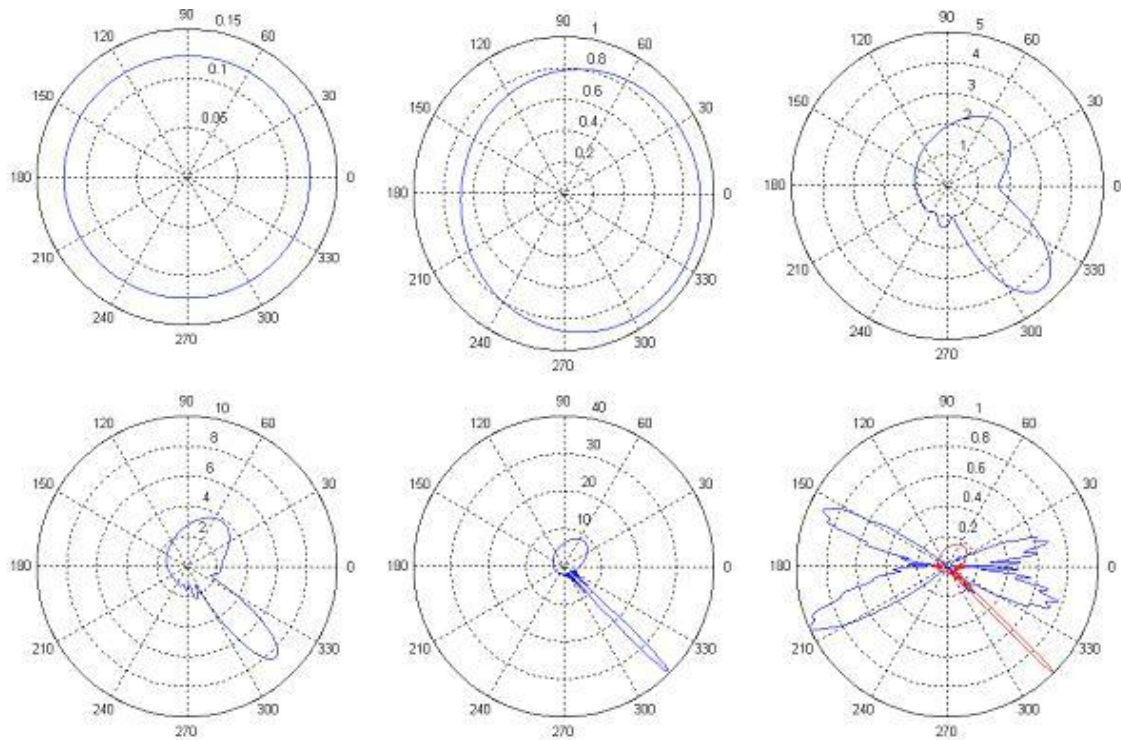


Рисунок 5. Изменение диаграмм рассеяния с увеличением частоты падающей волны

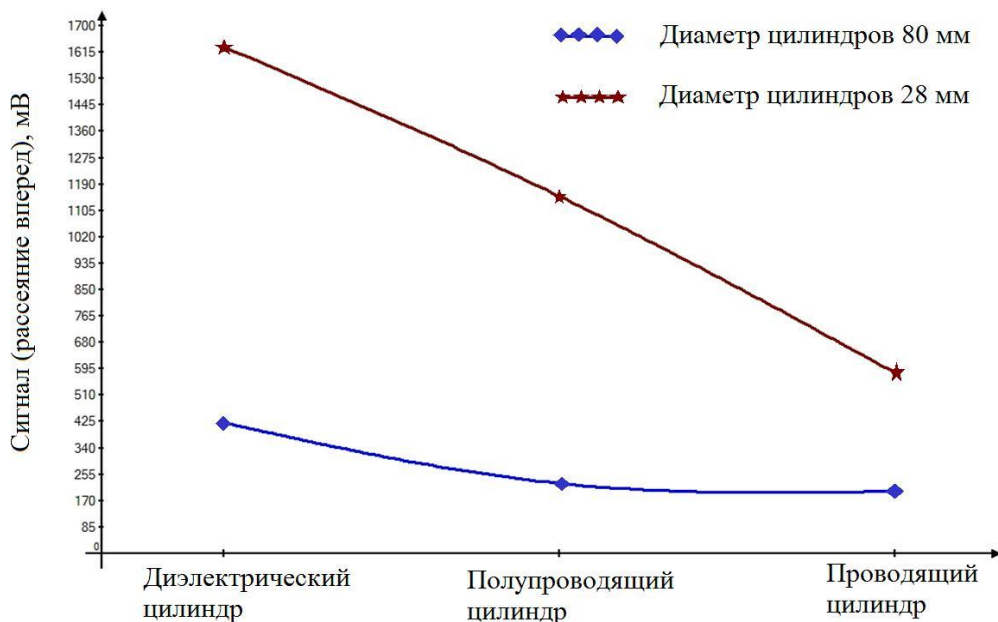


Рисунок 6. Зависимость значения рассеяния вперед от материала и размера объекта

Ниже исследуется рассеяние вперед от объектов с анизотропными свойствами прямоугольной формы. СВЧ излучение падает слева направо. Объект вращается по

часовой стрелке. На всех диаграммах исследуемых объектов внизу показан ход вращающегося объекта и отображена шкала углов поворота. Примеры диаграмм рассеяния на объектах прямоугольной формы с анизотропными свойствами для систем из 3-х и 5-ти проводящих пленок (фольги) и из 3-х и 5-ти поглощающих пленок (пропитанная сажей бумага) представлены на рисунке 7. Анализ полученных результатов показал, что максимум рассеяния вперед наблюдается при параллельной ориентации широкой стороны объекта по отношению к падающей волне, минимум распределения поля наблюдается при перпендикулярной ориентации широкой стороны объекта по отношению к падающей волне, разница в отношениях минимумов к максимумам уменьшается по мере уменьшения размеров объекта.

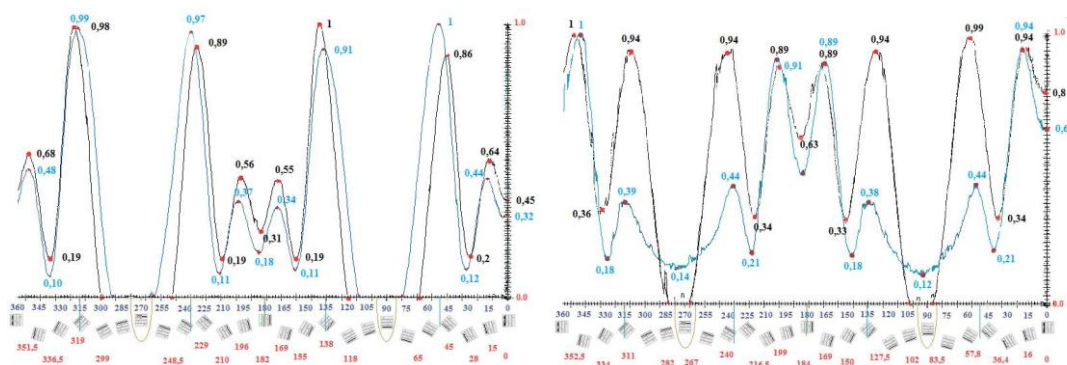


Рисунок 7. Диаграммы рассеяния систем из 3-х и 5-ти: проводящих (слева); поглощающих (справа) плёнок; черный график - 5 листов, синий график – 3 листа

На рисунке 8 сравниваются между собой диаграммы рассеяния от анизотропных объектов из проводящих и поглощающих пленок (соответственно 3-х и 5-ти). В начальном положении широкая сторона объекта перпендикулярно ориентирована по отношению к падающей волне. Приведенные диаграммы показывают, что нормированные диаграммы рассеяния вперед идентичны, характер расположения минимумов и максимумов у объектов с листами из проводящих и поглощающих пленок практически совпадают. Ширина лепестков максимумов шире у системы из 3-х листов, развал диаграммы рассеяния вперед происходит, когда система пленок ориентирована перпендикулярно направлению падения волны, минимум рассеяния вперед наблюдается при параллельной ориентации системы пленок по отношению к падающей волне. Основные минимумы значительно меньше у объектов с поглощающими пленками. Среднее максимальное рассеяние вперед больше у объекта из поглотителя, так как падающее на него излучение не отражается назад, а проходит вперед, лишь не полностью поглощаясь им. Ширина диаграммы рассеяния на объекте из проводника несколько шире, чем на объекте из поглотителя.

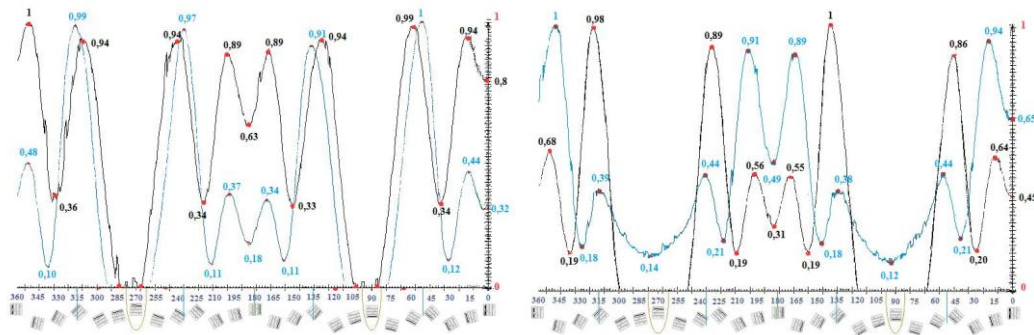


Рисунок 8. Диаграммы рассеяния систем из: 3-х (слева) и 5-ти (справа) плёнок; синий график - из проводящих листов, черный график – из поглощающих листов

Обобщая выводы по диаграммам рассеяния вперед от объектов с поперечным сечением в виде многолистника, выделим основные закономерности: число максимумов на диаграмме рассеяния зависит от числа лепестков в многолистнике. При четном количестве лепестков в многолистнике, максимум рассеяния вперед наблюдается при падении волны на объект со стороны узкой его части, а минимум рассеяния вперед наблюдается при падении волны на объект со стороны его широкой части. При нечетном количестве лепестков наблюдается обратная закономерность: максимум наблюдается при падении волны на широкую часть объекта, а минимум при падении волны на узкую часть.

Проведенный сравнительный анализ исследования диаграмм рассеяния многолистника с поперечным сечением в виде пятилистника (рисунок 9), полученных экспериментальным путем (сплошные кривые) и путем моделирования (точками показаны результаты моделирования) показал их идентичность.

В случае моделирования использована методика пересчета получаемых диаграмм рассеяния при различных углах падения на объект, когда вычислялось значение рассеянного вперед поля. Для остальных объектов с поперечным сечением в форме многолистника результаты сравнения аналогичны. На основе этого можно сделать вывод, что автоматизированный стенд дает достаточно достоверные результаты и пригоден для нахождения диаграмм рассеяния и ЭПР от объектов сложной формы, если ввести в действие предусмотренную на стенде функцию поворота приемной антенны.

Таким образом, проведено экспериментальное исследование волновых полей при процессах дифракции на различных телах простой формы (цилиндрах с поперечным сечением в форме прямоугольника, круга и многолистника) на основе диэлектрических, полупроводящих и проводящих материалов и материалов с анизотропными свойствами.

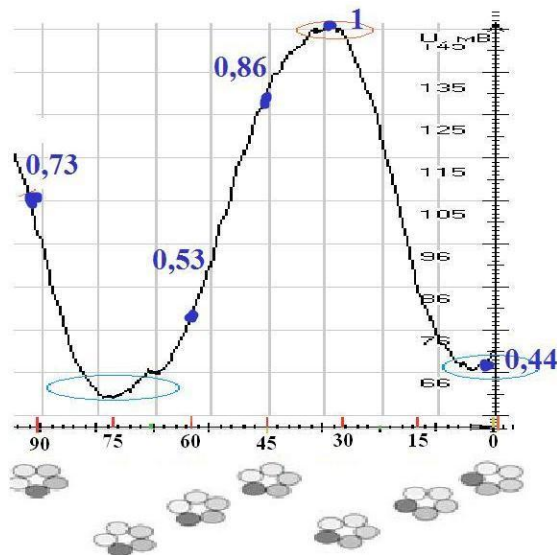


Рисунок 9. Экспериментальная диаграмма рассеяния пятилистника (точками нанесены численные результаты)

Осуществлено сравнение полученных результатов измерений с результатами, полученными компьютерным моделированием на основе программы в среде MATLAB, что обеспечило теоретическое подтверждение экспериментальных результатов. Получен ряд оригинальных выводов для исследуемых объектов.

Список литературы

1. Алексеев А.Г., Штагер Е.А., Козырев С.В. Физические основы технологии STEALTH. СПб.: ВВМ - 2007. – 284с.
2. Будагян И.Ф., Щучкин Г.Г., Крючков Д.И. Мультимедийный программно-методический комплекс «Исследование волновых процессов при распространении и дифракции радиоволн» // Антенны – 2009 - вып.6 (145).– С.65-73.
3. Будагян И.Ф., Дубровин В.Ф., Сигов А.С. Электродинамика. Современные технологии: Учебное пособие. – М.: Альфа М: ИнфраМ -2013. -304с.
4. Будагян И.Ф., Шишканов А.В. Щучкин Г.Г. Исследование электродинамики полей при процессах дифракции на телах различной формы // Т-Comm – 2012 - №10.- С.34-38.
5. Будагян И.Ф., Шишканов А.В. Модернизация автоматизированного стенда по исследованию волновых процессов // 59-ая НТК МИРЭА. Сборник трудов.— М.: МИРЭА - 2010 - Ч.3. — С. 49-54.
6. Будагян И.Ф., Дубровин В.Ф. Техническая электродинамика. Ч.2. Устройства СВЧ и антенны: Учебное пособие. - М.: МИРЭА - 2009. – 200с.

7. Мицмахер М.Ю., Торгованов В.А. Безэховые камеры СВЧ. – М.: Радио и связь - 1982. - 182с.
8. <http://www.master-tool.ru/images/asset/absorber.pdf> (дата обращения: 05.03.2003).
9. Кюркчан А. Г., Суков А.И. Метод вспомогательных сплайн-токов в задачах дифракции волн // Доклады академии наук. — 2000 - Т. 372, №4. — С. 480-483.
10. Уфимцев П.Я. Основы физической теории дифракции. – Издательство: БИНОМ. Лаборатория знаний - 2009. -351с.
11. Обуховец В.А. Излучение и рассеяние электромагнитных волн. — М.: Радиотехника - 2005. — 80с.
12. Будагян И.Ф., Щучкин Г.Г., Ганжела К.А., Крючков Д.И., Сергеев А.Д., Белов М.С. Мультимедийный программно-методический комплекс "Исследование волновых процессов при распространении и дифракции радиоволн". Свидетельство об отраслевой регистрации разработки в фонде алгоритмов и программ № 9770 от 17.01.2008. Государственная регистрация разработки в "Национальном информационном фонде неопубликованных документов" № 50200800187 от 29.01.2008.