
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 537.87:621.385.69

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Балан Данил Дмитриевич, студент, направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: balan-danil-10@mail.ru

Кулемин Иван Владимирович, студент, направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: i_kulemin@inbox.ru

Научные руководители: **Кучеренко Марина Анатольевна**, кандидат педагогических наук, доцент кафедры физики и методики преподавания физики, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: kumarin1961@yandex.ru

Алимбеков Ильдар Ринатович, преподаватель кафедры физики и методики преподавания физики, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: alimbekov2010@mail.ru

***Аннотация.** В статье исследованы особенности распространения сантиметровых электромагнитных волн, излучаемых системой полуволновой вибратор-рупорной антенны. Построена диаграмма направленности для исследуемой рупорной антенны. Получены графики интенсивности сигнала при отражении, поляризации и преломлении электромагнитных волн. Для получения экспериментальных результатов использовался лабораторный комплекс «Microwave set 9.4 GHz», приобретенный для Университетской физико-математической школы в рамках программы развития Оренбургского государственного университета «Приоритет2030». Результаты работы могут быть использованы для написания методических указаний к лабораторной работе по теме «Исследование волновой оптики с помощью волн СВЧ-диапазона».*

***Ключевые слова:** микроволновое излучение, свойства микроволнового излучения, отражение микроволн, преломление микроволн, поляризация микроволн, закон Малюса.*

***Для цитирования:** Балан Д. Д., Кулемин И. В. Экспериментальное исследование свойств микроволнового излучения // Шаг в науку. – 2023. – № 1. – С. 11–16.*

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROPERTIES OF MICROWAVE RADIATION

Balan Danil Dmitrievich, student, training program 13.03.02 Electric Power Engineering and Electrical Engineering, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: balan-danil-10@mail.ru

Kulemin Ivan Vladimirovich, student, training program 13.03.02 Electric Power Engineering and Electrical Engineering, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: i_kulemin@inbox.ru

Research advisors: **Kucherenko Marina Anatolievna**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics and Methods of Teaching Physics, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: kumarin1961@yandex.ru

Alimbekov Ildar Rinatovich, Assistant of the Department of Biophysics and Condensed Matter Physics, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: alimbekov2010@mail.ru

Abstract. *The article investigates the features of the propagation of centimeter electromagnetic waves emitted by a half-wave vibrator-horn antenna system. The directivity diagram for the investigated horn antenna is constructed. Graphs of signal intensity during reflection, polarization and refraction of electromagnetic waves are obtained. To obtain experimental results, we used the laboratory complex "Microwave set 9.4 GHz", purchased for the University School of Physics and Mathematics as part of the development program of the Orenburg State University "Priority 2030". The results of the work can be used to write guidelines for laboratory work on the topic "Investigation of wave optics using microwave waves".*

Key words: *Microwave radiation, properties of microwave radiation, reflection of microwaves, refraction of microwaves, polarization of microwaves, Malus' law.*

Cite as: Balan, D. D., Kulemin, I. V. (2023) [Experimental study of the properties of microwave radiation]. *Shag v nauku* [Step into science]. Vol. 1, pp. 11–16.

Электромагнитное поле – особый вид материи, имеющий, как известно, двойственную природу (волновую и корпускулярную) [3]. Основные физические параметры, по которым производится разделение ЭМИ, – это длина волны. СВЧ-излучение, или микроволны, – это поддиапазон ЭМИ, занимающий промежуточное положение между ультракороткими волнами и излучением инфракрасного диапазона. Явления, основанные на волновых свойствах СВЧ излучения: отражение, преломление, дифракция, интерференция [4].

СВЧ-излучение характеризуется частотой колебаний от 300 МГц до 300 ГГц или в длинах волн – от 1 м до 1 мм [1].

Сантиметровые волны, подобно дециметровым и метровым радиоволнам, практически не поглощаются атмосферой и поэтому широко используются в спутниковой и сотовой связи и других телекоммуникационных системах.

Вокруг любого источника электромагнитных волн формируется электромагнитное поле, состоящее из переменных электрического и магнитного полей. Различают три зоны такого поля:

- 1-я – зона несформировавшейся волны (поле индукции или поле стоячей волны);
- 2-я – зона промежуточная (зона интерференции);
- 3-я – зона сформировавшейся волны (поле излучения или поле бегущей волны) [2].

Излучение сантиметрового диапазона активно применяется в медицине [5, 6] для транспортировки лекарств с использованием наночастиц, создания перспективных носимых устройств для визуализации органов человека.

Терапия, основанная на микроволнах, обладает следующим спектром воздействия на организм человека: ускоряет обменные процессы в тканях, влияет на вязкость жидкостей, оказывает обезболивающий эффект на мышцы.

Также данный вид волн используется для обработки разного рода материалов: керамика, золото,

термопласт. Промышленное применение микроволнового нагрева в пищевой отрасли было освоено в 1960-х гг. Микроволновая обработка позволила значительно улучшить технологические процессы производства пищевых продуктов. СВЧ волны нашли активное применение в носимых устройствах связи, таких как мобильные телефоны, Wi-Fi, Bluetooth.

Объектом исследования являлось микроволновое излучение на частоте 9.4 ГГц, что соответствует длине волны $\lambda = 3.19$ см. Целью исследования являлось практическое изучение свойств распространения микроволнового излучения и экспериментальное подтверждение законов волновой оптики, которые верны и для электромагнитных волн СВЧ диапазона, а также важной целью данной работы являлась отработка методики проведения экспериментов на данной лабораторной установке.

В ходе работы после ознакомления с общими теоретическими данными о свойствах и распространении электромагнитных волн в разных средах, мы провели серию простых, но наглядных экспериментов по изучению распространения электромагнитных волн, а именно: исследовали зависимость амплитуды сигнала от расстояния между источником и приёмником, сняли диаграмму направленности рупорной антенны, проверили защитные свойства экранов из различных материалов, отражение от металлической пластины, преломление парафиновой призмой, поляризацию электромагнитных волн металлической решёткой.

Исследование проведено на базе лаборатории физического практикума Университетской физико-математической школы Оренбургского государственного университета.

В нашей работе изучение СВЧ-излучения проводилось с использованием лабораторной установки «Исследование волновой оптики с помощью волн СВЧ-диапазона», которая была приобретена в рамках программы «ПРИОРИТЕТ 2030».

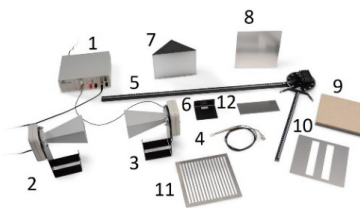


Рисунок 1. Лабораторная установка «Исследование волновой оптики с помощью волн СВЧ-диапазона»
 Источник: взято из ФИЗИКА / 3BScientific.com – URL: https://3bstatic.blob.core.windows.net/catalog/3B-Scientific-Physics_RU.pdf (дата обращения: 05.05.2022)

Установка состоит из блока управления (1), рупорного приёмника (2) и рупорного источника СВЧ – волн (3), точечного приемника (4), рельсы с механизмом поворота и градусной шкалой (5), столика (6), парафиновой призмы (7), металлической (8) и деревянной (9) пластин, двушелевой пластины (10), поляризационной решётки (11), малой металлической пластины (12).

В данной работе используются рупорные антенны пирамидальной формы со следующими параметрами:

длина рупора 124 см, ширина 75 см, высота 54 см.

Коэффициент направленного действия или усиление рупорной антенны, по определению, показывает отношение плотности потока мощности излучения рупорной антенны в заданном направлении к плотности мощности потока излучения, создаваемого ненаправленным источником.

Усиление антенны $D = 2997.98$, вычисляемое по формуле:

$$D = 4\pi \frac{S}{\lambda^2} \nu, \quad (1)$$

где

- $S = 4050 \text{ см}^2$ – площадь раскрыва рупора,
- $\nu = 0.6$ – коэффициент использования поверхности рупора,
- $\lambda = 3.19 \text{ см}$ – длина волны излучаемой антенной.

Для того, чтобы изучить зависимость излучения от расстояния до источника, была собрана установка из таких элементов, как источник и приемник

СВЧ-излучения. Приемник соединен с вольтметром. Интенсивность оценивалась по показаниям вольтметра.

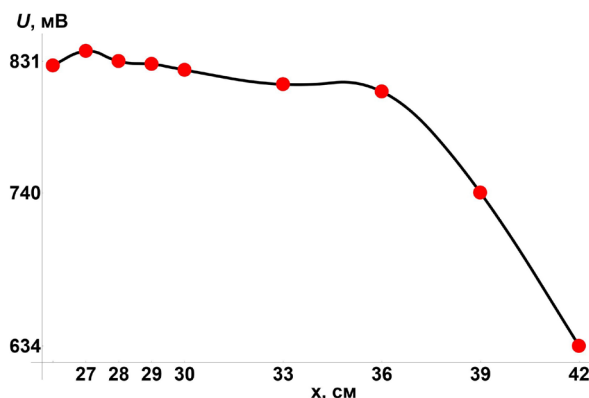


Рисунок 2. Зависимость напряжения на приёмнике от расстояния до источника СВЧ - волн

Примечание: красные точки – экспериментальные данные.

Источник: разработано авторами

Было проведено три измерения и вычислили среднее значение, затем построили график, представленный на рисунке 2. Процесс проведения эксперимента состоял из перемещения приёмника

излучения относительно фиксированного излучателя сигнала вдоль прямой с шагом 1 сантиметр. С увеличением расстояния интенсивность должна падать, что и происходит на графике. В ближней

зоне излучаемого поля, на расстоянии от 26 до 28 сантиметров между источником и приёмником, наблюдается небольшой скачок показаний вольтметра, который можно объяснить тем, что рупоры передатчика и приёмника выполняют роль

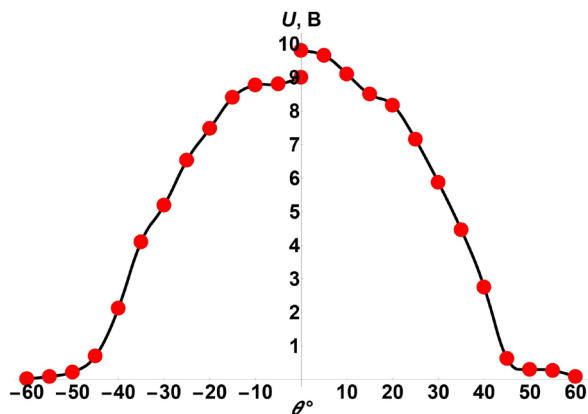


Рисунок 3. Диаграмма направленности рупорной антенны

Источник: разработано авторами

Далее была снята диаграмма направленности антенны. Для этого была собрана аналогичная установка. Проведена серия из 3 измерений при одинаковых условиях, с шагом 5° . Приёмник сигнала перемещался относительно фиксированного передатчика от положения с максимальным значением сигнала до положения, когда сигнал отсутствовал, при этом фиксировалась градусная мера угла между приёмником и передатчиком. Затем эксперимент повторялся для второй ветки кривой. Из-за проведения двух независимых измерений для двух веток кривой можно наблюдать скачок амплитуды сигнала. Из рисунка 3 видно, что кривая, построенная по красным экспериментальным точкам, имеет колоколообразную форму и симметрична относительно оси ординат, на которой откладываются значения амплитуды напряжения на приёмнике. Максимальное значение напряжения достигается при 0° , а минимальное значение – при 60° . Картина зависимости амплитуды напряжения от угла поворота антенны-передатчика имеет вид, аналогичный представленным в литературе экспериментальным данным [7], как видно из рисунка 4.

Далее было проведено исследование защитных свойств экранов из металла, дерева и оргстекла. В данном опыте использовались источник и приёмник в виде антенны-рупора, а также пластины и решётки из различных материалов. Расстояние от источника до приемника составляло 65 см, напряжение на приёмнике без препятствия равнялось 1.5 В. Данный опыт состоял в помещении между передатчиком и приемником пластин из

резонатора и появляется стоячая волна. Затем, при отдалении антенн друг от друга, сигнал плавно снижается, достигая минимального значения на расстоянии 42 сантиметра между антеннами.

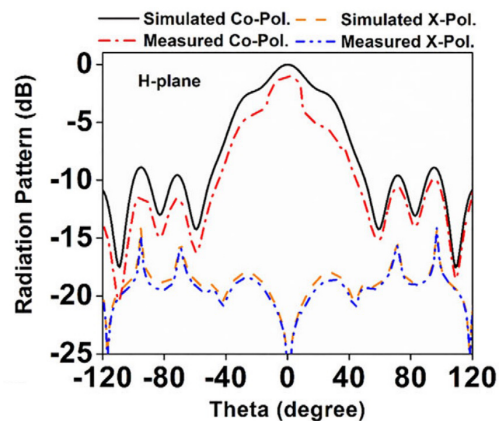


Рисунок 4. Диаграмма направленности рупорной антенны

Источник: заимствовано из [7]

различных материалов, а именно дерева, оргстекла, картона, металла и измерениями проходящего сигнала. В ходе данного эксперимента были получены следующие данные: амплитудное значение напряжения для картона, дерева и органического стекла было около 1 В, а для металлической пластины было равно 0 В из-за отражающих свойств металла для данного вида волн. Как показали измерения, наилучшими защитными свойствами обладает металлическая пластина. Это объясняется хорошей отражательной способностью металла в сантиметровом диапазоне волн и экранирующими свойствами решетки.

Следующий эксперимент состоял в изучении отражательных свойств металлической пластины. В данном опыте использовались приёмник и источник в виде антенны-рупора, а также штатив, на котором держалась металлическая пластина. Расстояние до пластины равнялось 10 сантиметрам. Пластина была закреплена во фронтальной плоскости относительно источника и приёмника, располагавшихся на одной прямой в начальный момент времени. Далее мы фиксировали положение источника и с шагом 5° перемещали приёмник по дуге относительно пластины, фиксируя градусную меру угла на проградуированном круге. На рисунке 5 видно, что максимальное значение напряжения 1 В достигается при 0° , а минимальное при 55° . Представленную кривую можно объяснить тем, что рупорная антенна даёт широкий фронт волны, поэтому после минимума кривая снова начинает возрастать.

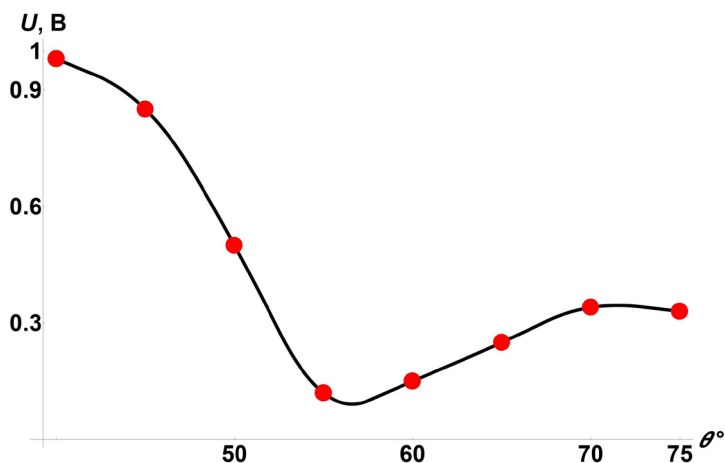


Рисунок 5. Изучение направленности СВЧ-излучения с помощью отражающей пластины
 Примечание: красные точки – экспериментальные данные.
 Источник: разработано авторами

Далее было изучено преломление микроволн парафиновой призмой. Установка состояла из точечного приёмника и источника в виде антенны-рупора, а также штатива, на котором стояла парафиновая призма. Источник и приёмник были установлены напротив друг друга и между ними помещена

парафиновая призма. Приёмник перемещался относительно источника с аналогичным шагом в 5° при неподвижной призме. Из рисунка 6 видно, что при повороте в $15^\circ, 25^\circ, 95^\circ$ относительно источника мы получаем практически нулевое напряжение, это говорит о наличии некоторых критических углов.

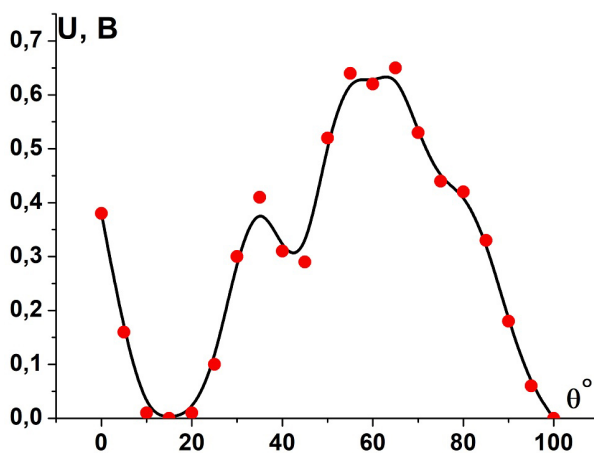


Рисунок 6. Исследование преломления СВЧ-излучения с помощью парафиновой призмы
 Источник: разработано авторами

Было проведено исследование поляризации СВЧ-излучения с помощью поляризационной решётки. Была собрана установка, в составе которой были: точечный приёмник и источник с рупорной антенной, штатив, на котором фиксировалась металлическая поляризационная решётка. Источник, поляризационная решётка и приёмник располагались на одной прямой. Эксперимент состоял в повороте поляризационной решётки в вертикальной плоскости таким образом, чтобы значение напряжения на приёмнике изменялось от максимального к минимальному.

График, представленный на рисунке 7, демон-

стрирует, что при нуле градусов поле, создаваемое микроволновым источником, возбуждает в решётке индукционные токи величиной недостаточной для гашения прошедшей волны, следовательно, излучение проходит через решётку. Если повернуть решётку на 90° градусов, так чтобы щели были вертикально расположены к осям источника и приёмника, то в решётке возникают индукционные токи, вторичное излучение которых эффективно гасит первичную электромагнитную волну. Из эксперимента можно сделать вывод о поляризации волн и расположении силовых линий электрического

поля источника в вертикальной плоскости, что подтверждается вертикальным расположением антенны в установке. Силовые линии магнитного поля, следовательно, расположены в горизонтальной

плоскости. Данные эксперимента хорошо согласуются с теоретической кривой, полученной на основе закона Малюса, математическое представление которого даётся формулой, представленной ниже:

$$I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta, \quad (2)$$

где

I_0 – максимальное амплитудное значение напряжения на приёмнике;

θ – угол поворота поляризационной решётки;

$I(\theta)$ – искомое значение напряжения на приёмнике при определённом угле поворота решётки.

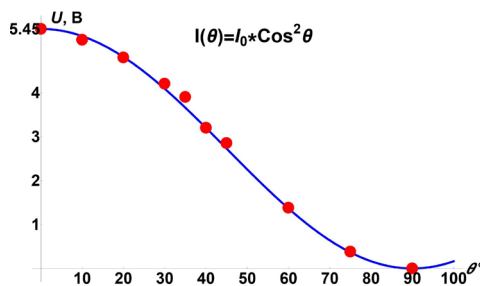


Рисунок 7. Экспериментальная проверка закона Малюса

Примечание: красные точки – экспериментальные данные, синяя кривая – расчёт по формуле для закона Малюса.

Источник: разработано авторами

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы: распространение микроволн подчиняется законам волновой оптики, наилучшими защитными свойствами обладает металлическая пластина. Полученная диаграмма направленности имеет ярко выраженный центральный лепесток, что говорит о сферической форме излучаемых антенной волн. При исследовании преломления микроволн парафиновой призмой было обнаружено, что при некоторых углах поворота, напряжение на приёмнике равно нулю. Это можно объяснить тем, что волны не только

преломляются, но и отражаются призмой. Об этом говорит закон Снеллиуса. Проверка закона Малюса для поляризации волн показала отличную сходимость с теоретическими расчётами. Была разработана методика проведения экспериментов по изучению волновых свойств электромагнитного излучения. Подготовлены рабочие материалы для разработки методических указаний «Исследование волновой оптики с помощью волн СВЧ-диапазона» для студентов инженерных направлений подготовки и учащихся Университетской физико-математической школы.

Литература

1. Байер В. Н., Катков В. М., Фадин В. С. Излучение релятивистских электронов – М.: Атомиздат, 2009. – 699 с.
2. Иоффе А. Ф. Избранные труды: в 2 т. / ред. коллегия: акад. С. Н. Журков [и др.]. – Л.: Наука, 1976. – Т. 2. Излучение, электроны, полупроводники. – 1975. – 469 с
3. Крауфорд Ф. М. Волны. – М.: Наука, 1974. – 527 с.
4. Лекционные демонстрации по физике / М. А. Грабовский [и др.]. – М.: Наука, 1965. – 572 с.
5. Lin X., et al. (2020) Ultrawideband Textile Antenna for Wearable Microwave Medical Imaging Applications. Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 68. – № 6, – pp. 4238–4249, <https://doi.org/10.1109/tap.2020.2970072>.
6. Xu J., et al. (2019) Microwave Responsive Nanoplatfrom via P Selectin Mediated Drug Delivery for Treatment of Hepatocellular Carcinoma with Distant Metastasis. Nano Letters. Vol. 19. – № 5, – pp. 2914–2927, <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b05202>
7. Yadav S. V., Chittora A. (2020) A compact ultra-wideband transverse electromagnetic mode horn antenna for high power microwave. Microwave and Optical Technology Letters. Vol. 63. – № 1, – pp. 64–70, <https://doi.org/10.1002/mop.32570>

Статья поступила в редакцию: 30.05.2022; принята в печать: 03.03.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.