

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

---

Кафедра «Радиосистемы»

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**  
( Часть2 Распространение радиоволн)

Методические указания по лабораторным работам для студентов  
специальности 210302.65- «Радиотехника»

В.Новгород 2011

УДК.621.371 (075)

Электродинамика и распространение радиоволн. Часть 2–Распространение радиоволн. Методические указания, дополненное издание. Сост. Петров Е.В. НовГУ, В. Новгород, 2011.

Методические указания содержат 3 лабораторных работ по курсу «Электродинамика и распространение радиоволн» и предназначены для студентов специальности 210302.65 «Радиотехника»

## ВВЕДЕНИЕ

Передача информации на расстояние является важнейшей задачей радиотехники. Растущий объем информации требует увеличения числа информационных каналов, среди которых значительная доля приходится на радиолинии.

В данном учебном пособии сделана попытка осветить основные вопросы, возникающие при проектировании радиолиний в природных условиях: определение области пространства и области отражающей поверхности, определяющих напряженность поля электромагнитной волны в точке приёма; влияние препятствий на распространение радиоволн; определение полей дифракции на проводящих телах простейшей формы.

Описание каждой лабораторной работы построено по одинаковой схеме: определяется цель работы, даются краткие теоретические сведения, описывается методика экспериментального исследования, формулируется задание и порядок выполнения работы, требования к оформлению отчета, контрольные вопросы.

Основной целью лабораторных работ является закрепление теоретических сведений по особенностям распространения радиоволн в природных условиях, получаемых студентами специальности «Радиотехника» в лекционном курсе «Электродинамика и распространение радиоволн», а также приобретение ими навыков работы с измерительными приборами СВЧ диапазона.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВА, СУЩЕСТВЕННОЙ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ И ОТРАЖЕНИИ РАДИОВОЛН

Цель работы: Исследование области пространства существенной (доминантной) при распространении радиоволн в свободном пространстве и отражении от плоской проводящей поверхности.

#### Общие положения

Доминантной при распространении радиоволн областью пространства называют область в которой распространяется основная часть передаваемой мощности. Эта область может быть определена исходя из принципа Гюйгенса-Френеля.

Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка фронта распространяющейся волны является источником новой вторичной сферической волны. Полное поле определяется путем суммирования элементарных полей вторичных источников, непрерывно распределенных по замкнутой поверхности, охватывающей первичные источники.

Наглядно истолковать принцип Гюйгенса позволяет графическое построение, предложенное Френелем. Пусть в точке А (Рис. 1) находится передающая а в точке В — приемная антенна, причем выполняются условия:

$$\frac{2\pi}{\lambda} r_0' \gg 1 \quad \text{и} \quad \frac{2\pi}{\lambda} r_0'' \gg 1 \quad (1)$$

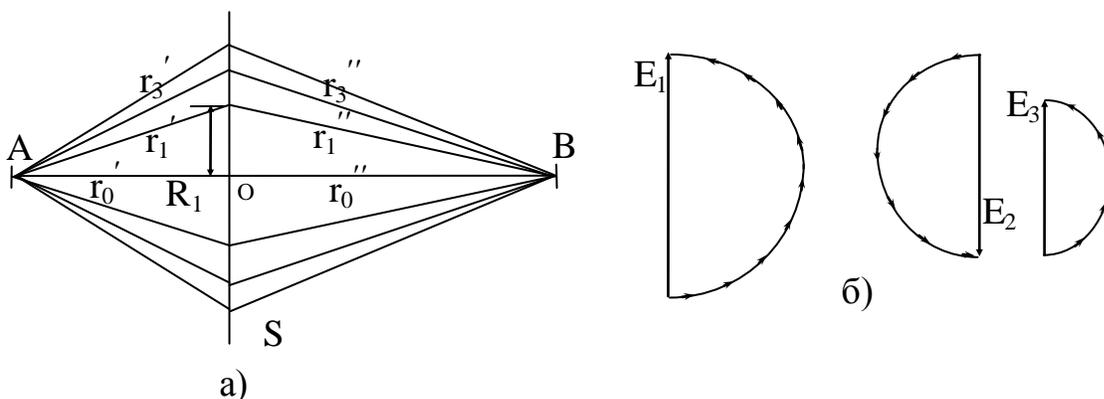


Рис.1 Пояснение понятия зон Френеля

- а) — построение зон Френеля на плоскости;
- б) — суммирование векторов напряженностей поля вторичных источников в пределах первой, второй и третьей зон Френеля.

Бесконечная плоскость S перпендикулярная линии АВ выбрана в качестве поверхности на которой рассматриваются вторичные элементарные источники. Границы зон Френеля на этой поверхности представляют собой концентрические окружности и определяются из условия, что путь, проходимый волной от точки А до границы зоны Френеля номера n и до точки В, меньше пути от точки А до границы зоны Френеля номера (n+1) и до точки В на половину длины волны. В обозначениях рис. 1а это условие записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} (r_1' + r_1'') - (r_0' + r_0'') &= \lambda / 2 \\ (r_2' + r_2'') - (r_0' + r_0'') &= 2\lambda / 2 \\ \text{-----} & \end{aligned} \tag{2}$$

$$(r_1' + r_n'') - (r_0' + r_0'') = \lambda / 2,$$

где n — номер зоны Френеля

Из построения Френеля (Рис. 1а) с учетом (1) можно определить внешние радиусы зон Френеля номера n на поверхности S [1]:

$$R_n = \sqrt{\frac{r_0' r_0'' n \lambda}{r_0' + r_0''}} \tag{3}$$

Площади всех зон Френеля одинаковы и равны:

$$S_\phi = \frac{r_0' r_0'' \pi \lambda}{r_0' + r_0''} \tag{4}$$

При фиксированном расстоянии АВ границы зон Френеля зависят от положения плоскости S, то есть от отношения  $r_0' / r_0''$ . Из (8) следует, что в плоскости распространения волны граница каждой из зон Френеля описывается уравнением эллипса с фокусами в точках А и В

$$r_n' + r_n'' = AB + n\lambda / 2 = \text{const} \tag{5}$$

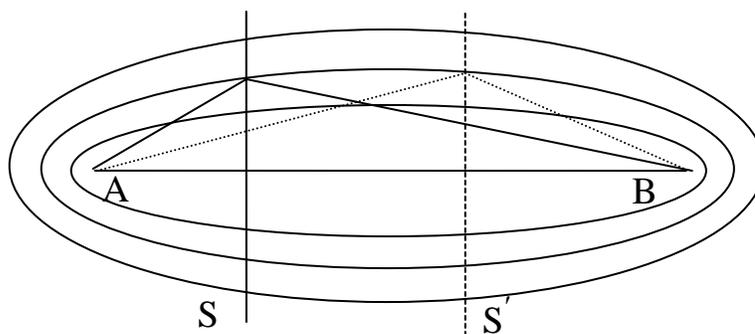


Рис. 2 Пространственные зоны Френеля

В пространстве первая зона Френеля представляет собой эллипсоид вращения, а последующие — пространства между двумя эллипсоидами вращения.

Напряженность поля, создаваемая передающей антенной в точке приема может быть определена геометрическим суммированием полей вторичных источников, принадлежащих разным зонам Френеля (Рис. 1б). Векторы результирующих напряженностей поля создаваемые соседними зонами Френеля направлены в противоположные стороны, причем амплитуды их убывают с увеличением номера зоны. Напряженность поля, создаваемого всеми зонами Френеля представляется в виде знакопеременного сходящегося ряда:

$$E_m = E_{m1} - E_{m2} + E_{m3} - E_{m4} + \dots \quad (6)$$

Дискретное суммирование напряженностей поля создаваемых отдельными зонами Френеля представлено на рис. 3:

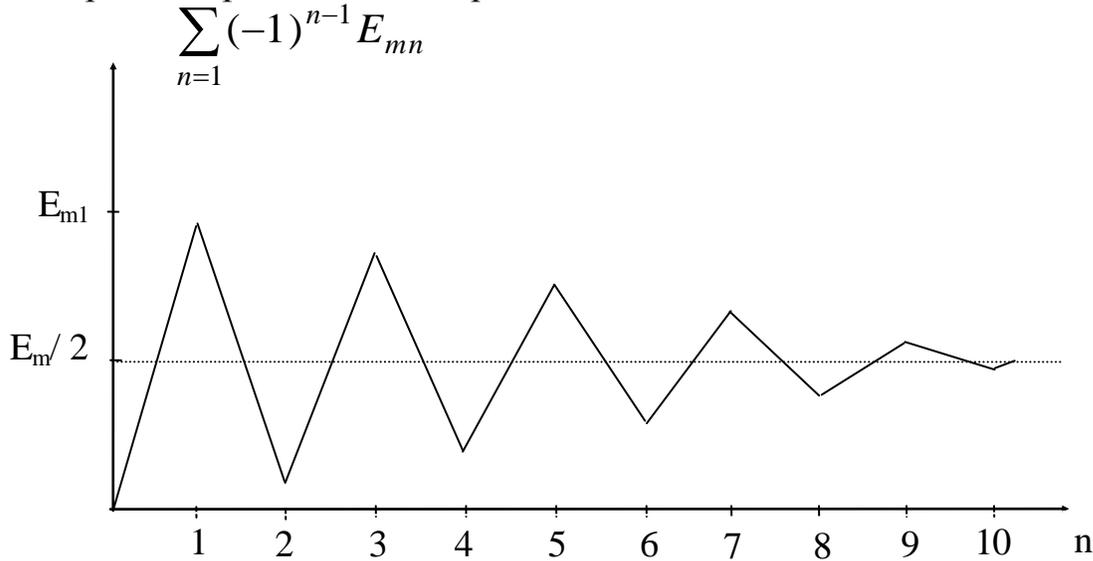


Рис. 3 К вычислению суммы ряда (6)

Если выполняется условие (1), каждый член ряда (6) мало отличается от среднего арифметического из соседних членов, откуда:

$$E_m = \frac{E_{m1}}{2} + \left(\frac{E_{m1}}{2} - E_{m2} + \frac{E_{m3}}{2}\right) + \left(\frac{E_{m3}}{2} - E_{m4} + \frac{E_{m5}}{2}\right) + \dots,$$

а поскольку  $\lim_{n \rightarrow \infty} E_{mn} = 0$ , то  $E_m \approx E_{m1} / 2$  (7)

Результирующая напряженность поля равна половине значения, создаваемого первой зоной Френеля.

Анализ Рис. 3 показывает, что основной вклад в результирующее поле дают вторичные источники, расположенные на площади, занятой  $\sim(8\div 12)$  первыми зонами Френеля, а область пространства, ограниченная этими зонами и является существенной при распространении радиоволн в свободном пространстве.

Экспериментально определить область существенную при распространении радиоволн можно с помощью непрозрачного экрана с круглым отверстием, центр которого совпадает с линией АВ (Рис. 4)

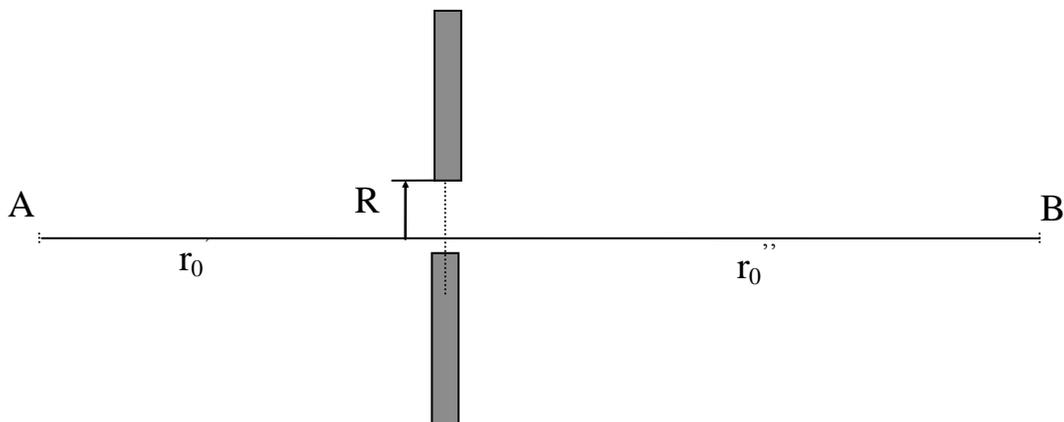


Рис. 4 Схема расположения экрана.

Если при фиксированном положении экрана плавно увеличивать радиус отверстия от  $R = 0$ , то в зависимости от того, сколько зон Френеля помещается в плоскости отверстия мы получим осциллирующий характер величины напряженности поля в точке приема (Рис. 5)

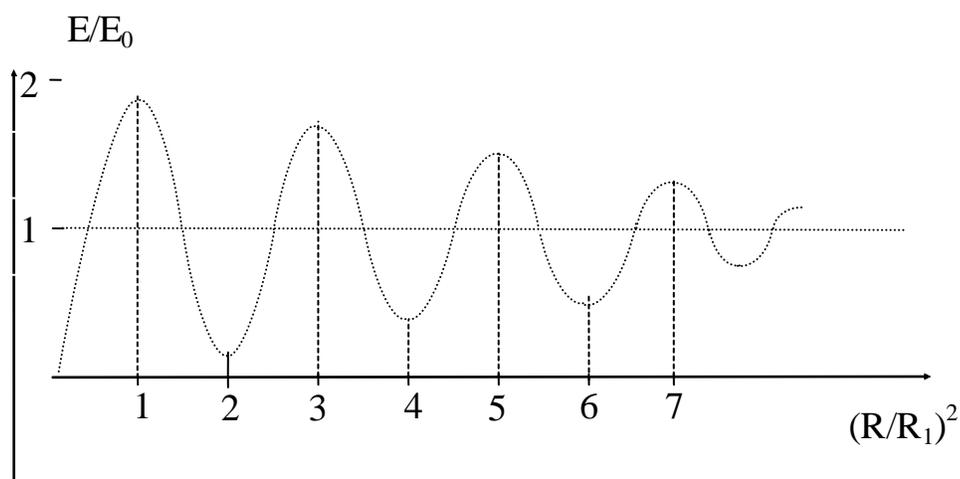


Рис. 5 Изменение напряженности поля в точке приема от радиуса отверстия в экране.

На Рис. 5:  $E_0$  — напряженность поля в отсутствии экрана;

$R_1$  — радиус первой зоны Френеля

Перемещая экран вдоль линии АВ и одновременно меняя радиус отверстия в экране таким образом, чтобы поле за экраном оставалось постоянным, можно получить конфигурацию пространственных зон Френеля. При распространении радиоволн на трассе, проходящей вблизи поверхности земли, всегда имеет место отражение волн от поверхности земли. В этом случае поле над поверхностью земли будет определяться суммой полей двух волн — прямой и отраженной от земли (Рис. 6)

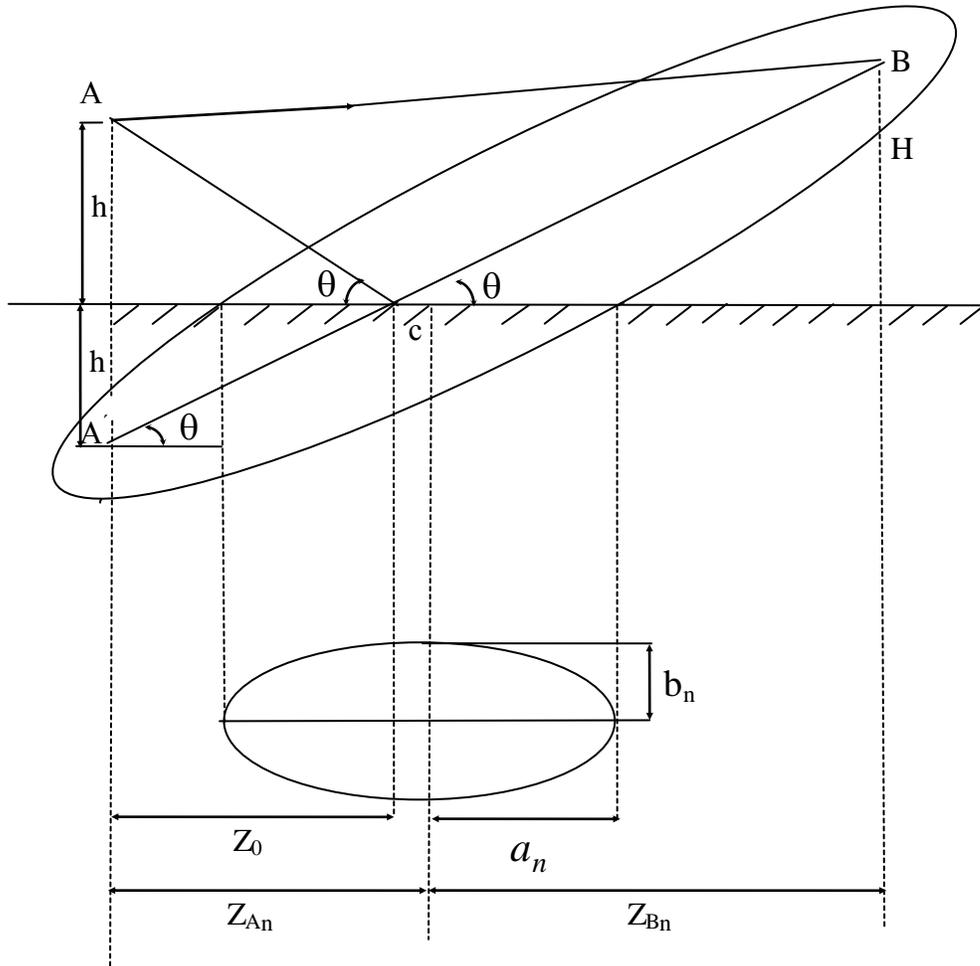


Рис. 6 Зона Френеля при отражении радиоволн от плоскости.

Разность фаз между прямой и отраженной волной в различных точках пространства зависит от разности хода волн и фазы коэффициента отражения от поверхности земли. В данной работе исследуется влияние плоской проводящей поверхности земли.

В этом случае можно воспользоваться методом зеркального изображения излучателя. Влияние земли заменяется эквивалентным полем излучения зеркально отображенного излучателя, расположенного в точке  $A'$ . Для радиолинии АВ

можно определить область существенную для распространения путем построения пространственных зон Френеля, представляющих собой эллипсоиды вращения с фокусами в точках А и В. В результате пересечения эллипсоидов с горизонтальной поверхностью образуются зоны Френеля при отражении, границы которых представляют собой эллипсы (Рис. 6). В случае  $h \ll H$  эллипсы зон Френеля при отражении имеют следующие параметры [2]:

— большая полуось эллипса:

$$a_n = \frac{1}{\sin \theta} \cdot \sqrt{\frac{n\lambda h}{\sin \theta} \left(1 + \frac{n\lambda}{4h \sin \theta}\right)} \quad (8)$$

— малая полуось эллипса:

$$b_n = a_n \sin \theta \quad (9)$$

— положение центра эллипса относительно передающей антенны:

$$Z_{A n} = Z_0 \left(1 + \frac{n\lambda}{Zh \sin \theta}\right), \quad (10)$$

где:  $\theta$  — угол скольжения;

$Z_0$  — расстояние от проекции передающей антенны до точки геометрического отражения С;

$n$  — номер зоны Френеля.

Угол скольжения находится из соотношения (Рис. 6):

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{H + h}{Z_{AB}}$$

где:  $Z_{AB}$  — расстояние между проекциями передающей и приемной антенны.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка включает слабо направленную передающую антенну, связанную с генератором СВЧ; экраны с отверстиями различного диаметра; металлический лист, имитирующий поверхность земли; приемную рупорную антенну, связанную с детектором и измерительным усилителем.

В установке можно менять поляризацию излучения и высоты подъема антенн.

### Порядок выполнения работы

1. Включить генератор и измерительный усилитель.
2. Установить частоту генератора по заданию преподавателя.
3. Снять зависимость напряженности поля от диаметра отверстия в экране.
4. Определить размеры первой и второй зон Френеля на плоскости экрана.
5. Установить металлический лист, имитирующий поверхность земли.
6. Снять зависимость поля излучения от  $\theta$  (H) при  $h = \text{const}$ .

7. Убедиться в наличии существенной и несущественной зон на отражающей поверхности при  $h = H$  и  $H = 4h$  путем введения неоднородностей в поле излучения антенны.
8. Рассчитать размеры области, существенной при отражении для случая  $h = H$  и  $H = 4h$ .
9. Рассчитать размеры первой и второй зон Френеля на отражающей поверхности.

### Содержание отчета

1. Схема расположения передающей и приемной антенн.
2. Экспериментально снятые зависимости напряженности от размеров отверстия в экране.
3. Результаты расчетов размеров области существенной при распространении.
4. Результаты определения существенной и несущественной зон на отражающей поверхности.
5. Результаты расчета первой и второй зоны Френеля на отражающей поверхности.
6. Экспериментально снятая диаграмма направленности  $F(\theta)$ .
7. Выводы и анализ результатов.

### Контрольные вопросы

1. Что такое область, существенная для распространения, как оценить ее размеры?
2. Что такое область, существенная при отражении, как оценить ее размеры?
3. Как вычислить размеры зон Френеля?
4. Как зависит поле в точке приема от размеров отверстия в экране?
5. Почему следует учитывать влияние земли?
6. Сравнить влияние идеально проводящей поверхности на диаграмму направленности при вертикальной и горизонтальной поляризации.
7. Каков коэффициент отражения от идеально проводящей поверхности при вертикальной и горизонтальной поляризации?

### Литература

1. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн. : Учеб.для студентов вузов. - 2-е изд.,испр. - М. : Горячая линия-Телеком, 2007.
2. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн.- М.: Высшая школа, 1975 г.
3. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн.- М.: Наука, 1989 г.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Цель работы: Исследование влияния экранирующих препятствий типа “тонкий клин” и “кольцевой антенный директор” на распространение радиоволн от передающей антенны к приемной.

#### Общие положения

Рассмотрение распространения радиоволн в свободном пространстве или в однородной среде как с позиции волновой теории (принцип Гюйгенса, построение зон Френеля), так и с использованием понятия луча дает одинаковый результат. Если же в среде имеются неоднородности, препятствия, то получаемый результат можно объяснить только с применением волновой теории. Примером тому является применяемое на практике “усиление” поля препятствием. Усиление поля препятствием хорошо наблюдается в горной местности. Экранирующее препятствие типа тонкого клина, используемое в данной работе, является моделью реальных препятствий, встречающихся в практике построения радиолиний. Схема взаимного расположения приемной антенны, клиновидного препятствия у передающей антенны, а так же ход падающих, отраженных и дифрагированных волн в лабораторной установке представлены на рис. 1.

Клиновидное препятствие высотой  $H$  экранирует прохождение прямой волны от передающей антенны (точка  $A$ ) непосредственно в приемную антенну (точка  $B$ ). Если препятствие стоит на плоской проводящей поверхности земли, то между вершиной клина и передающей антенной образуется радиолиния, в которой распространяется прямая волна по линии  $AD$  и отраженная от поверхности земли по ломаной линии  $ACD$ .

Поведение волн на острой вершине клиновидного препятствия можно объяснить с помощью геометрической теории дифракции в которой помимо падающих, отраженных и преломленных лучей вводятся так называемые дифрагированные лучи. В случае идеально проводящих тел дифрагированные лучи возникают при падении луча на ребро или острую вершину поверхности рассматриваемого тела. Во всех случаях, когда возникают дифрагированные лучи, наблюдается характерная особенность: один луч вызывает появление бесчисленного множества дифрагированных лучей (рис. 2)

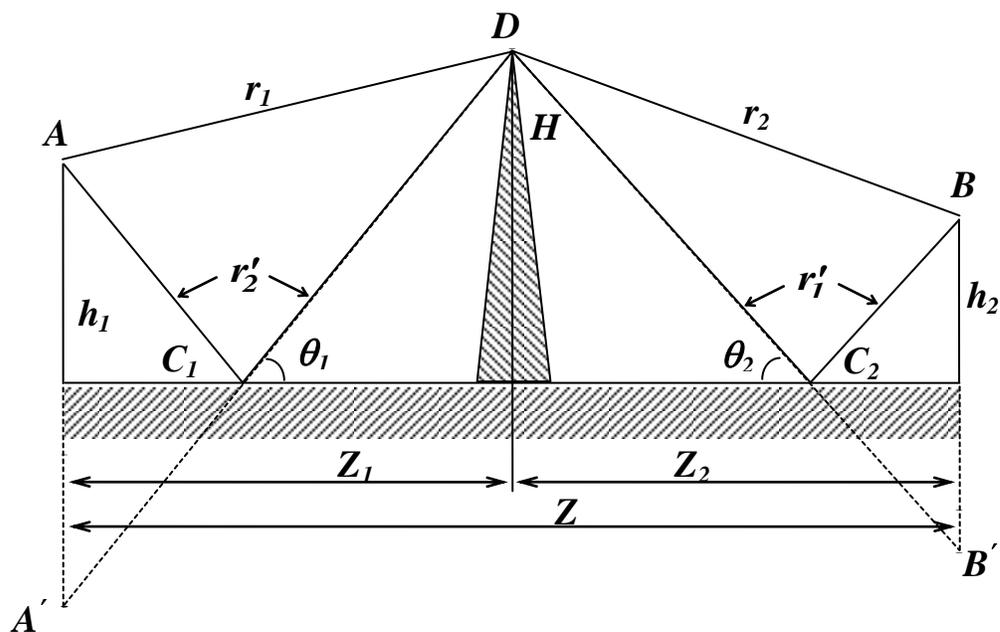


Рис.1 Ход лучей на трассе с клиновидным препятствием.

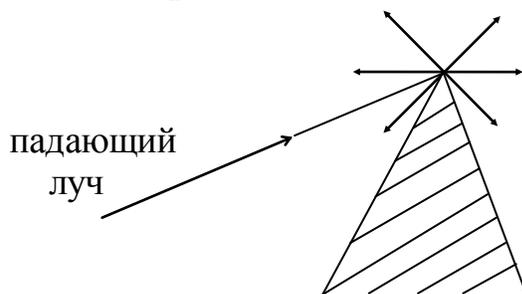


Рис. 2 К понятию дифрагированных лучей.

Дифрагированные на вершине клиновидного препятствия лучи проникают в область геометрической тени и образуют радиолинию между вершиной D и приемной антенной B (рис.1), в которой так же распространяется прямая волна по линии DB и отраженная по линии DC<sub>2</sub>B.

Таким образом, поле в точке приема B можно представить в виде суммы четырех волн, прошедших пути по четырем ломаным линиям:

$$\begin{aligned}
 ADB &= r_1 + r_2 = R_1; & AC_1DB &= r_1' + r_2 = R_2; \\
 ADC_2B &= r_1 + r_2' = R_3; & AC_1DC_2B &= r_1' + r_2' = R_4.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

При горизонтальной поляризации коэффициент отражения от плоской проводящей поверхности равен -1 и поле в точке приема определяется следующим образом:

$$E \approx E_{\text{пр}} \left| V_1 \cdot e^{-jkR_1} + V_2 \cdot e^{-jkR_2} + V_3 \cdot e^{-jkR_3} + V_4 \cdot e^{-jkR_4} \right| \quad (2)$$

где:  $E_{\text{пр}}$  — напряженность поля в точке приема при отсутствии препятствия и отражения от земли;

$V_{1, 2, 3, 4}$  — дифракционный множитель экрана, учитывающий ослабление волны при дифракции на экране.

Величина множителя  $V$  учитывающего дифракцию радиоволн на краю непрозрачного экрана определена в работе [1] с использованием принципа Гюйгенса и понятия зон Френеля. Экран перекрывает часть области, существенной при распространении радиоволн, что и приводит к характерной зависимости множителя от просвета между краем экрана и линией прямой видимости (рис.3)

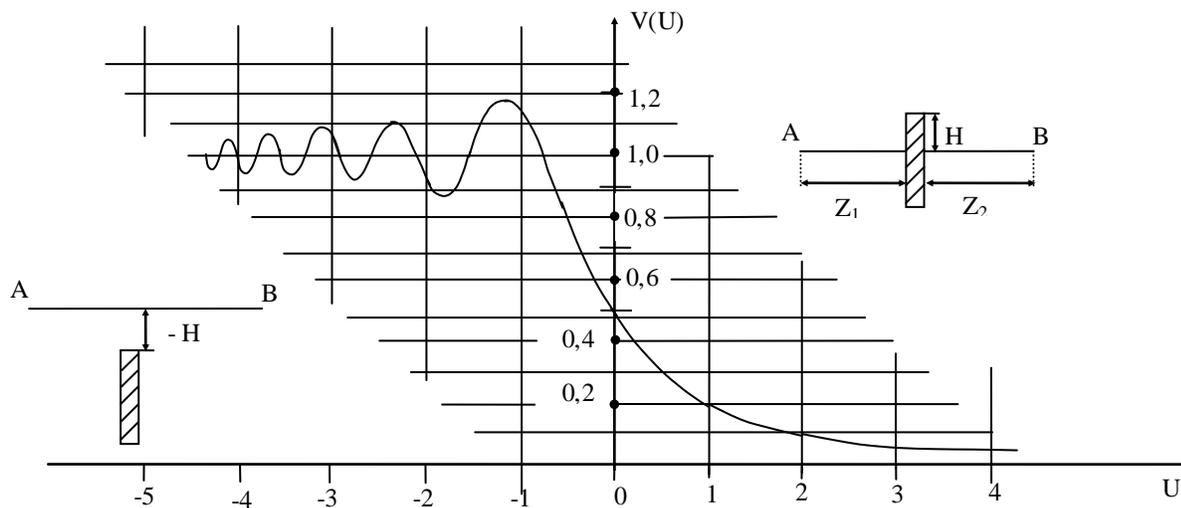


Рис.3 Зависимость дифракционного множителя от нормированной высоты просвета.

На рис.3 нормированная высота просвета:

$$U = H \sqrt{\frac{2Z_1 + Z_2}{\lambda Z_1 \cdot Z_2}} = \sqrt{2n_{\text{TM}}} \quad (3)$$

где:  $n_{\text{ф}}$  — число зон Френеля, укладываемых в круге радиуса  $R$ , совпадающем с плоскостью экрана и центром на линии наблюдения.

Когда  $H$  положительно (Рис.3) и достаточно велико, много больше радиуса первой зоны Френеля, поле за экраном практически отсутствует. При уменьшении  $H$  напряженность поля возрастает и при  $H=0$  она становится равной половине напряженности поля в свободном пространстве, так как половина площади,

существенной при распространении радиоволн перекрыта препятствием. При изменении  $H$  в сторону отрицательных значений изменение напряженности поля носит осциллирующий характер, что связано с попеременным перекрытием четных и нечетных зон Френеля. Глубина осцилляции здесь не так велика как в случае экрана с круглым отверстием (см. лабораторную работу № 1), так как основная часть пространства существенного при распространении уже открыта.

С учетом понятия зеркального источника определение величины нормированного просвета для определения  $V_{1, 2, 3, 4}$  в (2) можно пояснить рисунком 4.

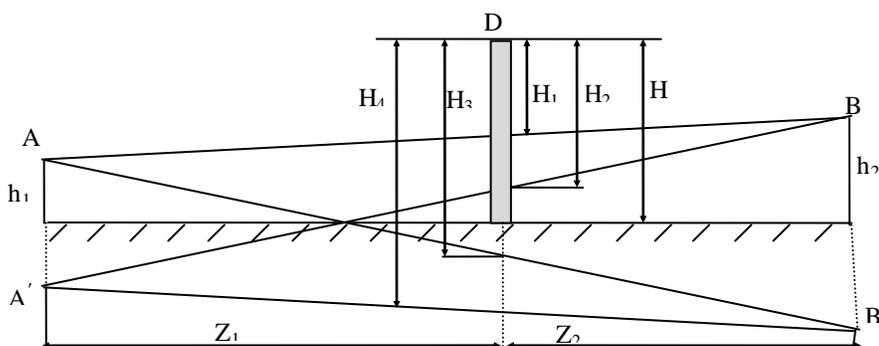


Рис.4 К определению величины нормированного просвета.

$$U_{1, 2, 3, 4} = H_{1, 2, 3, 4} \sqrt{\frac{\lambda Z_1 + Z_2}{2 Z_1 \cdot Z_2}} \quad (4)$$

Если выполняются условия:

$$H \ll Z_1 \quad H \ll Z_2; \quad h_1 \ll H \quad h_2 \ll H, \quad (5)$$

что часто встречается на практике, то

$$H_1 \approx H_2 \approx H_3 \approx H_4 = H$$

и, соответственно,

$$V_1 \approx V_2 \approx V_3 \approx V_4 = V. \quad (6)$$

Обозначим разность хода лучей (1)

$$\begin{aligned} R_2 - R_1 &= \Delta Z_1 \\ R_4 - R_2 &= \Delta Z_2 \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом этих обозначений и (6), выражение (2) можно привести к виду:

$$E \approx E_{np} \cdot V \cdot 4 \sin \frac{k \Delta Z_1}{2} \cdot \sin \frac{k \Delta Z_2}{2} \quad (8)$$

Из этого выражения следует, что максимальная напряженность поля будет при выполнении условий:

$$k\Delta Z_1 = \pi n; \quad k\Delta Z_2 = \pi m;$$

где  $m$  и  $n$  — целые числа.

В этом случае изменение напряженности поля за счет препятствия по сравнению со свободным пространством будет равно:

$$E / E_{\text{пр}} = 4V \quad (9)$$

Поскольку трасса проходит над проводящей поверхностью то эффект усиления можно оценить сравнив поле (8) с полем над плоской проводящей поверхностью в отсутствии препятствия. Для горизонтальной поляризации оно находится как поле системы противофазных излучателей реально и зеркально отображенного [2]:

$$E_1 = 2E_{np} \sin\left(\frac{k\Delta Z}{2}\right) \quad (10)$$

где  $\Delta Z$  — разность хода прямой и отраженной от проводящей поверхности волны (волны от зеркально отображенного источника).

Тогда эффект усиления можно оценить по формуле:

$$\frac{E}{E_1} = 2V \frac{\sin \frac{k\Delta Z_1}{2} \cdot \sin \frac{k\Delta Z_2}{2}}{\sin \frac{k\Delta Z}{2}} \quad (11)$$

При выполнении условий (5) разности хода лучей могут быть определены по приближенным формулам:

$$\begin{aligned} \Delta Z_1 &\approx 2h_1 \frac{H}{Z_1} \\ \Delta Z_2 &\approx 2h_2 \frac{HZ_1}{Z_2(Z_2 + Z_1)} \\ \Delta Z &\approx 2 \frac{h_1 h_2}{Z_2 + Z_1} \end{aligned} \quad (12)$$

С учетом (12) окончательная формула для определения усиления за счет клиновидного препятствия:

$$\frac{E}{E_1} = 2V(U) \frac{\sin \frac{kh_1 H}{Z_1} \cdot \sin \frac{kh_2 H Z_1}{Z_2 (Z_2 + Z_1)}}{\sin \frac{kh_1 h_2}{Z_1 + Z_2}} \quad (13)$$

Если для усиления поля в точке приема используются искусственные препятствия, то эффект усиления может быть существенно увеличен путем выбора их формы, размеров и места расположения. Как известно (см. лабораторную работу № 1), поля, излученные в пункт приема соседними зонами Френеля, имеют разные знаки и взаимно ослабляют друг друга. Увеличение напряженности поля в точке приема можно получить используя непрозрачный экран, заслоняющий излучение одной или нескольких зон Френеля с четными или нечетными номерами (обычно экранируют четные зоны Френеля). Такой экран называют кольцевым антенным усилителем или кольцевым антенным директором [3]. Если предположить, что экран расположен настолько далеко от передающей антенны, чтобы можно было считать, что плотность потока мощности в пределах нескольких первых зон Френеля постоянна ( $F(\theta) = \text{const}$ ) то, как известно [1], поле в точке В:

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{E_{m_1}}{2} + \left( \frac{E_{m_1}}{2} - E_{m_2} + \frac{E_{m_3}}{2} \right) + \left( \frac{E_{m_3}}{2} - E_{m_4} + \frac{E_{m_5}}{2} \right) + \dots = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} E_{mn} \approx \frac{1}{2} E_{m_1} \end{aligned} \quad (14)$$

где: n — номер зоны Френеля.

При экранировании кольцевым директором второй зоны Френеля, поле в месте приема:

$$E_m^{(-2)} = E_1 + \sum_{n=3}^{\infty} (-1)^{n-1} E_{mn} \approx E_1 + \frac{E_3}{2} \approx \frac{3}{2} E_1 \quad (15)$$

то есть увеличивается в три раза. В общем случае, если директор экранирует N зон с четными номерами, в приближении  $F(\theta) = \text{const}$  на этих зонах, напряженность в точке приема увеличивается в  $(2N+1)$  раз.

При неравномерном возбуждении кольцевого рефлектора ( $F(\theta) \neq \text{const}$ ) увеличение напряженности поля будет менее значительным [3]. Из конфигурации пространственных зон Френеля (Рис.5) видно,

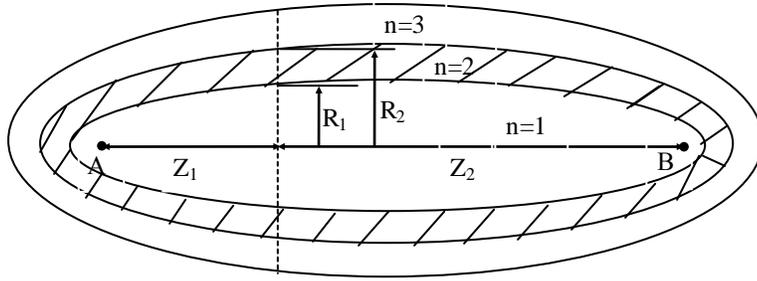


Рис.5 Пространственные зоны Френеля.

что внутренний  $R_1$  и внешний  $R_2$  радиусы кольцевого директора для второй зоны зависят от отношения  $Z_1/Z_2$  и определяются по формулам [1]:

$$R_1 = \sqrt{\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot \lambda}{Z_1 + Z_2}} \quad (16)$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot 2\lambda}{Z_1 + Z_2}} = R_1 \cdot \sqrt{2}$$

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка включает в себя слабонаправленную передающую антенну, связанную с генератором СВЧ; клинообразные препятствия различной высоты; кольцевой антенный директор; металлический лист имитирующий поверхность земли; приемную рупорную антенну, связанную с детекторной секцией и измерительным усилителем. В установке можно менять поляризацию излучения и высоты подъема антенны.

### Порядок выполнения работы

1. Включить генератор и измерительный усилитель.
2. Установить частоту генератора по заданию преподавателя.
3. Установить передающую антенну на высоту  $h_1 = \lambda$  от плоскости металлического листа.
4. При вертикальной поляризации путем перемещения приемной антенны (изменении  $h_2$ ) получить первый максимум поля. Зафиксировать значение  $h_2$ .
5. Изменить поляризацию на горизонтальную. Убедиться, что при прежнем положении антенн в распределении поля ( $E_1(h_2)$ ) будет наблюдаться минимум. Зафиксировать значение  $E_1$ .
6. На расстоянии  $Z_1 = Z_2$  (Рис.1) поставить клиновидное препятствие, измерить  $Z_1$  и зафиксировать напряженность поля в точке приема (E).

7. Повторить п. 6 для препятствий различной высоты ( $H$ ) и определить величину  $H_{op+}$ , соответствующую максимуму принимаемого излучения.
8. Определить усиление за счет клиновидного препятствия  $E(H_{op+}) / E_1$ .
9. Убедиться в отсутствии усиления при изменении поляризации.
10. Произвести расчет усиления для оптимальных параметров трассы по формуле (13).
11. Освободить область существенную для распространения радиоволн от препятствий: снять металлический лист и поднять антенны над столом на высоту  $h_1=h_2=0,5$  м.
12. Установить кольцевой директор, так чтобы его центр находился на линии наблюдения АВ (Рис. 5).
13. Путем изменения положения кольцевого директора ( $Z_1 / Z_2$ ) и  $\lambda$  в соответствии с (16) при заданных  $R_1$  и  $R_2=R_1 \sqrt{2}$ , найти максимальное увеличение напряженности поля в точке приема  $E_m^{(-2)} / E_m$  и сравнить с теоретическим значением.

### Содержание отчета

1. Схема установки для проведения эксперимента.
2. Основные расчетные соотношения, поясняющие методику эксперимента.
3. Результаты измерений и расчетов.
4. Анализ результатов и выводы по работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие волны определяют поле в точке приема в присутствии клиновидного препятствия?
2. Чем объясняется эффект “усиления” препятствием?
3. В чем заключается физический смысл дифракционного множителя экрана?
4. Какие условия должны выполняться для получения максимального усиления клиновидным препятствием?
5. В чем заключается принцип действия кольцевого антенного директора?
6. Как определить размеры кольцевого антенного директора?

### Литература

1. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн. : Учеб. для студентов вузов. - 2-е изд., испр. - М. : Горячая линия-Телеком, 2007.
2. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Ч. Антенно-фидерные устройства.- М.: Советское радио, 1974 г.
3. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н. Антенны УКВ 2. ч, - М.: Связь, 1972 г.

## Лабораторная работа № 3

# ДИФРАКЦИЯ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА КРУГОВОМ ЦИЛИНДРЕ

**Цель работы.** Ознакомление с некоторыми методами решения задач дифракции монохроматических электромагнитных волн на препятствиях и изучение дифракции плоской электромагнитной волны на круговом цилиндре.

### Общие положения

При падении электромагнитной волны на тело конечных размеров или на край полубесконечного тела помимо отражения и преломления наблюдается еще явление огибания волнами препятствий, называемое дифракцией. Возникающие при этом задачи определения влияния препятствий на структуру электромагнитного поля называют задачами дифракции. С задачами дифракции встречаются при проектировании и анализе антенных систем, при исследовании распространения радиоволн в природных условиях, в радиолокации и т. д.

Задачи дифракции являются разновидностью граничных задач электродинамики. В них описывается такая суперпозиция поля падающей волны и вторичного поля, полученного при ее взаимодействии с препятствием, которая удовлетворяет волновому уравнению, граничным условиям на поверхности препятствия и условиям теоремы единственности решений. Точное решение подобных задач возможно лишь в небольшом числе идеализированных случаев для препятствий простой формы. При решении практических задач приходится пользоваться различного рода приближениями. Подход к решению задач дифракции существенно зависит от отношения длины волны ( $\lambda$ ) и характерного размера препятствия ( $L$ ).

Различают три характерные области:

- квазистатическая область, когда  $L / \lambda \ll 1$ ;
- резонансная область, когда  $L / \lambda \approx 1$ ;
- квазиоптическая область, когда  $L / \lambda \gg 1$ .

В квазистатической области электродинамическая задача сводится к последовательному решению ряда электростатических и магнитостатических задач. Вместо уравнений Гельмгольца решаются более простые скалярные уравнения Пуассона и Лапласа.

Резонансная область наиболее сложна для исследования, поскольку требует строгого решения уравнений Максвелла. Из аналитических методов здесь находят

применения метод собственных функций (метод разделения переменных или, иначе, метод Фурье) и метод интегральных преобразований. Суть этих методов заключается в том, что в выбранной системе координат, когда граничные поверхности совпадают с координатными поверхностями, находятся решения однородного уравнения Гельмгольца, которые образуют полные ортогональные системы функции. Тогда решение неоднородного уравнения Гельмгольца (или решение однородного уравнения Гельмгольца при граничных условиях, определяемых первичным полем) может быть представлено в виде разложения по собственным функциям либо в ряд (метод собственных функций), либо в интеграл (метод интегральных преобразований).

Если граничные поверхности имеют сложную форму и метод разделения переменных неприменим, задача может быть решена численными методами, например, вариационными [1].

Квазиоптическая область использует две группы методов решения дифракционных задач:

а) методы, связанные с асимптотическим исследованием точных решений, полученных методом собственных функций или интегральных преобразований;

б) эвристические методы с привлечением различных физических идей, среди которых можно выделить лучевые и волновые.

Методы лучевой или геометрической оптики основаны на представлении о локальном характере процесса распространения электромагнитных волн: волна является совокупностью лучей, не взаимодействующих между собой; эти лучи отражаются и преломляются в каждой точке поверхности тела, как от плоскости, касательной к поверхности в этой точке. Метод геометрической оптики дает хороший результат, когда радиусы кривизны фронта падающей и отраженной волны велики по сравнению с длиной волны, это соответствует асимптотическому решению волнового уравнения при  $\lambda \rightarrow 0$ . Геометрическая оптика позволяет рассматривать только поле рассеянное препятствием, в зонах тени и полутени она неприменима. Определить поле в области тени позволяет геометрическая теория дифракции (метод дифракционных лучей), которая является развитием и обобщением метода геометрической оптики. Метод дифракционных лучей основан на обобщенном принципе Ферма, который допускает наряду с обычными также и дифракционные лучи. Под дифракционными лучами понимаются лучи, проведенные по экстремальному пути (принцип Ферма) от источника (А) в точку наблюдения (В) и имеющие при этом общий кусок гладкой кривой с поверхностью препятствия или общую точку с отражающим ребром (Рис. 1).

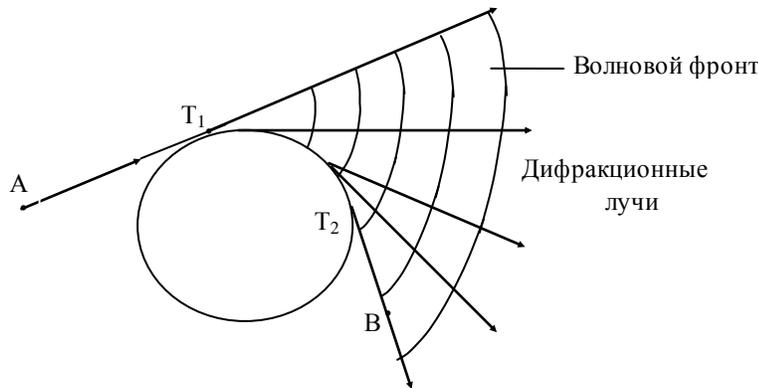


Рис. 1 К понятию дифракционных лучей.

Методы волновой (физической) оптики основаны на использовании принципа Гюйгенса-Френеля и приближении Кирхгофа.

В соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля каждая точка на поверхности, возбуждаемой распространяющейся волны, может рассматриваться как источник вторичной сферической волны. Поле вне этой поверхности является результатом интерференции вторичных волн. В качестве поверхности часто оказывается удобным выбрать поверхность тела, рассматриваемого в дифракционной задаче. Если бы распределение поля на поверхности (S) было известно, то поле во всей бесконечной области (V) можно было бы найти совершенно точно. Но при постановке задачи дифракции известно только поле падающей волны, поэтому обычно пользуются приближением Кирхгофа [2], которое основывается на теореме эквивалентности.

В соответствии с приближением Кирхгофа, в случае экрана с отверстием, на теневой стороне экрана поле полагается равным нулю, а на отверстии, равным полю падающей волны; в случае идеального проводящего тела на освещенной части тела  $H_r = r H_{0r}$  и плотность поверхностного тока  $\vec{I}_j = r \left[ \vec{H}_o \times \vec{n} \right]$ , а на

теневой стороне  $\vec{I}_j = 0$ . Принятое распределение тока является неточным в области изломов поверхности. Уточнением метода физической оптики является метод краевых волн [5], позволяющий найти поправки к полю излучения, связанные с наличием изломов на рассеивающих поверхностях.

Кроме перечисленных методов решения задач дифракции существует большое число численных методов решения этих задач рассмотрение которых выходит за рамки этой работы.

Мы ограничимся рассмотрением и экспериментальной проверкой метода разделения переменных и метода геометрической оптики в применении к дифракции на круговом проводящем цилиндре.

Пусть плоская линейно-поляризованная электромагнитная волна падает на идеально проводящий круговой цилиндр перпендикулярно его оси. Ограничимся рассмотрением двух типов поляризации падающей волны относительно оси цилиндра: вектор  $\vec{E}$  параллелен оси цилиндра (Рис. 2 а), вектор  $\vec{H}$  параллелен оси цилиндра (Рис. 2 б).

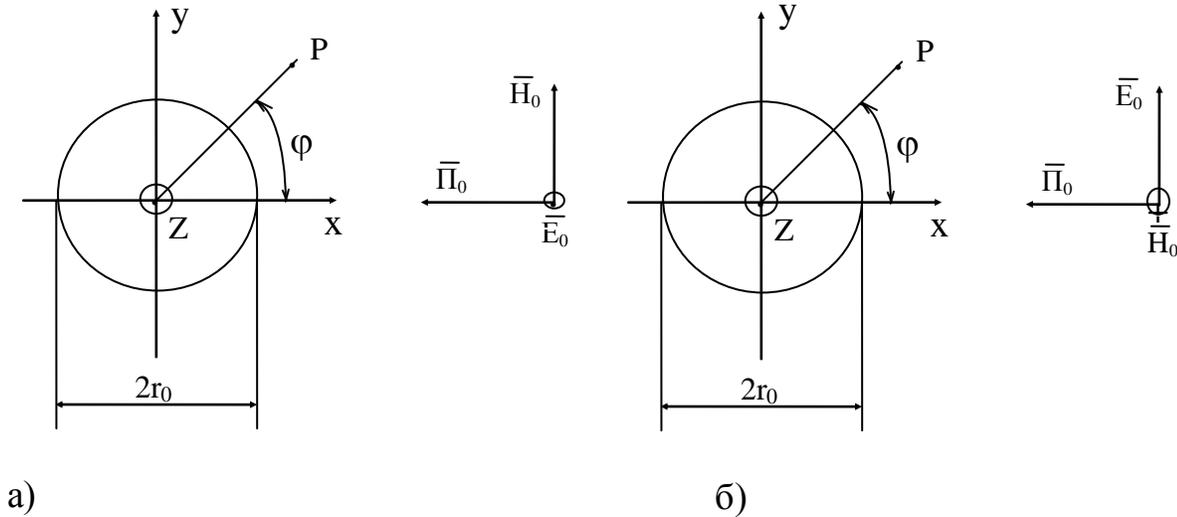


Рис. 2

Точное решение этой задачи методом собственных функций (разделения переменных) для случая, когда  $\vec{E}$  параллелен оси цилиндра приведено в [3] (раздел 35.2). При этом падающее поле представляется формулой (35.17), отраженное (вторичное) поле формулой (35.25) из [3], а суммарное поле равно (1):

$$\vec{E}_Z = E_0 \times \left\{ e^{jkr \cos \varphi} - \frac{I_0(kr_0)}{H_0^{(2)}(kr_0)} H_0^{(2)}(kr) - 2 \sum_{m=1}^{\infty} (j)^m \frac{I_m(kr_0)}{H_m^{(2)}(kr_0)} H_m^{(2)}(kr) \cos(m\varphi) \right\}$$

где:  $E_0$  — амплитудный множитель;

$k = 2\pi / \lambda$  — волновое число;

$I_m(x)$  — функция Бесселя первого рода порядка  $m$  от аргумента  $x$  [4];

$H_m^{(2)}(x)$  — функция Ханкеля второго рода порядка  $m$  от аргумента  $x$  [4].

Составляющая магнитного поля  $H_r$  и  $H_\varphi$  находятся из уравнения Максвелла. В случае дифракции волн с вектором параллельным оси цилиндра (Рис. 2 а), расчет составляющей  $H_z$  магнитного поля проводится аналогично расчету  $E_z$  в предыдущем случае, но вместо граничного условия  $E_z = 0 | r = r_0$  используется граничное условие  $\frac{\partial H_z}{\partial r} = 0 | r = r_0$ . Поэтому формула для  $H_z$  составляющей имеет

такую же структуру, как и формула (1), но дробь  $\frac{I_m(kr_0)}{H_m^{(2)}(kr_0)}$  заменяется на  $\frac{I_m'(kr_0)}{H_m^{(2)'}(kr_0)}$ .

С учетом принципа двойственности на поверхности цилиндра ( $r = r_0$ ) суммарное поле  $H_z$  равно:

$$H_z(r_0, \varphi) = \frac{2H_0}{j\pi kr_0} \times \left[ \frac{1}{H_0^{(2)'}(kr_0)} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (j)^m \frac{\cos(m\varphi)}{H_0^{(2)'}(kr_0)} \right] \quad (2)$$

Составляющие  $E_r$  и  $E_\varphi$  можно определить из уравнения Максвелла.

При больших значениях  $kr_0$  ( $kr_0 > 10$ ) появляется возможность вычисления поля в области где можно выделить падающую волну методом геометрической оптики исходя из физических соображений. При расчете поля в точке А на высоте  $h$  над цилиндром (Рис. 3) его величина будет определяться участком поверхности, ближайшим к точке А.

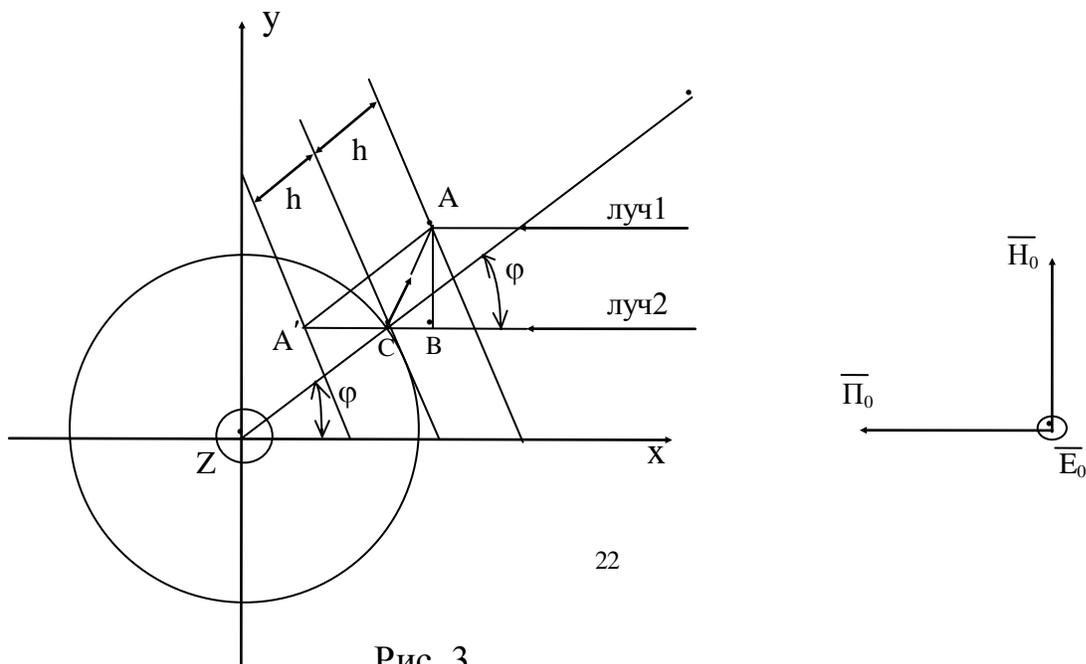


Рис. 3

При большом радиусе этот участок можно заменить касательной плоскостью. При этом в точку А приходят два луча (луч 1 — прямой и луч 2 — отраженный от касательной плоскости). Разность хода лучей  $\Delta r = BC + CA$ , откуда поле в точке А:

$$E_Z = E_0(1 + \Gamma e^{-jk\Delta r}) \quad (3)$$

где:  $\Gamma$  — коэффициент отражения.

При отражении от металлической плоскости  $\Gamma = -1$ .

Из рисунка 3 видно, что  $\Delta r = BC + CA = BC + CA' = 2h \cos \varphi$ .

Тогда для суммарного поля можно записать:

$$|E_Z| = |E_0| |1 - e^{-jk h \cos \varphi}| = 2|E_0| \sin(kh \cos \varphi) \quad (4)$$

Формула (4) справедлива для углов  $\varphi < \pi/2$

### Описание лабораторной установки.

Лабораторная установка включает в себя передающую рупорную антенну, связанную с генератором СВЧ, поворотный столик, на который устанавливаются цилиндры с приемными антеннами.

Распределение поля  $|E_Z|$  исследуется с помощью вертикального симметричного вибратора, расположенного над поверхностью цилиндра на расстоянии  $h$ , сигнал с которого подается на детекторную секцию и далее на измерительный усилитель. В силу квадратичной характеристики детектора, показания измерительного усилителя пропорциональны квадрату поля  $E_Z$ .

Распределение поля  $|H_Z|$  исследуется с помощью рамочной антенны, расположенной на поверхности цилиндра, дальнейшее прохождение сигнала такое же, как и в предыдущем случае. При снятии распределения  $E_Z$  необходимо установить вертикальную поляризацию поля передающей антенны, а при снятии распределения  $H_Z$  — горизонтальную поляризацию. Установка позволяет измерить распределение суммарного поля вокруг цилиндра в зависимости от угла  $\varphi$  (Рис.2) на различных расстояниях  $h$  от поверхности цилиндра и для различных

значений радиуса цилиндра. Угол  $\varphi$  отсчитывается по шкале на поворотном столике от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ .

### Порядок выполнения работы.

1. Включить генератор и измерительный усилитель.
2. Установить частоту по заданию преподавателя.
3. Измерить распределение полей для случая вертикальной поляризации вектора  $\vec{E}$  на расстояниях  $h = 0,25\lambda$  и  $h = 0,5\lambda$  для двух значений параметра  $kr_0$ .
4. Измерить распределение  $H_z$  на поверхности цилиндра для случая горизонтальной поляризации вектора  $\vec{E}$  для двух значений параметра  $kr_0$ .
5. Рассчитать распределение поля  $E_z(\varphi)$  для параметров системы, соответствующих пункту 3 по формулам (1) и (4).
6. Рассчитать распределение поля  $H_z(\varphi)$  для параметров системы, соответствующих пункту 4 по формулам (2).

### Содержание отчета

1. Схема лабораторной установки.
2. Основные расчетные соотношения.
3. Рассчитанные и измеренные распределения поля. Расчетные и экспериментальные графики располагаются на одном рисунке. На каждом рисунке должна быть точная информация о геометрии изучаемой системы.
4. Анализ каждого исследования и выводы по проделанной работе.

### Контрольные вопросы

1. Какие задачи электродинамики относятся к дифракционным задачам?
2. Дайте характеристику основным методам решения дифракционных задач.
3. Поясните порядок определения поля при дифракции на проводящем круговом цилиндре методом Фурье (метод разделения переменных).
4. Поясните метод геометрической оптики на примере дифракции на круговом цилиндре.
5. Чему равно поле  $E_z$  при дифракции на цилиндре в случае  $kr_0 \rightarrow 0$ ?
6. Получите выражение для поля  $E_z$  при дифракции на цилиндре в случае  $kr_0 \gg 1$ .
7. Получите выражение для поля  $H_z$  при дифракции на цилиндре в случае  $kr_0 \gg 1$ .

8. Назовите источники погрешности при проведении эксперимента в лабораторной установке.

### Литература

1. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн. : Учеб.для студентов вузов. - 2-е изд.,испр. - М. : Горячая линия-Телеком, 2007.
2. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика.- М.: Связь, 1971 г.
3. Федоров Н.Н. Основы электродинамики. - М.: Высшая школа, 1980 г.
4. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции.- М.: Наука, 1968 г.

### ИНСТРУКЦИЯ

по технике безопасности для студентов, выполняющих лабораторные работы по курсу " Электродинамика и распространение радиоволн " .

1. Каждый приступающий к работе в лаборатории должен ознакомиться с содержанием настоящей инструкции и принять обязательство ее выполнять.
2. Все работы в лаборатория могут производиться только с ведома преподавателя, проводящего занятия в данной группе или дежурного лаборанта.
3. До начала работы все ее участники должны подробно ознакомиться со схемой соединений приборов, усвоить расположение цепей и элементов схемы, обратив особое внимание на место расположения выключателя питающей сети.
4. Включение напряжения должно производиться одной рукой. В это время вторая рука не должна касаться заземленных частей, или частей, находящихся под напряжением.
5. В лаборатории используются маломощные источники СВЧ энергии, представляющие опасность для организма, особенно для глаз.  
При длительном облучении сверхвысокочастотной энергией небольшой мощности образуются помутнения и катаракты глаз.  
Для уменьшения облучения аттенюаторы генераторов регулирующие выходную мощность, до начала измерений должны быть полностью введены.
6. ВОСПРЕЩАЕТСЯ:  
а/оставлять без надзора работающие установки;  
б/делать какие-либо переключения и заменять предохранители на щитах;  
в/смотреть в открытый конец волновода при работающем генераторе.
7. По окончании работы все аттенюаторы должны быть введены, аппаратура должна быть выключена.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	2
Работа №1 " ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВА, СУЩЕСТВЕННОЙ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ И ОТРАЖЕНИИ РАДИОВОЛН". .....	3
Работа №2 " ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН".....	10
Работа №3 " ДИФРАКЦИЯ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА КРУГОВОМ ЦИЛИНДРЕ". .....	18
Инструкция по техники безопасности.....	25