

Работа №7

ДИФРАКЦИЯ ФРЕНЕЛЯ НА КРУГЛОМ ОТВЕРСТИИ И ДИСКЕ

Цель работы: ознакомиться с явлением дифракции в области СВЧ диапазона электромагнитных волн.

Оборудование: генератор 8-миллиметрового диапазона волн, набор зонных пластинок, самопишущий потенциометр с закрепленным на каретке индикатором излучения.

1. Введение

Дифракция в первоначальном (узком) смысле слова – огибание волнами препятствий, в современном (широком) – любые отклонения при распространении волн от законов геометрической оптики. Правда при такой широкой трактовке термина "дифракция" оно охватывает и явления рассеяния волн в неоднородных средах. Поэтому мы будем считать дифракцией пространственное и временное перераспределение волнового поля при встрече волны с препятствиями, рассеяние электромагнитного поля на препятствиях. Именно благодаря дифракции мы видим объекты реального мира, поскольку глаз реагирует на преобразованную (рассеянную, отраженную) объектами волну. Первая волновая трактовка дифракции дана Юнгом (1800), вторая – Френелем (1815) на основе принципа Гюйгенса (1678). Математически теорию Гюйгенса – Френеля дополнили и развили Гельмгольц и особенно Кирхгоф (1883).

1. 1. Подходы Гюйгенса – Френеля и Юнга

Гюйгенс предположил, что каждая точка пространства, до которой доходит свет, может рассматриваться как источник вторичных сферических волн (рис.1, а). Направление распространения света он учитывал тем, что вторичные волны излучаются только в одну полуплоскость пространства (вперед). Огибающая вторичных волн образует фронт волны в следующий момент времени. Это позволило согласовать волновую теорию света с геометрической оптикой, включая образование полутени, отражение и преломление света, но не позволяло объяснить более сложные дифракционные картины, наблюдавшиеся в опыте.

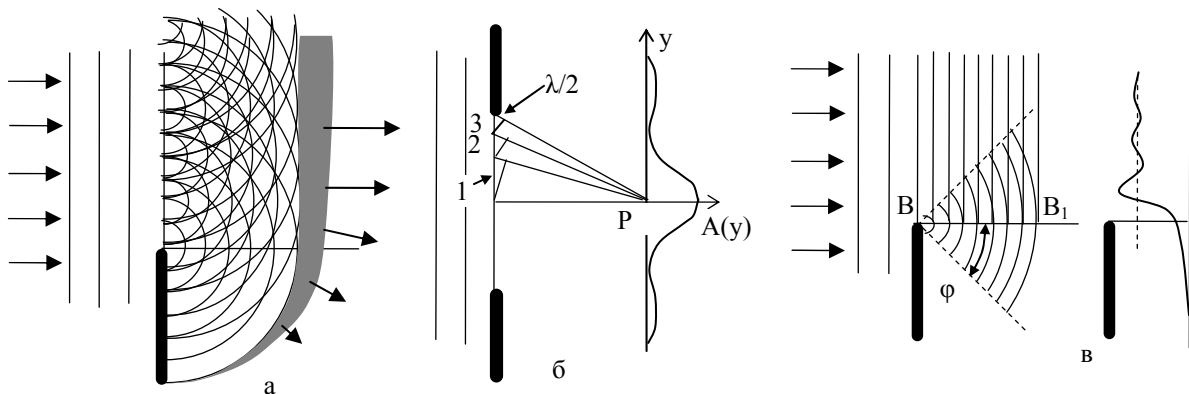


Рис. 1. Схемы дифракции
а) по Гюйгенсу, б) по Френелю, в) по Юнгу

Френель дополнил принцип Гюйгенса представлениями о *когерентности* вторичных волн и их *интерференции*. Учет того, что от разных точек сечения отверстия свет доходит в точку наблюдения Р с различными фазами (рис. 1, б), приводит к тому, что в точке наблюдения амплитуды волн могут как складываться, так и вычитаться, а интенсивность света как увеличиваться, так и уменьшаться, образуя сложную дифракционную картину. Для суммирования амплитуды волн нужно разбить сечение отверстия на зоны и производить суммирование с учетом знака фазы волны от каждой зоны. При этом, как и у Гюйгенса, точки-источники вторичных волн Френеля не имеют физического референта, а являются чисто математическими образами.

Подход Юнга более физичен и основан на том, что дифракция представляет собой результат действия двух процессов: возбуждения вторичных волн на *физических границах* препятствий и интерференции вторичных волн с падающей и прошедшей (рис. 1, в). В области радио- и СВЧ волн, где длина волны сравнима с размерами препятствий, приходится учитывать перераспределение зарядов на поверхностях, вызванное падающей волной. Препятствия сами становятся источниками радиоволн, форма излучения которых зависит от формы и физических свойств препятствий. Поэтому концепция Юнга в настоящее время находит содержательное развитие в теориях дифракции радиоволн (Леонтович, Фок, 1944 - 46 гг.) и в квазиоптике. Однако для препятствий простых форм, в частности тонких экранов с осесимметричными отверстиями, теория Френеля дает достаточно точные результаты, что позволяет использовать ее в нашей работе. Подробно теория изложена в Приложении 3.

В зависимости от расстояния точки наблюдения до рассеивающего объекта дифракцию делят на два вида: *Френеля* и *Фраунгофера*. Если точка наблюдения расположена достаточно далеко по сравнению с характерным размером рассеивающего объекта, то в точке наблюдения пришедшая волна имеет практи-

чески плоский фронт. В этом случае говорят о дифракции Фраунгофера. Остальные случаи называют дифракцией Френеля.

1. 2. Зоны Френеля.

Пусть монохроматическое излучение точечного источника S падает на непрозрачный экран с круглым отверстием радиуса R , а точка наблюдения P находится на оси z , проходящей через источник и центр отверстия (рис. 2, а).

Выберем точку M_1 в сечении отверстия таким образом, чтобы $M_1P = AP + \lambda/2$. Тогда каждая точка, лежащая внутри сектора AM_1 будет точечным излучателем, фаза излучения которого изменяется от точки A до точки M_1 в пределах $0 \dots \pi$, а амплитуда излучения всех точек сектора будет суммироваться в точке P . Обозначим расстояние точки M_1 от центра отверстия через r . Определенный таким образом круг диаметром $2r$ называется *первой зоной Френеля*. Подчеркнем: амплитуды (интенсивности) излучения, пришедшего от каждого элемента первой зоны в точку наблюдения P , суммируются.

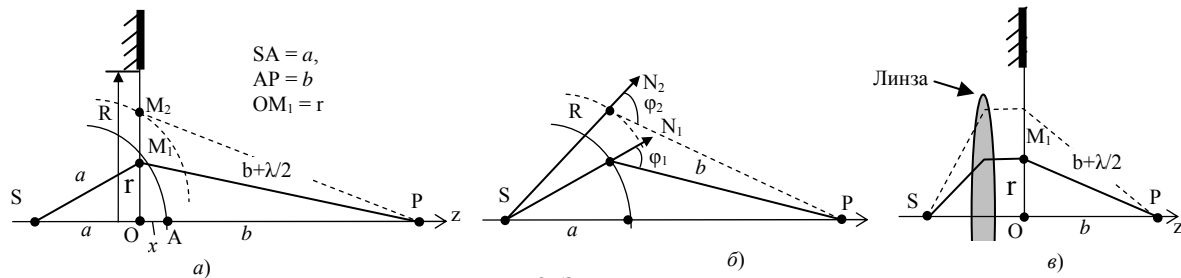


Рис. 2. Зоны Френеля

а) сферический фронт падающей волны, б) зависимость амплитуды суммарной волны от угла φ , в) плоский фронт падающей волны.

Аналогично можно найти точку M_2 такую, что разность длин M_1P и M_2P будет также составлять $\lambda/2$ (или, что то же самое, $M_2P = AP + 2 \cdot \lambda/2$). Излучение из каждого элемента этой зоны (из кругового сектора $M_1 \dots M_2$), приходящее в точку P , будет также суммироваться по амплитуде, но его фаза будет сдвинута относительно излучения первой зоны на полпериода. Следовательно, суммарная амплитуда (и интенсивность) излучения второй зоны будет вычитаться из суммарной амплитуды излучения первой зоны. Определенный таким образом круговой сектор будет составлять *вторую зону Френеля* и т. д.

Таким образом, отверстие в экране радиусом $R \geq m \cdot \lambda/2$ может быть разбито на m зон Френеля. Определим радиусы зон Френеля. Для первой зоны можно написать:

$$r^2 = a^2 - (a - x)^2 = (b + \lambda/2)^2 - (b + x)^2,$$

откуда
$$x = \frac{b}{a+b} \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda^2}{8(a+b)}.$$

При $\lambda \ll a, b$ вторым слагаемым можно пренебречь. Тогда $x = \frac{b}{a+b} \frac{\lambda}{2}$, и для радиусов зон Френеля получим:

$$r_m = \sqrt{m \frac{ab}{a+b} \lambda}. \quad (1)$$

Для определения суммарной интенсивности излучения определим площади зон Френеля. Площадь первой зоны, равная площади круга, равна

$$S_1 = 2\pi ax = \frac{\pi ab}{a+b} \lambda + \frac{\pi a \lambda^2}{4(a+b)} \approx \frac{\pi ab}{a+b} \quad (2)$$

Поскольку для сегмента, захватывающего две зоны, площадь просто удвоится, для сегмента в три зоны – утроится и т. д., то, следовательно, площади колец каждой зоны равны между собой. Однако угол φ между нормалью к фронту волны N и направлением на точку P , увеличивается от зоны к зоне (рис. 2, б). Френель предположил, что амплитуда волны, пришедшей с каждой последующей зоны, уменьшается пропорционально росту угла φ и при $\varphi = \pi/2$ становится равной нулю¹. Поэтому для суммарной амплитуды волны в точке P можно написать:

$$S = S_1 - (S_2 - S_3) - (S_4 - S_5) \dots \quad (3)$$

Отсюда следует, что амплитуда волны, пришедшей в P при отсутствии экрана, меньше той, которая приходит от первой зоны: $S < S_1$, что подтвердилось экспериментально.

Для излучения с плоским фронтом волны (рис. 2, в) решение упрощается и радиусы зон равны

$$r_m = \sqrt{mb\lambda} \quad (1')$$

¹ Позднее Кирхгоф вывел зависимость амплитуды от угла φ из волновых уравнений и показал, что равным нулю этот множитель становится не при $\pi/2$, а при π .

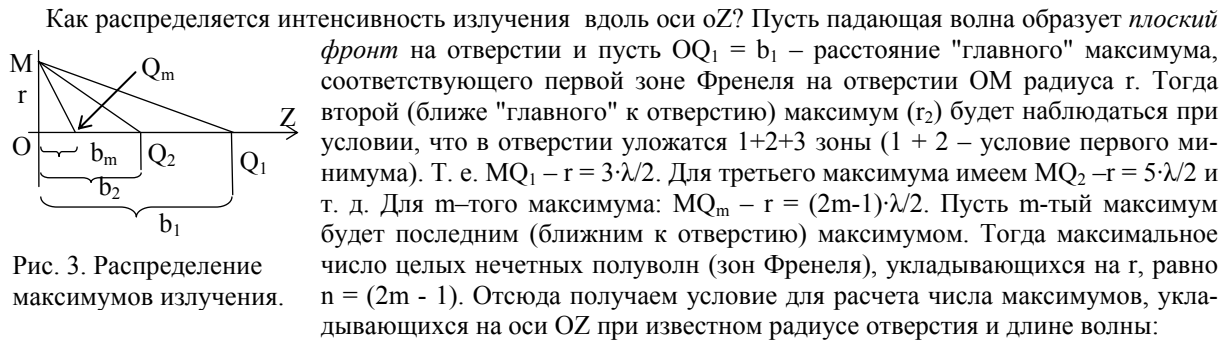


Рис. 3. Распределение максимумов излучения.

Как распределяется интенсивность излучения вдоль оси OZ ? Пусть падающая волна образует *плоский фронт* на отверстии и пусть $OQ_1 = b_1$ – расстояние "главного" максимума, соответствующего первой зоне Френеля на отверстии OM радиуса r . Тогда второй (ближе "главного" к отверстию) максимум (r_2) будет наблюдаться при условии, что в отверстии уложатся $1+2+3$ зоны ($1+2$ – условие первого минимума). Т. е. $MQ_1 - r = 3 \cdot \lambda/2$. Для третьего максимума имеем $MQ_2 - r = 5 \cdot \lambda/2$ и т. д. Для m -того максимума: $MQ_m - r = (2m-1) \cdot \lambda/2$. Пусть m -тый максимум будет последним (ближним к отверстию) максимумом. Тогда максимальное число целых нечетных полуволн (зон Френеля), укладывающихся на r , равно $n = (2m - 1)$. Отсюда получаем условие для расчета числа максимумов, укладывающихся на оси OZ при известном радиусе отверстия и длине волны:

$$r/(\lambda/2) = (2m-1) + \varepsilon,$$

где $m = 1, 2, \dots$ – число максимумов, укладывающихся на оси Z , и $\varepsilon < \lambda$.

Очевидно, далее точки Q_1 мы попадаем в зону дифракции Фраунгофера и интенсивность излучения уже не будет иметь экстремумов с увеличением z .

2. Описание установки

Установка для изучения дифракции на круглом отверстии представлена на рис. 4. Генератор располагается на расстоянии $L \approx 0,5$ м от экрана, что позволяет считать фронт волны в плоскости отверстия экрана плоским.

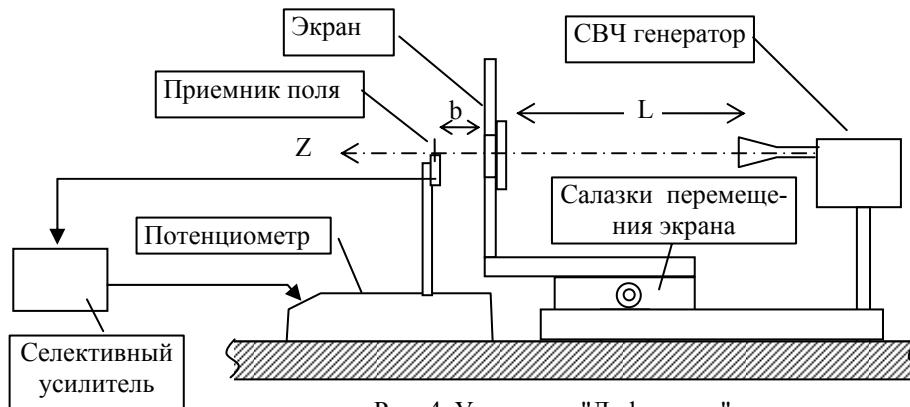


Рис. 4. Установка "Дифракция"

Экран с отверстием и приспособлением для установки зонных пластинок закреплен на салазках, позволяющих перемещать его в направлении оси Z . Салазки имеют механизм отсчета перемещения с точностью $0,1$ мм. Приемник поля – СВЧ диод с антенной с помощью пенопластового держателя закреплен на подвижной планке самопишущего потенциометра и может перемещаться вместе с последней по оси OX потенциометра (ось развертки, перпендикулярная плоскости рисунка). Требуемое расстояние b приемника от зонной пластинки устанавливается перемещением экрана. Сигнал с СВЧ диода через узкополосный усилитель поступает на вход Y потенциометра.

Внимание! Не касайтесь руками приемной антенны СВЧ детектора. Детекторы СВЧ легко "пробиваются" от статической наводки!

2. 1. Особенности установки и ее настройка

В установке применен СВЧ генератор с $\lambda_0 = 8$ мм на диоде Гана. Несущая частота генератора модулирована низкочастотным сигналом с частотой $f \approx 1,5$ кГц, что позволяет использовать для усиления сигнала приемного детектора излучения селективный узкополосный усилитель. Селективное усиление позволяет значительно снизить помехи и наводки, попадающие на детектор. Для дополнительного их уменьшения вход усилителя следует включить в режим большой постоянной времени входа.

2. 1. 1. Порядок настройки установки

1. При выключенном потенциометре и генераторе СВЧ включается усилитель. Усилитель требует некоторого времени прогрева (порядка 1 мин), чтобы установился его "нуль".

2. Не включая генератор СВЧ включите потенциометр и установите его относительно экрана таким образом, чтобы при включении его развертки приемный диод перемещался строго параллельно экрану. Для этого подведите экран почти вплотную к приемному диоду (расстояние $b \approx 1-2$ мм) и ручкой смещения по оси X перемещайте диод вдоль экрана одновременно поворачивая потенциометр и добиваясь чтобы ось его развертки OX была параллельна плоскости экрана.

3. Поместите приемный диод примерно в середину отверстия экрана и **выключите потенциометр**. Затем включите генератор СВЧ и отрегулируйте чувствительность усилителя таким образом, чтобы сигнал детектора отклонял стрелку его измерительного прибора примерно на 70% шкалы.

4. Включите потенциометр и установите его чувствительность таким образом, чтобы сигнал детектора соответствовал примерно 1/3 полной шкалы отклонения по оси Y потенциометра.

На этом установка готова к выполнению последующей работы.

3. Задания

1. **Настройка установки.** Установите в экран зонную пластинку с надписью "1 зона". Измерьте диаметр ее отверстия и определите расстояние b , на котором отверстие зонной пластинки будет соответствовать первой зоне Френеля. Переместите экран в нужное положение. Если расстояние b определено правильно, то надписи на всех остальных зонных пластинках будут соответствовать помеченному на них числу открытых и закрытых зон Френеля.

2. В режиме автоматической развертки потенциометра снимите картину дифракции в плоскости первой зоны Френеля. При необходимости подрегулируйте чувствительность усилителя.

3. Заменяя зонные пластинки, снимите на тот же график дифракционные картины с открытыми 1+2 и 1+2+3 зонами. Таким образом график №1 должен содержать картины с 1, (1+2), (1+2+3) открытыми зонами.

4. Переместив бумагу на потенциометре, на графике №2 получите картины с пластинкой (1+2) зонами и пластинкой, на которой вторая зона "покрыта" кольцом из оргстекла. Измерьте толщину этого кольца и объясните полученный результат.

5. Аналогичным образом получите следующие графики.

– №3: открыты все четные зоны и открыты все нечетные зоны;

– №4: открыта 1-я зона и установлен диск с диаметром, соответствующим первой зоне.

6. Установите зонную пластинку с отверстием (1+2+3) зоны и рассчитайте расстояния $b_m < b$, на которых на оси oZ должны быть минимумы и максимумы при приближении детектора к экрану. Перемещая экран на соответствующие расстояния b_m на графике №5 снимите картины дифракции в этих точках.

К отчету должны быть представлены графики №№ 1...5 с объяснениями полученных дифракционных картин.