

**«Физико-техническая школа» им. Ж. И. Алфёрова**

## **Роль рэлеевского рассеяния в распространении звука грома**

Выполнила:

ученица 11 «А» класса

Слабнова Д.А.

Руководитель:

Петров П.В.

2020

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Теоретическая часть.....	4
1.1 Рэлеевское рассеяние .....	4
2. Практическая часть.....	6
2.1 Построение спектров сигнала в разные моменты времени.....	6
2.2 Построение зависимости интенсивности волны от времени .....	7
3. Проверка гипотезы.....	12
4. Результаты работы .....	13
Список литературы .....	14

## ВВЕДЕНИЕ

Цель работы: определение роли Рэлеевского рассеяния в распространении звука грома. Проанализировать изменение интенсивности звука и отдельных частот от времени.

Задачи работы:

- 1) Измерить спектры звука в различные моменты времени.
- 2) Рассмотреть изменение интенсивности звука грома со временем.
- 3) Рассмотреть зависимость коэффициента рассеивания от частоты.

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Рэлеевское рассеяние

В большинстве случаев, когда говорят о Рэлеевском рассеянии говорят именно о Рэлеевском рассеянии света. Рэлеевское рассеяние – рассеяние света без изменения длины волны на частицах, неоднородностях или других объектах, когда частота рассеиваемого света существенно меньше собственной частоты рассеивающего объекта или системы. Эквивалентная формулировка – рассеяние света на объектах, размеры которых меньше его длины волны.

Джон Рэлей в 1899 г. произвел расчет интенсивности света, рассеянного на сферических частицах, размеры которых малы по сравнению с длиной волны падающего света, и нашел, что для первоначального естественного света интенсивность рассеянного света равна

$$I = I_0 \frac{9\pi^2 \varepsilon_0^2 N (V')^2}{2\lambda^4 L^2} \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta)$$

здесь  $N$  — число частиц в рассеивающем объеме,  $V'$  и  $\varepsilon$  — объем и диэлектрическая проницаемость частицы,  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость среды, в которой взвешены частицы,  $\theta$  — угол рассеяния,  $I_0$  — интенсивность падающего света,  $L$  — расстояние от рассеивающего объема до точки наблюдения.

Из формулы видно, что Формула Рэля описывает следующие экспериментально открытые до ее вывода закономерности. Интенсивность рассеянного света оказывается обратно пропорциональной четвертой степени длины волны, что находится в соответствии с измерениями и может объяснить голубой цвет неба. Закон  $I \sim 1/\lambda^4$ , носит название закона Рэля.

Из закона Рэля видно, что  $I \sim V^4 / C^4$ , где  $V$  - частота волны,  $C$  — скорость волны, т.е. для волн, имеющих одну и ту же скорость и

распространяющихся в одной и той же среде итоговые интенсивности будет относиться так же, как и частоты в четвёртой степени.

В этой работе мы бы хотели проверить гипотезу о зависимости  $I \sim V^4$  для рассеяния звука. В качестве объекта исследования мы используем звук грома, исходя из следующих предположений:

- молнию считаем бьющей перпендикулярно поверхности (конечно, это довольно грубое допущение).
- энергия звука грома по всей высоте молнии в один и тот же момент одинакова и имеет одинаковый спектр.

Тем самым мы имеем источник звука, равномерно распределённый по высоте. Соответственно звук, издаваемый в каждой точке молнии, находится на разном расстоянии от слушателя. Исходя из этого гром является удобным объектом для исследования, так как мы имеем и текущий сигнал, и в следующий момент времени сигнал с теми же исходными характеристиками, но прошедший большее расстояние.

Для пробного звука я использовала гром грозы из видео, где оператор снимает на уровне нижней точки молнии, а сама молния перпендикулярна поверхности.

## 2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Построение спектров сигнала в разные моменты времени

На рисунках 1 и 2 представлены спектры пробного звука в первую и четвертую секунды соответственно. Можно заметить, что интенсивность наиболее низких частот изменилась лишь на порядок, в то время как интенсивность гармоник с частотой более 5000 Гц уменьшилась более чем на два порядка.

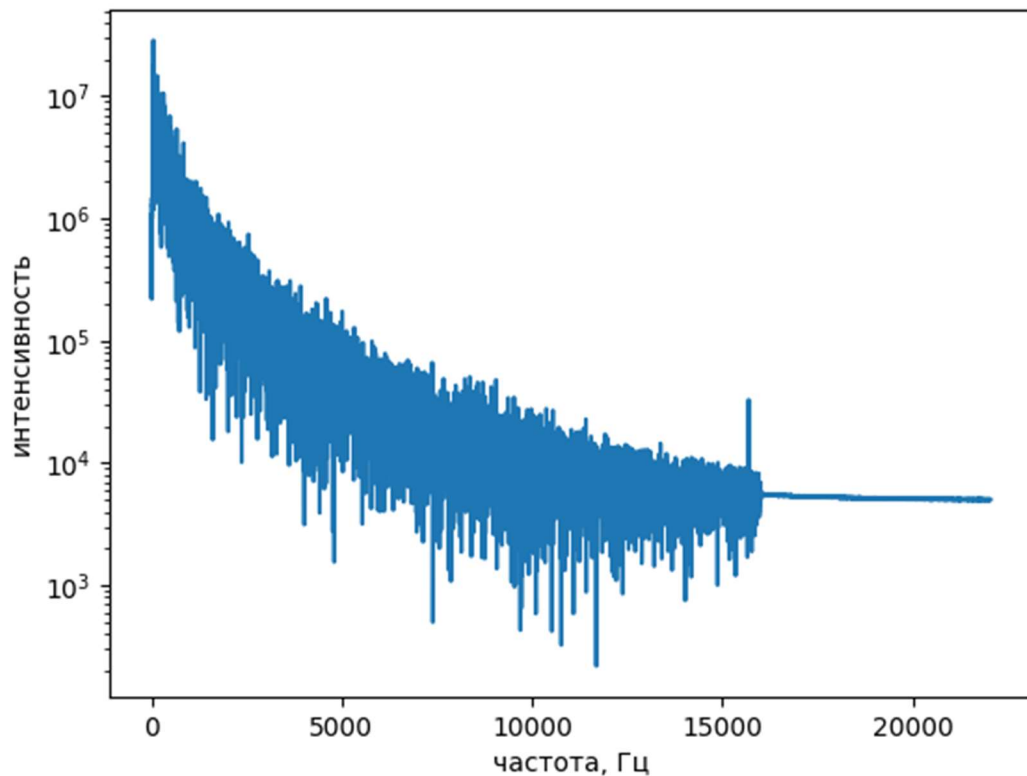


Рисунок 1. Интенсивность звука в первую секунду

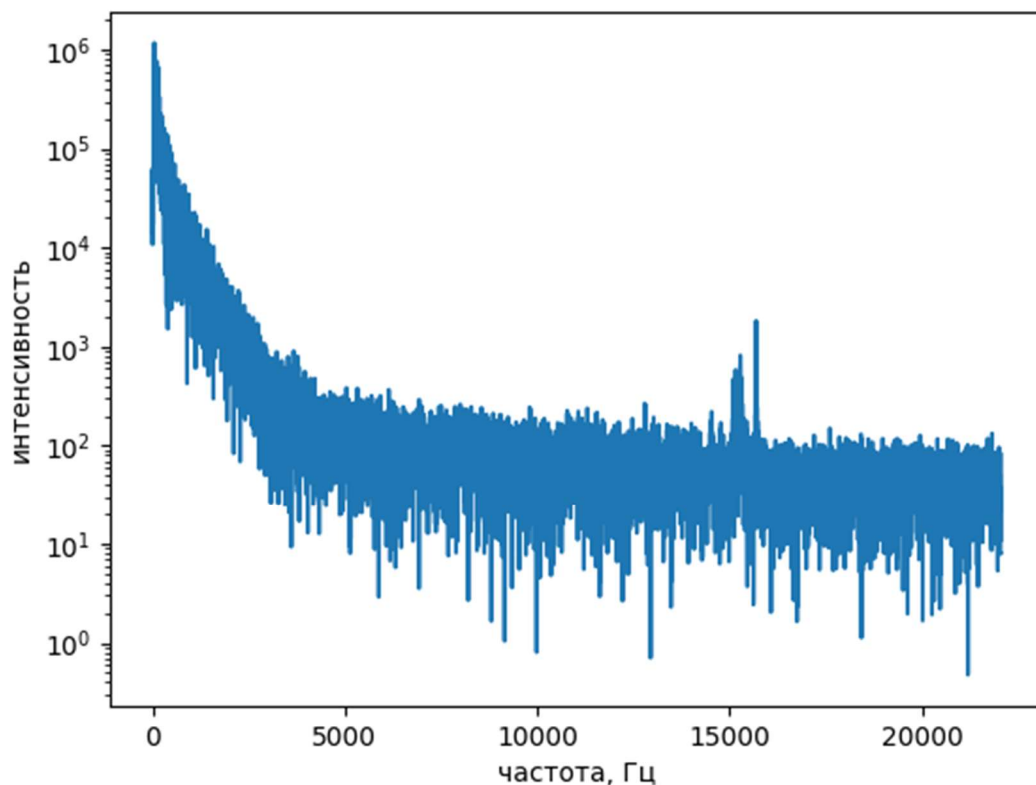


Рисунок 2. Интенсивность звука в четвертую секунду

## 2.2 Построение зависимости интенсивности волны от времени

Напишем программу, которая будет вычислять зависимость интенсивности от времени. Программа не может выделить определённую частоту и в принципе мы не можем выбрать какие-то конкретные частоты для анализа, но можно выбрать диапазон частот и следить за изменением средней интенсивности частот выбранного диапазона. Ниже представлены графики, полученные для пробного звука.

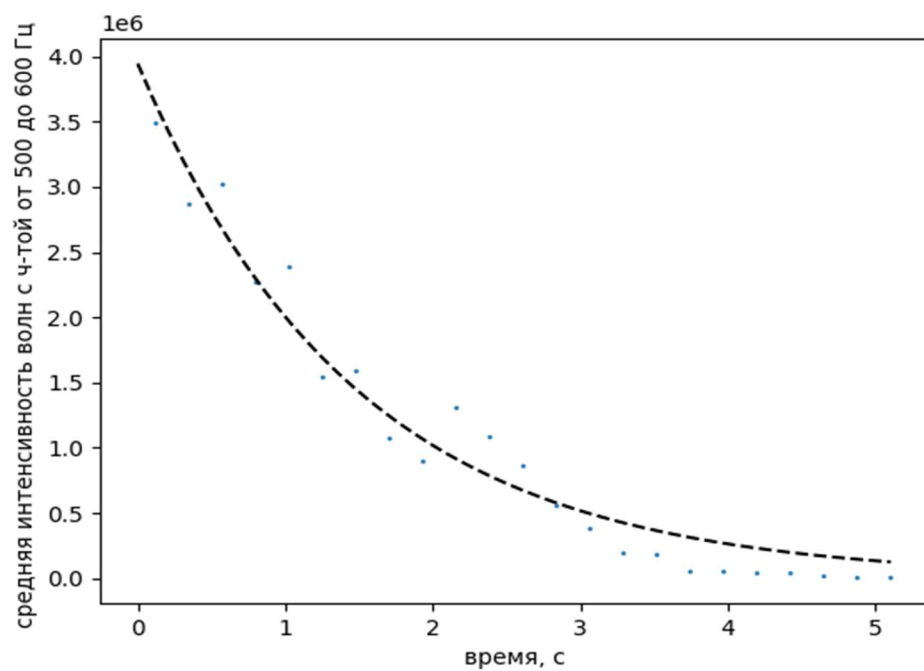


Рисунок 3. Изменение средний интенсивности частот от 500 до 600 Гц

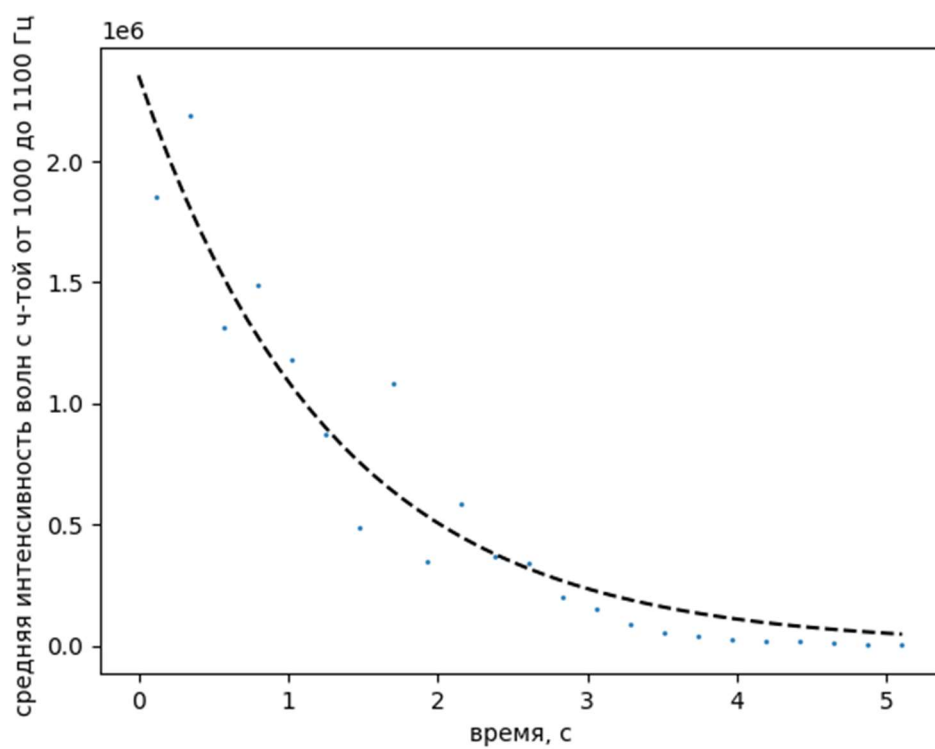


Рисунок 4. Изменение средний интенсивности частот от 1000 до 1100 Гц



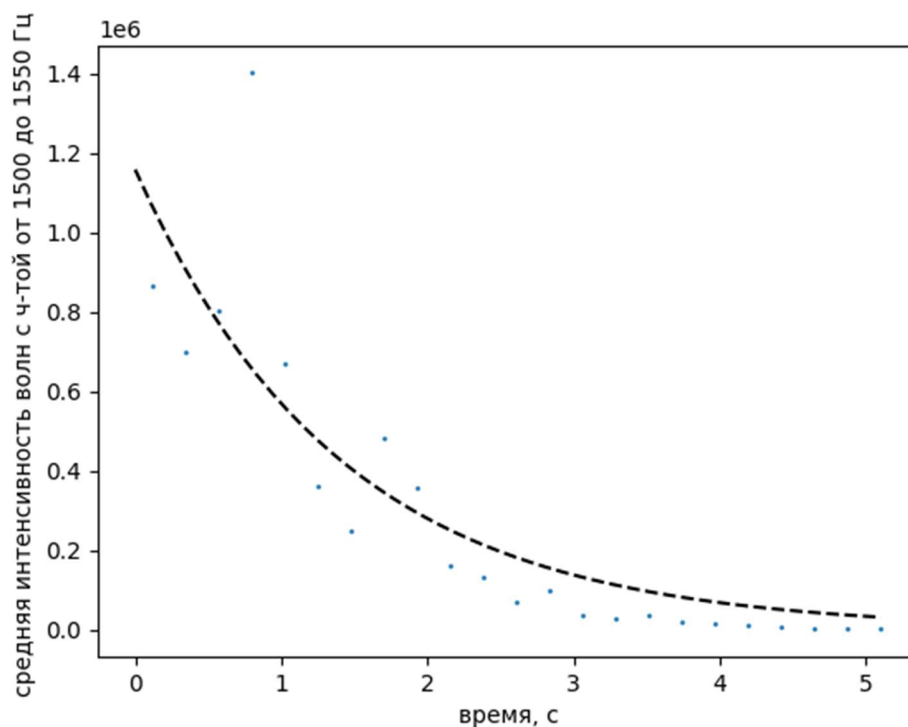


Рисунок 5. Изменение среднй интенсивности частот от 1500 до 1550 Гц

Можно заметить (применяя метод наименьших квадратов), что такое распределение точек лучше всего описывает функция  $I=A \cdot e^{ct}$ , где  $A$  и  $c$  – некие коэффициенты, причём очевидно, что  $A$  зависит от начальной интенсивности звука и имеет ту же размерность, что и интенсивность,  $c$  – может зависеть от характеристик волны и условий среды. В таблице 1 представлены рассчитанные значения коэффициентов для разных диапазонов частот.

Таблица 1.

Диапазон, Гц	A	C
500 - 600	3944643.18	-0.677539
1000-1100	2355095.05	-0.769084
1500-1550	1158251.51	-0.711504

Ниже представлен код программы, которая вычисляет зависимость интенсивности от времени:

```
-----  
from matplotlib import pyplot as plt  
from scipy.io import wavfile  
from scipy.fft import rfft, rfftfreq  
import numpy as np  
import scipy.optimize as opt  
#входные данные - файл и диапазон частот  
filename=input()  
a, b = wavfile.read(filename, mmap=int)  
n, v=map(int, input().split())  
#высчитываем среднюю мощность  
def srez(r, down, up):  
    jup=0  
    jdown=0  
    for i in range(r.size):  
        if r[i]<=up:  
            jup=i  
        else:  
            break  
    for i in range(r.size-1, -1, -1):  
        if r[i]>=down:  
            jdown=i  
        else:  
            break  
    return jdown, jup  
it=[]  
t=0  
while t+10000<b.size:  
    mass=b[t:t+10000]  
    y=np.abs(rfft(mass))  
    x=rfftfreq(y.size, 1/a )  
    down, up=srez(x, n, v)  
    if up!=down:  
        sr=np.sum(y[down:up])/(up-down)  
        it.append(sr)  
    t+=10000  
it=np.array(it)
```

```

xit=np.arange(5000/a, (t+5000)/a, 10000/a)
#подбираем подходящую функцию
def func(x, A, c): #d=0 c<0
    return A*np.exp(c*x)
x_lin = np.linspace(0, xit.max(), 50)
p0 = [7000000, -2]
w, _ = opt.curve_fit(func, xit, it, p0=p0)
y_model = func(x_lin, *w)
print(*w)
#выводим все на график
plt.plot(x_lin, y_model, "k--")
plt.scatter(xit, it, s=1)
plt.xlabel('время, с')
plt.ylabel('средняя интенсивность волн с ч-той от '+str(n)+' до '+str(v)+' Гц ')
plt.show()

```

---

Результат работы программы:

- строит график зависимости интенсивности от времени (см. рисунки 3, 4, 5);
- подбирает аппроксимирующую функцию;
- выводит коэффициенты данной функции.

### 3. ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ

Из формулы приведённой в теоретической части  $I=V^4/C^4*a*I_0$ , где  $V$  – частота волны,  $C$  – скорость волны,  $I_0$  – начальная интенсивность волны,  $a$  – коэффициент, зависящий от условий среды. Можно заметить, что отношение интенсивностей волн, имеющих одну и ту же скорость, прошедших через одну и ту же среду, будет равно отношению их начальных интенсивностей, умноженных на отношение частот в четвёртой степени т.е.

$$I_1= V_1^4/C^4*a*I_{01}$$

$$\Rightarrow I_1 : I_2 = (I_{01} * V_1^4) / (I_{02} * V_2^4), \text{ т.е. } (V_2/V_1)^4=(I_{01}*I_2)/(I_{02}*I_1)$$

$$I_2= V_2^4/C^4*a*I_{02}$$

Рассмотрим значения интенсивностей частот на 0.5 и 2 секундах

Диапазон, средняя частота	$I_0$	$I$
1. 500-600, 550	$2.81*10^6$	$1.02*10^6$
2. 1000-1100, 1050	$1.6*10^6$	$0.506*10^6$
3. 1500-1550, 1525	$0.81*10^6$	$0.28 *10^6$

Тогда для отношений:

$(V_2/V_1)^4$	$(I_{01}*I_2)/(I_{02}*I_1)$
$(550:1050)^4=0.075$	0.87
$(1050:1525)^4=0.22$	1.09
$(550:1525)^4=0.017$	1.05

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Гипотеза не подтвердилась, такой результат возможен из-за неправильной постановки эксперимента, либо, что наиболее вероятно, наше предположение неверно. Однако, исходя из спектров явно видно, что какая-то зависимость присутствует.

Предполагаю, что более корректным экспериментом было бы использовать точечный источник белого шума, измеряя интенсивность звука от него на разных расстояниях.

Практическими результатами работы являются освоение основ цифровой обработки сигналов и изучение математических библиотек python для обработки результатов физических экспериментов.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] “Физика колебаний и волн” Пейн Г. 1979

[2] “Теория звука, том 1” Джон Уильям Стретт

[3] “The Scientist and Engineer’s Guide to Digital signal processing” Steven W. Smith