

*Синельщикова Валерия Вадимовна*¹,
студент магистратуры;
*Ефремов Артём Александрович*²,
доцент, канд. физ.-мат. наук, доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСSEИВАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

^{1,2} Россия, Санкт-Петербург,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
¹ sinelshchicova@gmail.com, ² artem.efremov@spbstu.ru

Аннотация. Тема этой работы: «Исследование частотных характеристик рассеивания гидроакустического сигнала». Данная работа посвящена изучению частотных характеристик рассеянного гидроакустического сигнала. В результате был исследован спектр рассеянного сигнала с помощью специально разработанного программного обеспечения, которое использует алгоритмы интерполяции и численных методов.

Ключевые слова: гидроакустический сигнал, спектр, ультразвук, эффект Доплера, интерполяция, метод трапеции, метод Симпсона, рассеивание сигнала.

*Valeriia V. Sinelshchikova*¹,
Master's Student;
*Artem A. Efremov*²,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

A STUDY OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF HYDROACOUSTIC SIGNAL DISPERSION

^{1,2} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia,
¹ sinelshchicova@gmail.com, ² artem.efremov@spbstu.ru

Abstract. The topic of this work: “Research of frequency characteristics of scattering of hydroacoustic signals.” This work is devoted to the study of the frequency characteristics of a scattered hydroacoustic signal. As a result, the spectrum of the scattered signal was studied using specially developed software using interpolation algorithms and numerical methods.

Keywords: hydroacoustic signal, spectrum, ultrasound, Doppler effect, interpolation, trapezoidal method, Simpson method, signal scattering.

Введение

Гидроакустика сегодня — это решение огромного числа задач разной сложности, относящиеся к [3]:

1. Распознаванию и выявлению шума, а также выявлению его направления;
2. Обнаружению объекта и нахождение его координат;
3. Проведение классификации полученных сигналов.

Сегодня человек использует гидроакустику в таких направлениях своей деятельности, как

1. Задачи, военной специализации;
2. Навигации в водных средах;
3. Задачи, связанные со звуковой подводной связью;
4. Обнаружение рыбы и рыбных косяков;
5. Проведение исследований в сфере океанологии;
6. Изучение океанического дна;
7. Обучение морских животных.

В данной работе будет рассмотрен ультразвук, а также поверхностная реверберация. Паперно в своей работе рассматривал похожую задачу [5]. Данная работа основывается на его исследованиях.

1. Постановка задачи и теоретическая часть

Под гидроакустическим сигналом будем понимать акустическое поле в водной среде или процесс, наблюдаемый в некоторой ее точке, несущие информацию о свойствах среды, ее неоднородностях, поверхности, грунте и источниках.

Общеизвестно, что никакие из электромагнитных волн не могут распространяться в водной среде на большие, значительные расстояния. Из этого выходит, что вариант использования звука является единственной возможностью для связи под водой. Именно поэтому гидроакустика применяется практически везде [1].

Проблема разработки моделей гидроакустических сигналов имеет большое значение при постановке и решения целого ряда задач, связанных с развитием гидроакустических методов исследования океана, методов статистических измерений в гидроакустике и т. д.

Реверберация, по сути — это послезвучание, наблюдаемое в море в результате отражения и рассеяния исходного звука [4]:

- от дна (донная реверберация);
- от взволнованной поверхности (поверхностная реверберация);

- от неоднородностей водной среды, рыб и других биологических объектов (объемная реверберация).

Для нахождения спектра рассеянного гидроакустического сигнала необходимо проинтегрировать по телесному углу функцию вида [5]

$$D^2(\varphi, \theta) S_s^2(f, \varphi, \theta, r) m_{об}(\varphi, \theta, r).$$

Функция состоит из диаграммы направленности (D), спектра излучения (S_s) и коэффициента обратного рассеивания ($m_{об}$).

Тело неподвижно относительно излучателя, обтекается водой. На рисунке 1 схематично представлено тело сбоку.

Спектр излучения можно рассчитать следующим способом:

$$S_s(f, \varphi, \theta, r) = \sin c[\tau_s \omega(f, \varphi, \theta, r)] \sin c[\tau_f \omega(f, \varphi, \theta, r)]. \quad (1)$$

Круговая частота сдвига

$$\omega(f, \varphi, \theta, r) = \pi \left\{ f - f_s \left[1 + \frac{2}{c_s} (v_{гп} \cos \varphi \sin \theta + v_T(\varphi, \theta, r) \cos(\Phi - \varphi)) \right] \right\}, \quad (2)$$

где Φ — курсовой угол наблюдения,

f_s — частота излучения;

$v_{гп}$ — скорость гидролокатора.

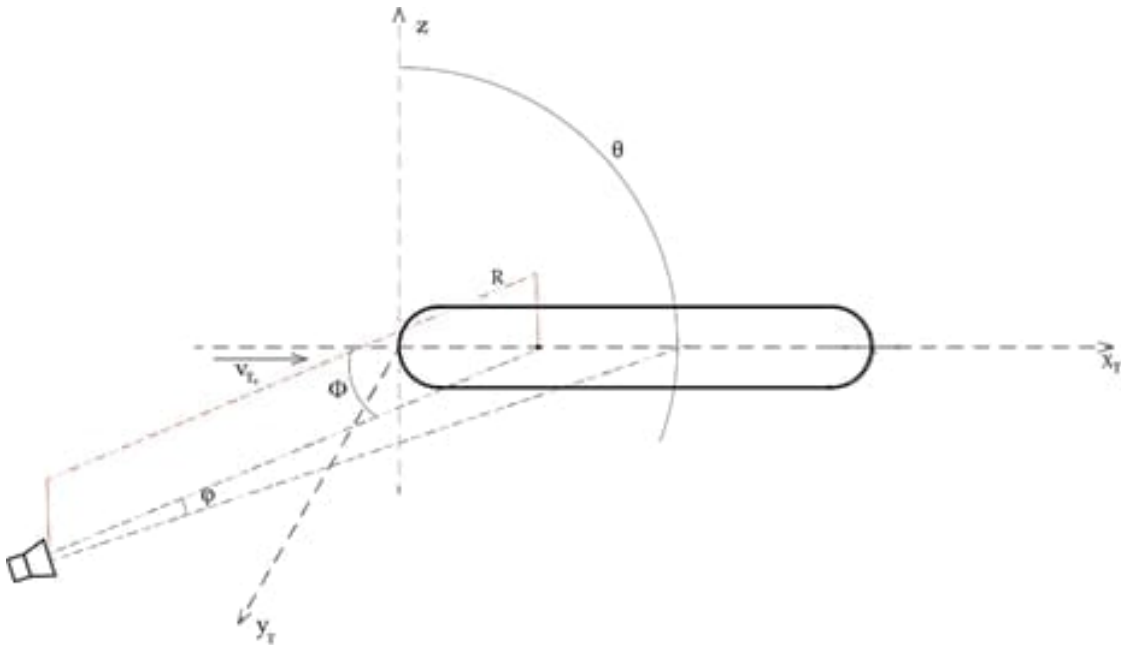


Рис. 1. Схема задачи:

V_{T0} — скорость течения набегающего потока; Φ — курсовой угол объекта; φ — угол раскрытия; θ — азимут; R — расстояние от гидролокатора до тела

Огибающая излученного импульса имеет трапецеидальную форму, которая имеет длительность основания огибающей T_0 и вершины трапеции T_B . Средняя длительность сигнала и длительность фронта соответственно рассчитываются следующим образом

$$\tau_s = \frac{T_0 + T_B}{2}, \quad (3)$$

$$\tau_f = \frac{T_0 - T_B}{2}. \quad (4)$$

Эффективная длительность

$$T_e = T_B + \frac{T_0 - T_B}{3}. \quad (5)$$

Скорость гидролокатора рассчитывается как

$$v_{г\lambda} = -v_{T0} \cos \Phi, \quad (6)$$

где v_{T0} — скорость течения набегающего потока.

Коэффициент обратного рассеивания рассчитывается следующим образом:

$$m_{об}(\varphi, \theta, r) = \frac{m_{таб}(\varphi, \theta, r)}{3000} + 10^{-9}. \quad (7)$$

Таким образом, математическая модель для нахождения спектра рассеянного сигнала имеет вид

$$S(f) = \int_R^{R + \frac{T_e \cdot c_s}{2}} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\frac{\pi}{2} - \theta_1}^{\frac{\pi}{2} + \theta_2} D^2(\varphi, \theta) S_s^2(f, \varphi, \theta, r) \times \\ \times m_{об}(\varphi, \theta, r) \sin \theta d\theta d\varphi dr, \quad (8)$$

где D — диаграмма направленности,

$m_{об}$ — коэффициент обратного рассеивания,

r — текущее расстояние,

T_e — эффективная длительность импульса,

c_s — скорость распространения звуковой волны в среде,

R — расстояние от гидролокатора до момента рассеивания,

φ — относительный азимут,

θ — угол места,

f — текущая частота.

Примем $D^2=1$ в пределах интегрирования для данной задачи.

Для вычисления диапазона частот рассеянного сигнала необходимо воспользоваться следующим уравнением:

$$f = f_s \left(1 - \frac{2 \cos(\Phi) v_t}{c} \right) \pm 250. \quad (9)$$

Данная формула составлена на основе эффекта Доплера, которым можно представить следующим образом

$$f = f_0 \left(1 + \frac{u}{c} \right), \quad (10)$$

где u — скорость приёмника относительно среды (положительная, если он движется по направлению к источнику);

c — скорость распространения волн в среде.

2. Эксперименты и выводы

Для того чтобы можно было посчитать спектр рассеивающего сигнала, необходимо вычислить координаты каждой точки, и впоследствии использовать метод интерполяции.

В работе были вычислены необходимые координаты и проведена дальнейшая интерполяция исходных данных.

Для наглядности распределим алгоритм интерполяции расчетов на 2 этапе и занесем его в таблицу 1.

Далее применены численные методы для приближенного вычисления тройного интеграла в формуле 8. Для решения задачи требуется приближенно вычислить тройной интеграл

$$I = \int_a^b \int \int f(x, y, z) dx dy dz,$$

где $f(x, y, z)$ — непрерывная на отрезке $[a, b]$ функция.

Далее воспользуемся методом трапеции, суть которого представлена ниже [2].

Таблица 1

Этапы интерполяции

Этап	Описание этапа
Этап 1	<p>Сначала происходит линейная интерполяция вспомогательных точек</p> $N_1 = (x, y_1),$ $N_2 = (x, y_2).$ <p>Далее производим расчет:</p> $f(N_1) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(M_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(M_{21})$ $f(N_2) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(M_{21}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(M_{22})$
Этап 2	<p>Теперь интерполируем между вспомогательными точками N_1 и N_2</p> $f(L) \approx f(N_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} (f(N_2) - f(N_1))$ <p>В итоге получаем интерполируемое значение нашей заданной функции</p> $f = (x, y).$

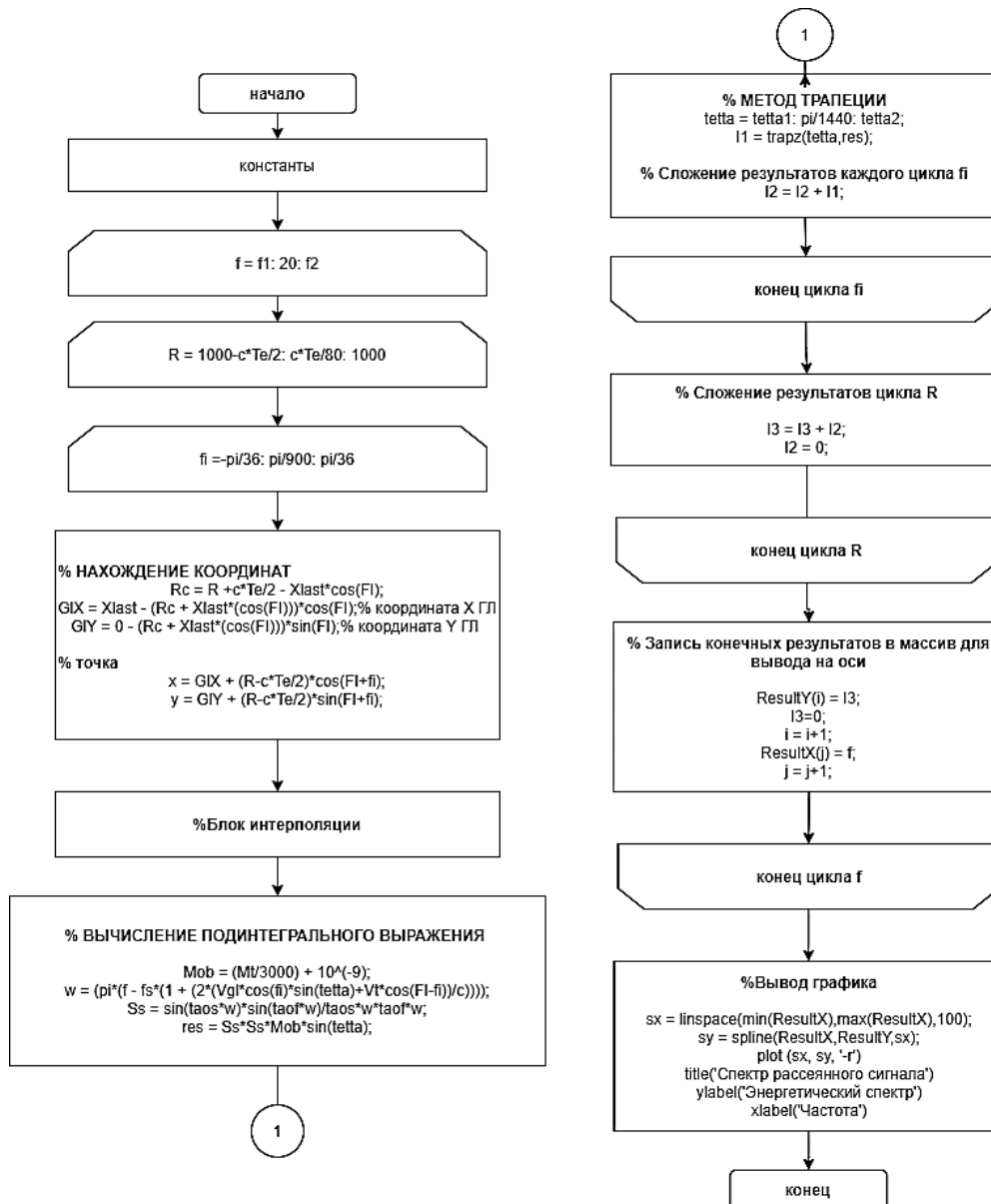


Рис. 2. Блок-схема программы расчета спектра отраженного гидроакустического сигнала

Пусть

$$f \in C^2[0, h].$$

Тогда

$$I = \int_0^h f(x) dx \approx \sum_{n=1}^N \frac{h_n}{2} (f(x_{n-1}) + f(x_n)). \quad (11)$$

Следующее выражение необходимо для вычисления тройного интеграла

$$I = \int_a^b \int \int f(x, y, z) dx dy dz \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \frac{h_{ijk}}{2} (f(x_{ijk-1}) + f(x_{ijk})).$$

Все вышеперечисленное было реализовано в программе Matlab. На рисунке 2 представлена блок-схема разработанной программы с использованием метода трапеции.

Далее на рисунке 3 показана блок-схема программы для расчета интерполяции.

В результате работы разработанной программы были получены графики при разных начальных значениях.

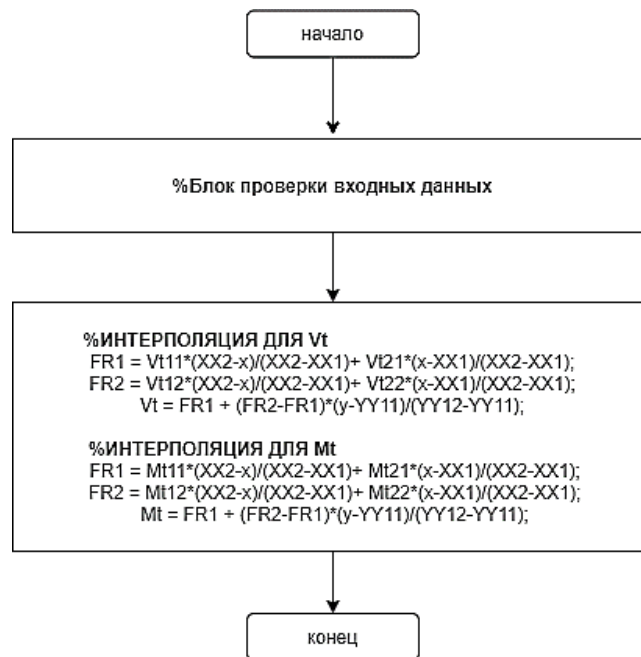


Рис. 3. Блок-схема программы для интерполяции

На рисунке 4 представлен график спектра рассеянного сигнала при $\Phi = 30^\circ$, $X_{\text{посл}} = 36$, $T_0 = 0.05$, $T_B = 0.04$, $f_s = 25000$, $R = 1000$.

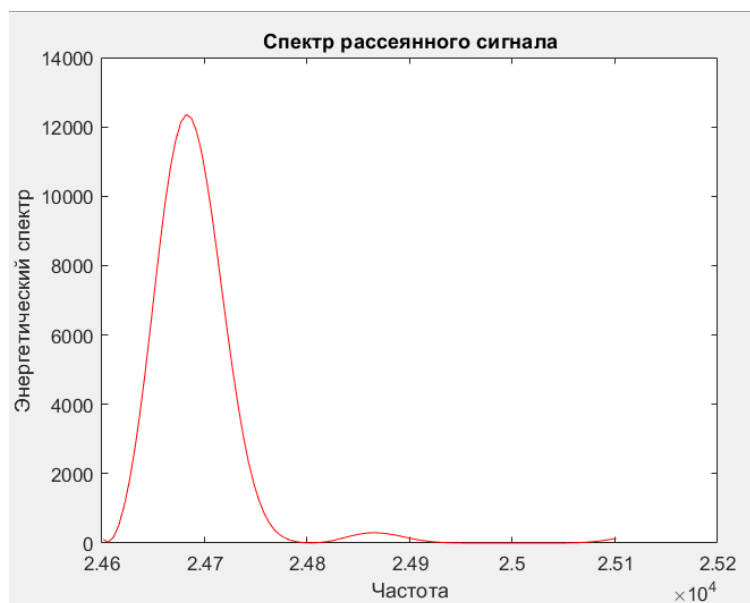


Рис. 4. График спектра рассеянного сигнала при $\Phi = 30^\circ$

Далее примем $\Phi = 45^\circ$

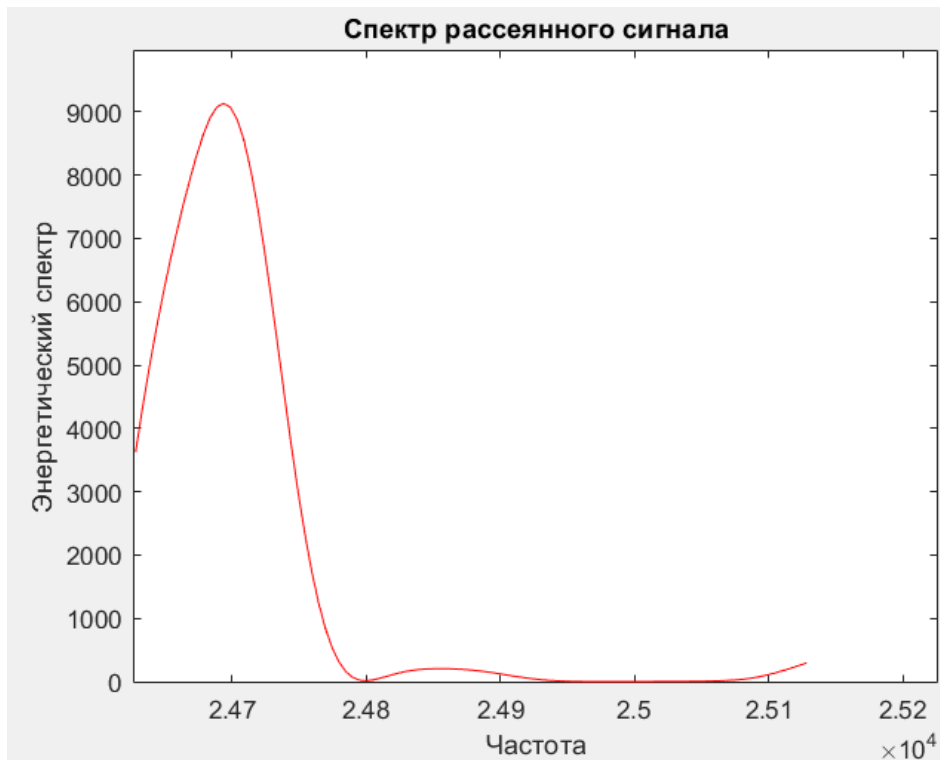


Рис. 5. График спектра рассеянного сигнала при $\Phi = 45^\circ$

Далее примем $\Phi = 90^\circ$

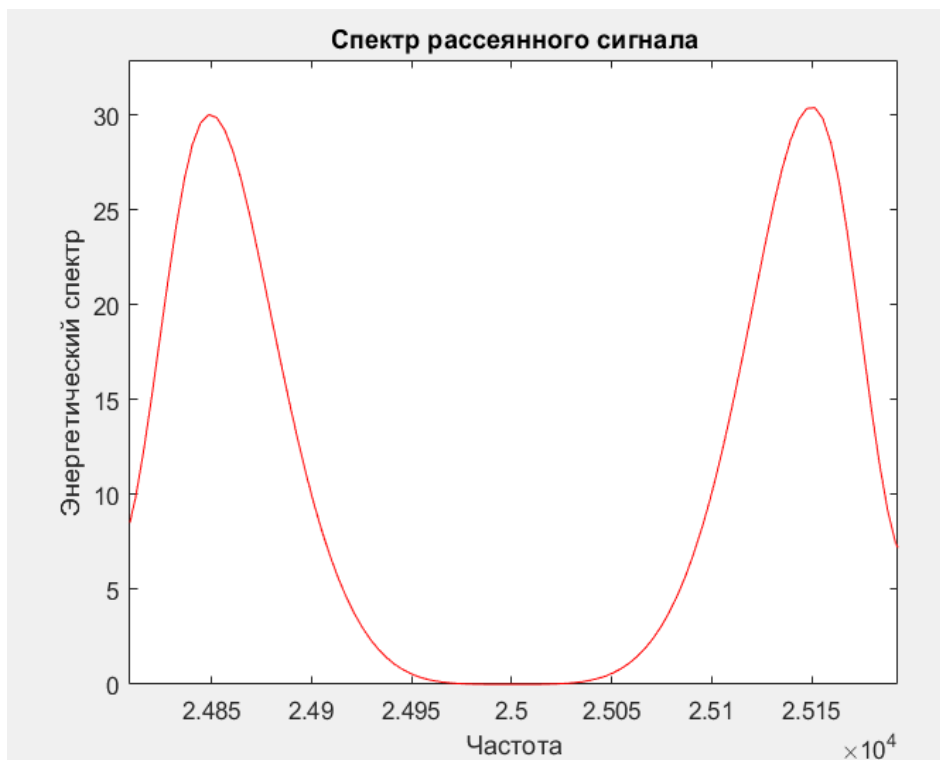


Рис. 6. График спектра рассеянного сигнала при $\Phi = 90^\circ$

Далее примем $\Phi = 180^\circ$

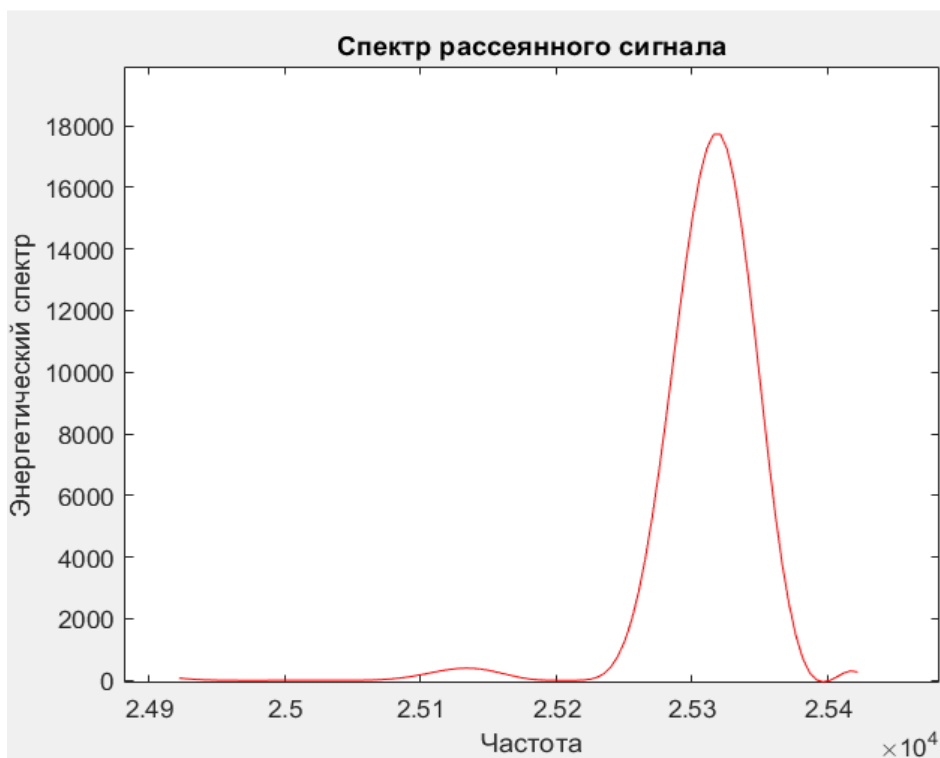


Рис. 7. График спектра рассеянного сигнала при $\Phi = 180^\circ$

В результате работы было синтезировано уравнение, разработан и реализован алгоритм для решения поставленной задачи, а также выполнена серия вычислительных экспериментов.

Заключение

В работе была выведена математическая модель для нахождения спектра гидроакустического сигнала, проанализированы экспериментальные данные, разработана вычислительная схема, а также реализована программа в среде Matlab и проведены вычислительные эксперименты.

Список литературы

1. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. Звуковые и ультразвуковые волны большой интенсивности. – М.: Наука, 1966. – 519 с.
2. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
3. Лепендин Л.Ф. Акустика. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
4. Ольшевский В.В. Статистические свойства морской реверберации. – М.: Наука, 1966. – 202 с.
5. Паперно А.И. Исследования спектральных характеристик морской реверберации при движении акустических антенн // Тр.1-й Всес. шк.–семинара по стат. гидроакустике. – Новосибирск: Наука, 1970. – С.39–45.