

Дифракция света на ультразвуковой волне

Шмаков Владимир - Б04-105

МФТИ - февраль 2023

Введение

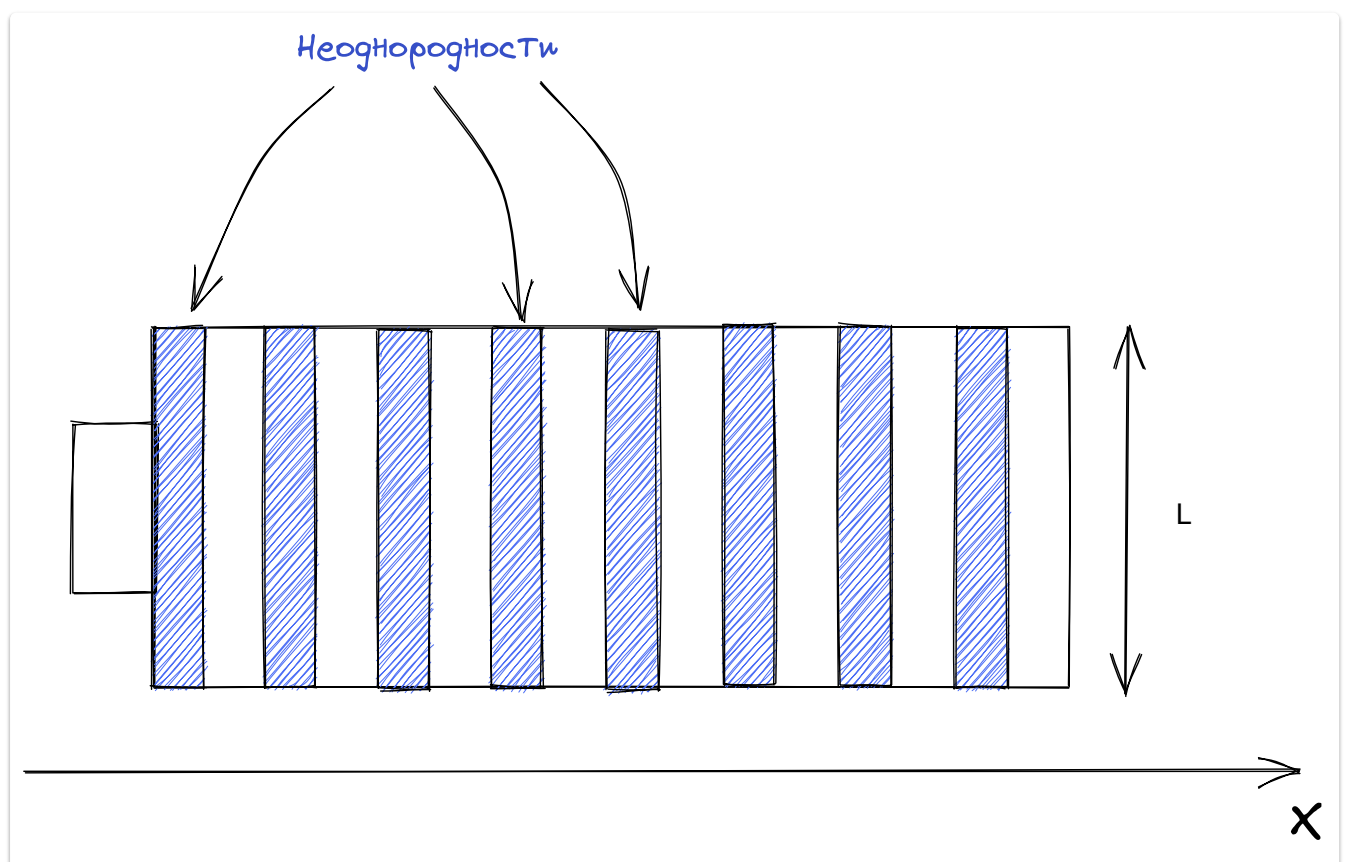
В работе изучается дифракция света на синусоидальной акустической решетке. Метод тёмного поля даёт возможность пронаблюдать фазовую решетку.

Цель работы

- Изучить дифракцию света на амплитудной и фазовой акустической решетке
- Определить скорость ультразвука в воде

Теоретические сведения

При прохождении УЗ волны через жидкость в ней возникают периодические неоднородности коэффициента преломления:



Распределение коэффициента преломления n описывается формулой:

$$n = n_0(1 + m \cos(2\pi x/\Lambda)) \quad (1)$$

где Λ - длина УЗ волны, m - глубина модуляции, определяемая амплитудой волны

Неоднородность коэффициента преломления вызывает неоднородность фаз выходящих волн - возникает фазовая решетка. Распределение фазы описывает формула (2):

$$\varphi = knL = \varphi_0(1 + a \cos 2\pi x/\Lambda) \quad (2)$$

Опишем дифракцию на синусоидальной фазовой решетке. При малых коэффициентах модуляции, функция пропускания описывается формулой:

$$t(x) \approx 1 + im \cos \Omega x = 1 + \frac{im}{2} e^{i\Omega x} + \frac{im}{2} e^{-i\Omega x}$$

А значит, распределение амплитуды волн описывается формулой:

$$f(x, z) = ae^{ikz} + \frac{iam}{2} e^{i(\Omega x + \sqrt{k^2 - \Omega^2}z)} + \frac{iam}{2} e^{i(-\Omega x + \sqrt{k^2 - \Omega^2}z)} \quad (3)$$

В общем случае световое поле представляет из себя сумму большого числа плоских волн, распространяющихся под углами, определяемыми условием:

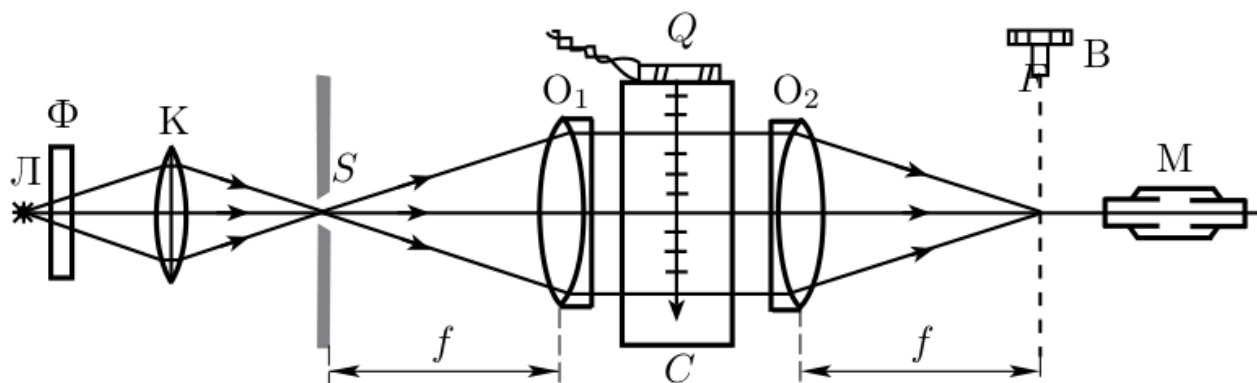
$$\Lambda \sin \psi_m = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (4)$$

Методика

Оборудование

- Оптические приборы
 - Оптическая скамья
 - Осветитель
 - Светофильтры
 - Конденсатор
 - Два длиннофокусных объектива
 - Линза
 - Микроскоп
- Прочее
 - Щель
 - Кювета с водой
 - Пьезодинамик
 - Генератор УЗ - частоты
 - Частотомер

Экспериментальная установка



На вход изображенной выше оптической схемы подаётся монохроматическая волна, длина которой определяется выбранным светофильтром Φ . Колебания в жидкости возбуждаются при помощи пьезодинамика закреплённого на кювете C .

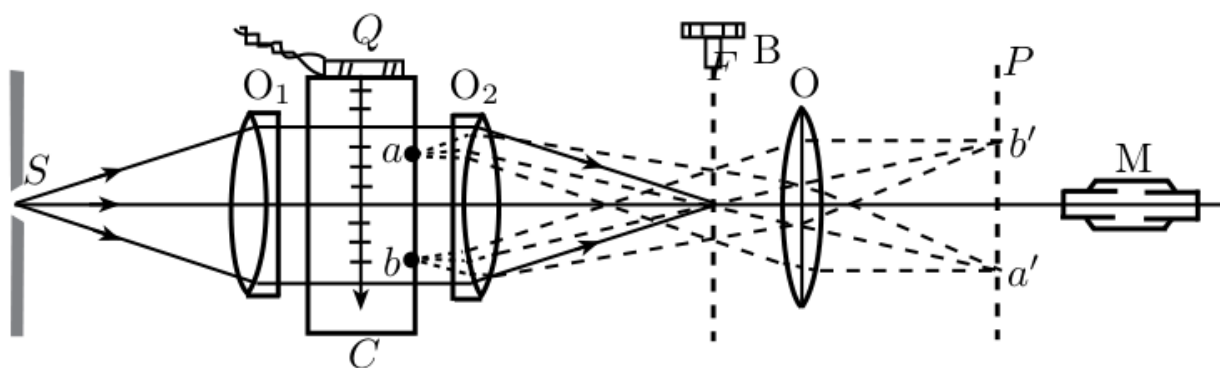
На пьезодинамик подаётся переменное напряжение с генератора, частота которого определяется частотометром.

Считаем углы ψ_m достаточно малыми. Тогда, формула (4) упрощается. Для нахождения длины волны будем использовать:

$$\Lambda = mf \frac{\lambda}{l_m}$$

Для моей установки используется красный фильтр, пропускающий длину волны: $6400 \pm 200 \text{ \AA}$. Фокусное расстояние линз O_1 и O_2 - $f = 30 \text{ см}$.

Для наблюдения оптических неоднородностей, создаваемых УЗ волной в жидкости соберём следующую оптическую систему:



Собирающая линза O позволяет получить изображение задней плоскости кюветы ($a - b$). Однако фазовая картина всё равно остаётся невидимой. Поэтому необходимо закрыть главный дифракционный максимум при помощи проволоки.

Так, несущая гармоника фазомодулированного сигнала поглощается, и результирующее распределение интенсивности света определяется по формуле:

$$f(x) = \frac{im}{2} e^{i\Omega x} + \frac{im}{2} e^{-i\Omega x} = im \cos \Omega x \Rightarrow I(x) = f^2 = m^2 \cos^2 \Omega x = m^2 \frac{1 + \cos^2 2\Omega x}{2}$$

Отсюда можем заметить что, расстояние между близлежащими тёмными полосами есть $\Lambda/2$.

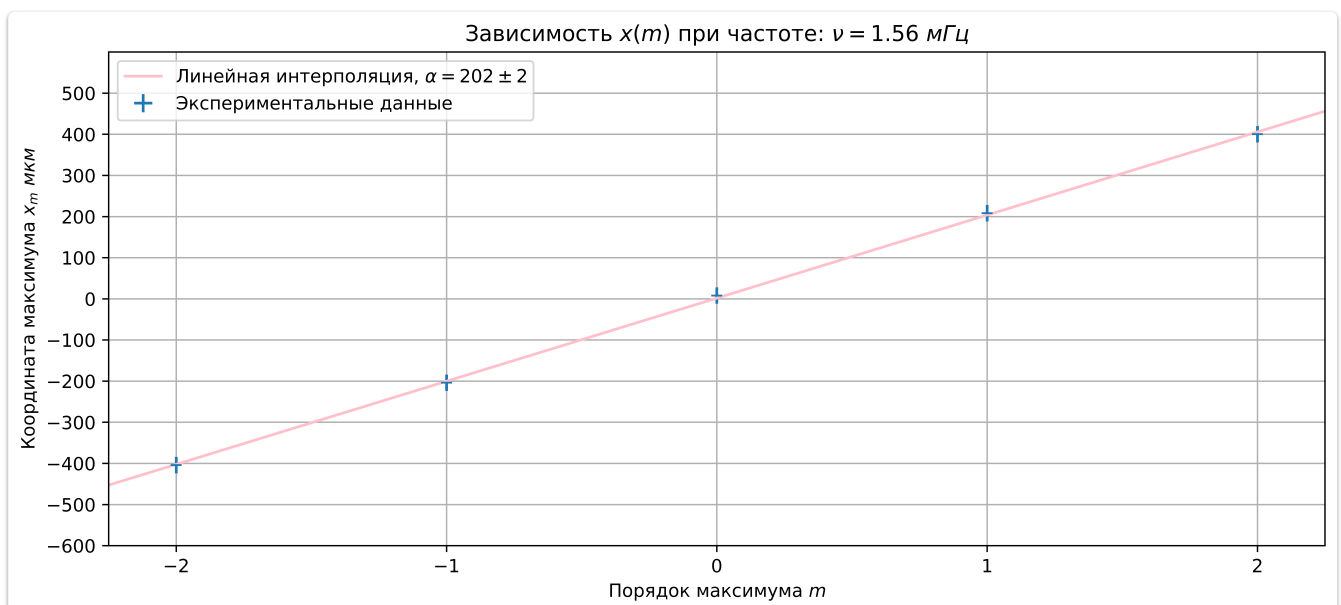
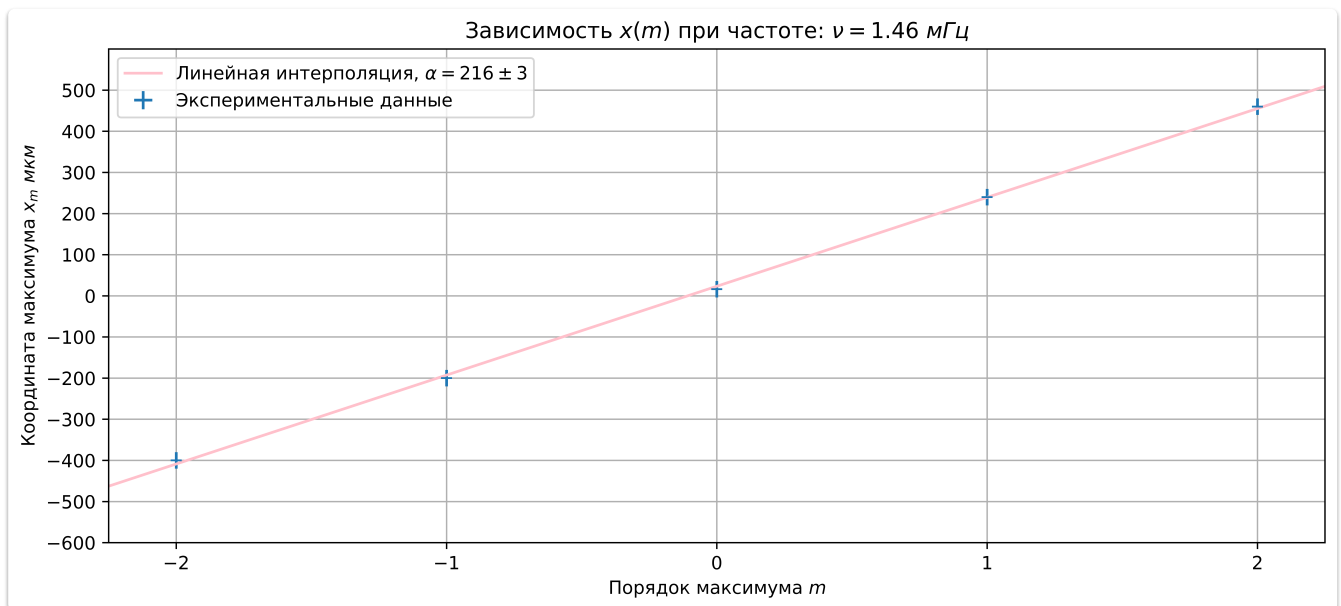
Обработка результатов

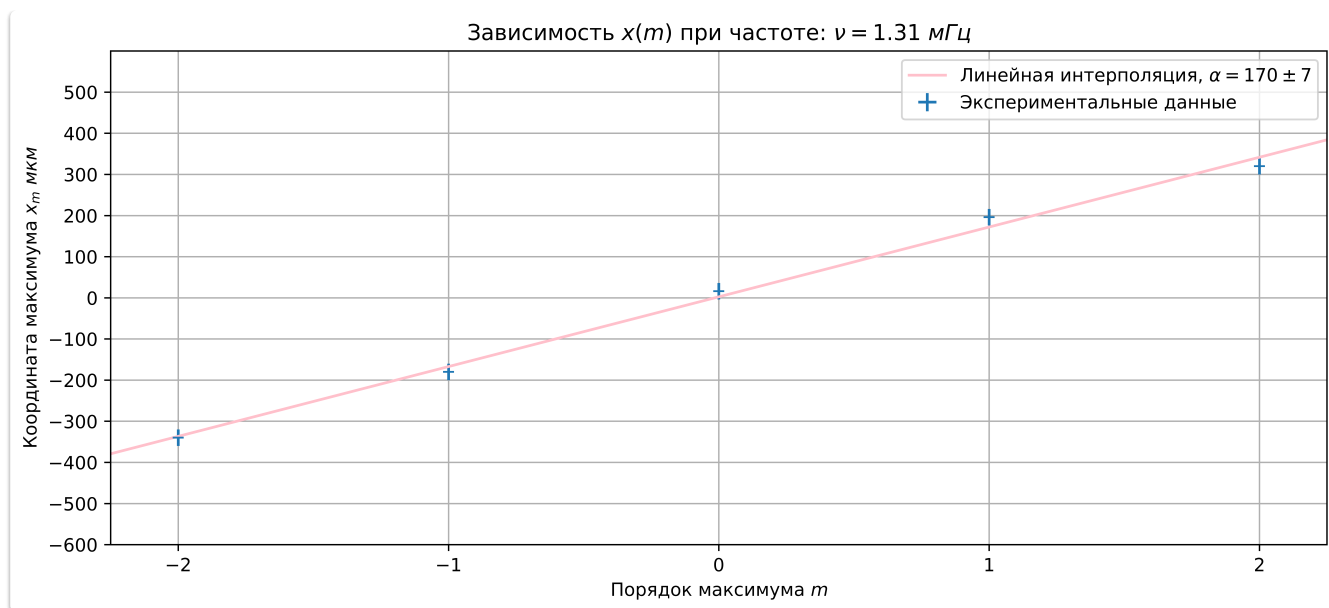
Эксперимент 1 - Определение скорости ультразвука по дифракционной картине

Настроим установку согласно инструкции:

- Проведём юстировку цепи
- Сфокусируем микроскоп на изображении щели S (см. описание установки) - поместим микроскоп в фокальную плоскость объектива O_2
- Включим генератор УЗ частоты, и получим дифракционную картину (картина наблюдается на частотах порядка одного мегагерца)

Измерим положения дифракционных максимумов, и построим зависимости положения максимума от его порядка. В результате трёх экспериментов при частотах (1.46, 1.56, 1.31 МГц) получены следующие зависимости:





По формуле $\Lambda = f\lambda/\alpha$ можем определить длину волны. Для определения погрешностей используем метод частных производных:

$$\Delta\Lambda_\alpha = \frac{\partial\Lambda}{\partial\alpha}\Delta\alpha = -\frac{\Lambda}{\alpha}\Delta\alpha \quad \Delta\Lambda_\lambda = \frac{\partial\Lambda}{\partial\lambda}\Delta\lambda = \frac{\Lambda}{\lambda}\Delta\lambda$$

Домножив длину волны на частоту, узнаем скорость распространения УЗ:

Номер эксперимента	Скорость звука [м/с]	Длина волны [мм]
1	1300 ± 40	0.89 ± 0.03
2	1480 ± 50	0.95 ± 0.03
3	1480 ± 70	1.13 ± 0.06

Согласно источнику википедия, скорость ультразвука в воде при комнатной температуре равна 1500 м/с. Таким образом значения, полученные в экспериментах 2 и 3 в пределах погрешности совпали с «табличным». Эксперимент является достаточно точным, погрешность составляет примерно 4%.

Эксперимент 2 - Определение скорости ультразвука методом тёмного поля

Для наблюдения акустической решетки могут быть использованы два метода. А именно - **метод фазового контраста**(изменение фазы несущей на $\pi/2$), или **метод тёмного поля**(устранение несущей гармоники).

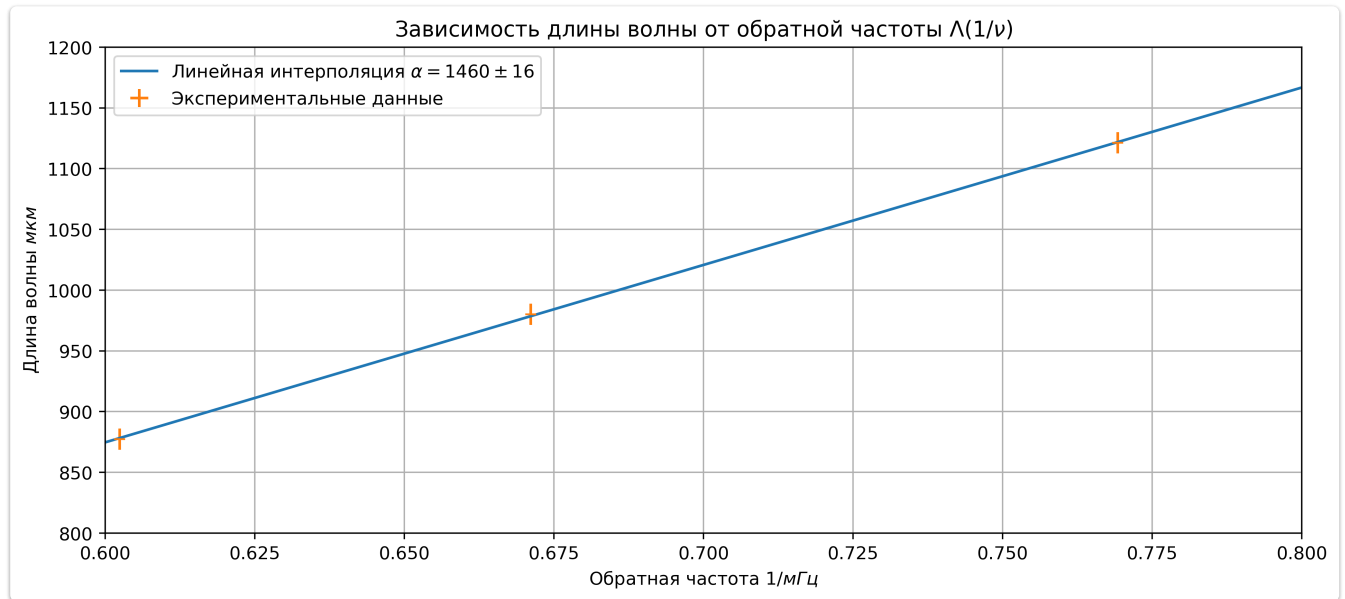
Закроем центральный дифракционный максимум вертикальной нитью. С помощью окулярной шкалы измерим расстояние между самой дальней и самой ближней тёмной полосой. «Частота» акустической решетки прямо пропорциональна длине ультразвуковой волны:

$$\Lambda = 2 \cdot \frac{Qc}{q-1}$$

(где q - число тёмных полос, c - цена деления, Q - число делений)

Для оценки погрешности заметим, что тёмная полоса может закрывать сразу несколько делений (в моём случае четыре деления). Таким образом, погрешность измерения Q - $\Delta Q = 4 \text{ дел.}$

Для каждой из полученных дифракционных картин определим длину волны. Построим график $\Lambda(1/\nu)$, и методом наименьших квадратов определим скорость распространения УЗ волн:



Результат отличается от табличного значения на 3%. Эксперимент можно считать достаточно точным

Вывод

В работе удалось оценить скорость распространения ультразвука в воде. Результаты экспериментов в пределах погрешности совпали с табличными значениями.

Удалось пронаблюдать акустическую решетку методом тёмного поля.