

Дифракция света на ультразвуковой волне (4.3.2)

Стеценко Георгий, Б02-312

1 Аннотация

Цель работы: Изучение дифракции света на синусоидальной акустической решётке и наблюдение фазовой решётки методом тёмного поля.

Оборудование и материалы: оптическая скамья, осветитель, два длиннофокусных объектива, кювета с жидкостью, кварцевый излучатель с микрометрическим винтом, генератор ультразвуковой частоты, линза, вертикальная нить на рейтере, микроскоп.

2 Теоретические сведения

При прохождении ультразвуковой волны через жидкость в ней возникают периодические неоднородности коэффициента преломления, создаётся фазовая решётка, которую мы считаем неподвижной ввиду малости скорости звука относительно скорости света. Показатель преломления n изменяется по закону:

$$n = n_0(1 + m \cdot \cos \Omega x) \quad (1)$$

Здесь $\Omega = 2\pi/\Lambda$ – волновое число для ультразвуковой волны, $m \ll 1$ – глубина модуляции n .

Положим фазу φ колебаний на передней стенке кюветы равной нулю, тогда на задней поверхности она равна:

$$\varphi = knL = \varphi_0(1 + m \cdot \cos \Omega x) \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число света, L – длина кюветы, $\varphi_0 = kn_0L$ – константа.

Тогда кювету можно считать чисто фазовой решёткой с фазовым пропусканием

$$t(x) = \exp(im \cos(\Omega x))$$

Полагая, что глубина модуляции $m \ll 1$, получим $t(x) \approx 1 + im \cos \Omega x = 1 + im/2 (e^{i\Omega x} + e^{-i\Omega x})$. При освещении этой решётки плоской нормально падающей волной амплитуды a имеем за решёткой:

$$f(x, z) = a \exp(ikz) + \frac{iam}{2} \exp i(\Omega x + \sqrt{k^2 - \Omega^2}z) + \frac{iam}{2} \exp i(-\Omega x + \sqrt{k^2 - \Omega^2}z)$$

По сути в случае идеальной фазовой решётки имеем три дифракционных максимума Фраунгофера, собираемых линзой в своей фокальной плоскости.

3 Экспериментальная установка

Источник света Л через светофильтр Ф и конденсор К освещает щель S, которая расположена в фокусе объектива О₁. Выходящий из объектива параллельный пучок света проходит через кювету С перпендикулярно направлению распространения УЗ-волн. Эти волны возбуждаются в жидкости пьезокварцевой пластинкой Q, прикреплённой к стенке кюветы. На кварцевую пластинку подаётся напряжение ультразвуковой частоты от генератора (на рисунке не показан). В фокальной плоскости второго объектива О₂ образуется дифракционная картина, наблюдаемая при помощи микроскопа М. При этом обязательно применяют монохроматическое излучение (красный светофильтр).

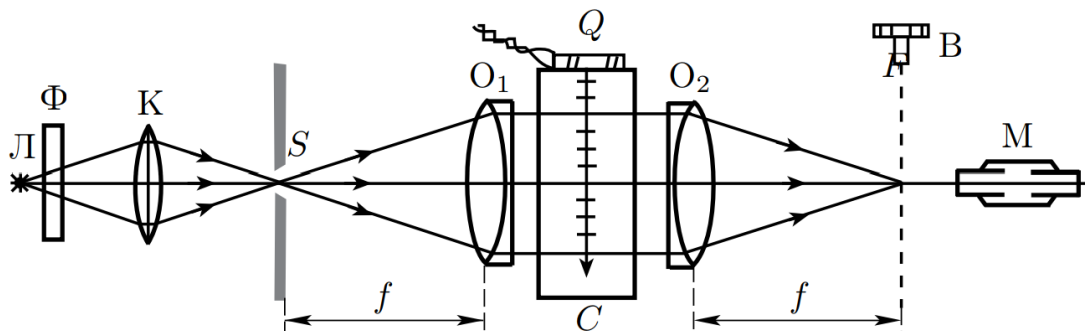


Рис. 1: Схема установки

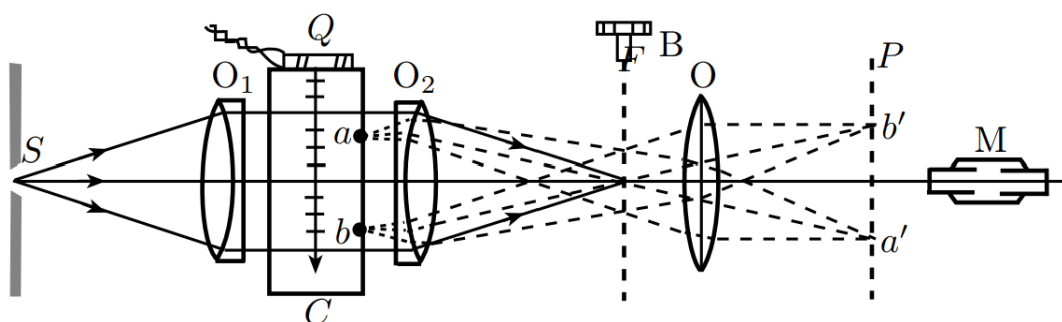


Рис. 2: Схема установки для измерения методом тёмного поля

Теперь получим изображение фазовой решётки. Для этого используем метод «тёмного поля» – закрывания центрального максимума в дифракционной картине с помощью тонкой нити и на рейтере. В поле зрения микроскопа при этом образуется изображение фазовой решётки с шириной линии $\Lambda/2$, где Λ – длина УЗ-волны в воде.

Данные об установке:

- Фокусное расстояние линзы O2 $F_2 = 28$ см;
- Длина волны $\lambda = (640 \pm 20)$ nm.

4 Методика измерений и результаты

4.1 Определение скорости ультразвука по дифракционной картине

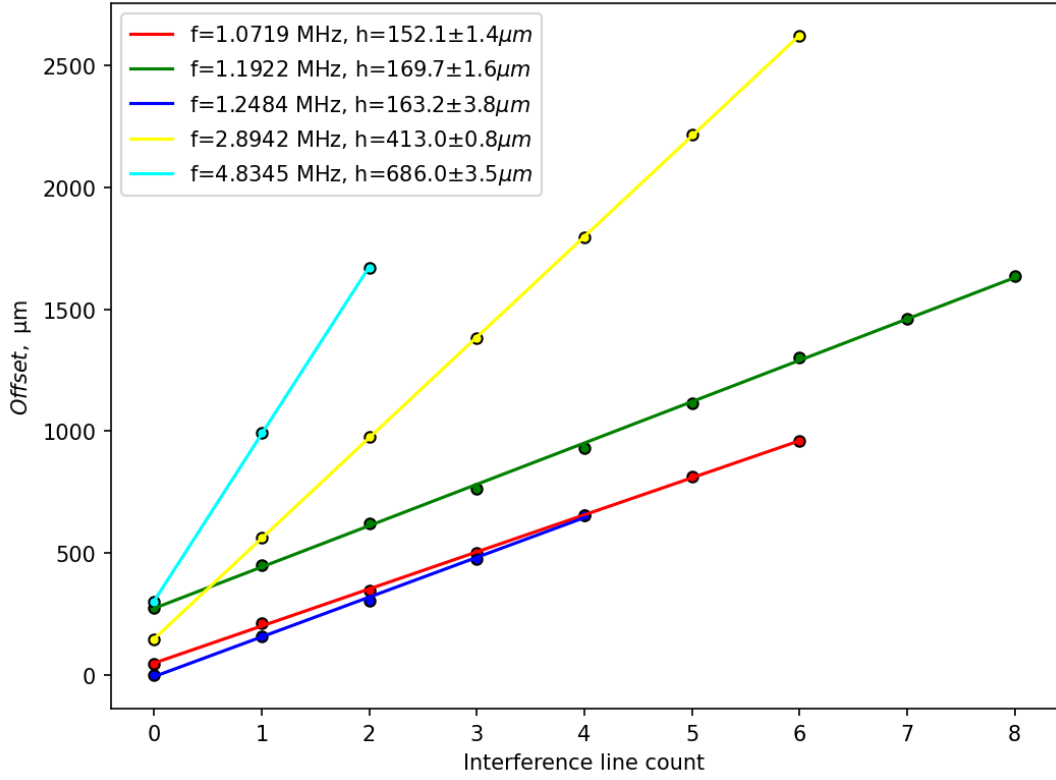
Для начала получим дифракционную картину. Отчётливо видны отдельные полосы, при этом при увеличении мощности генератора полос становится заметно больше (выплоть до 11).

Снимем зависимость отсчётов микрометрического винта в зависимости от номера полосы, а также частоты генератора:

Таблица 1: Зависимость счетчиков от частоты.

Частота (МГц)	Отсчёты
1.07188	11, 53, 86, 125, 164, 203, 240
1.19215	69, 113, 155, 191, 233, 279, 326, 365, 409
1.24837	0, 39, 76, 119, 164
2.89424	36, 141, 244, 345, 449, 554, 656
4.83451	75, 248, 418

Принимаем во внимание, что один отсчёт винта соответствует $4\text{ }\mu\text{m}$. Найдём тогда линейризацией соответствующие ширины дифракционных полос:

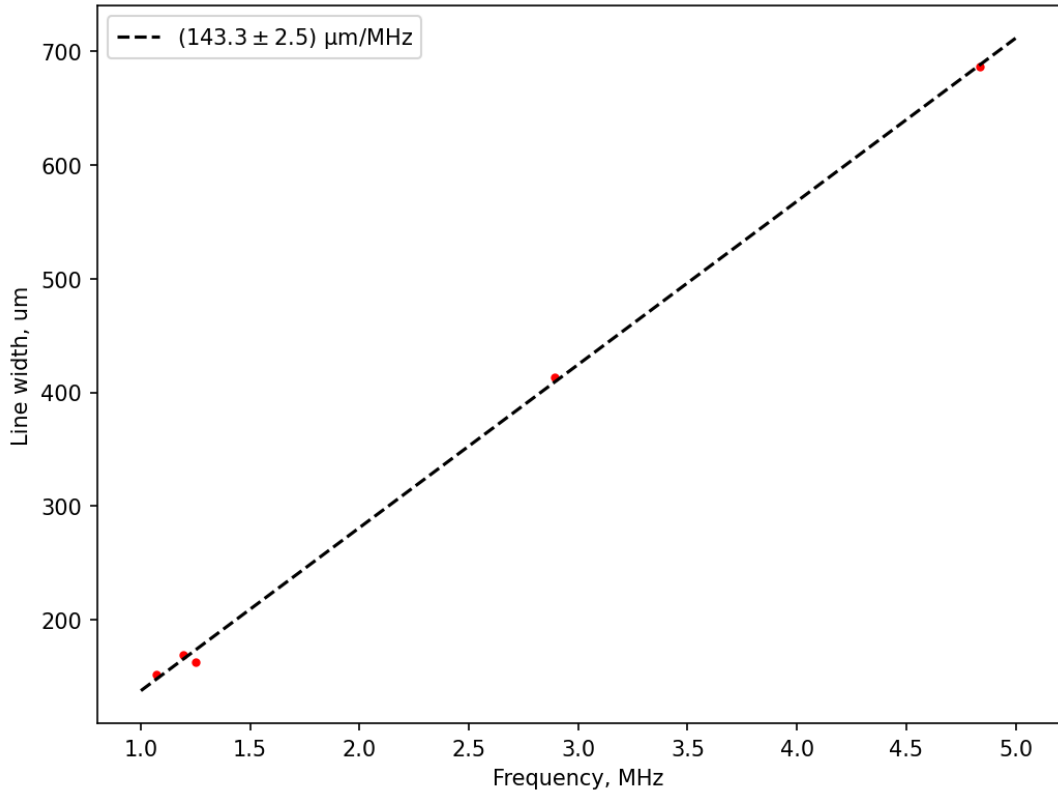


Тогда справедливо следующее:

$$\Lambda = v/f, \quad h(f) \approx F_2 \cdot \theta(f) = F_2 \cdot \lambda/\Lambda = \lambda F_2 f/v \quad (\theta \ll 1)$$

$$h = \frac{\lambda F_2}{v} f$$

Согласно данной зависимости линейризуем:

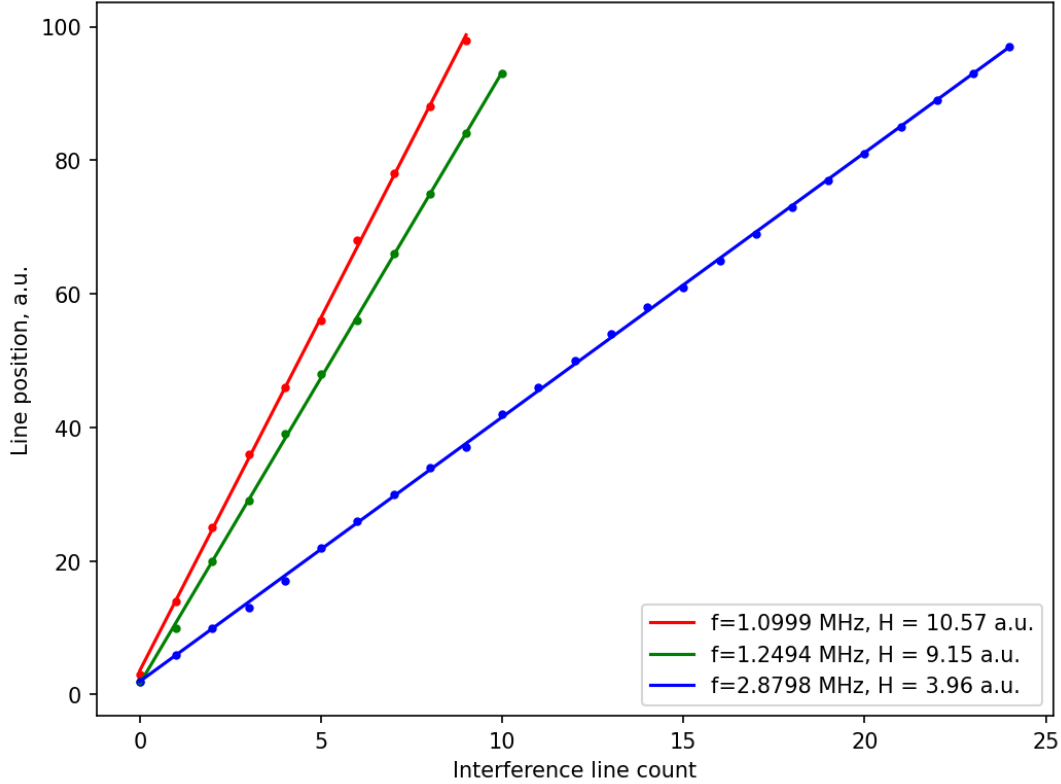


И получаем значение $v = \lambda F_2/k = (1250 \pm 60)$ m/s, что вообще-то достаточно далеко от табличного значения в 1490 m/s...

4.2 Измерение методом тёмного поля

При нормировке собственной шкалы микроскопа по линейке, на которую он сфокусирован, оказалось, что 1 мм линейки соответствует (15.5 ± 0.5) делениям шкалы.

Ввиду количества данных, они сразу приведены в графическом виде для удобства.



По полученным данным рассчитаем соответствующие скорости звука в воде:

f, MHz	H, a.u.	H_{toscale} , mm	v , m/s
1.0999	10.57	0.705	1500
1.2494	9.15	0.610	1474
2.8798	3.96	0.264	1470

Таким образом, этим методом получено $v = (1480 \pm 50)$ m/s, что уже гораздо лучше совпадает с табличным значением.

5 Обсуждение результатов и выводы

В данной работе были получены дифракционные картины на стоячей волне сжатия в воде, а так же изображение фазовой решётки методом тёмного поля. Были получены оценки скорости ультразвуковых волн в воде, при этом первая подозрительно отличается от табличного значения в 1.25 раз... Есть подозрение, что шаг микрометрического винта составлял 5mm вместо 4mm – в таком случае оба значения скорости ультразвука сошлись бы с табличным.