

К ВОПРОСУ О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

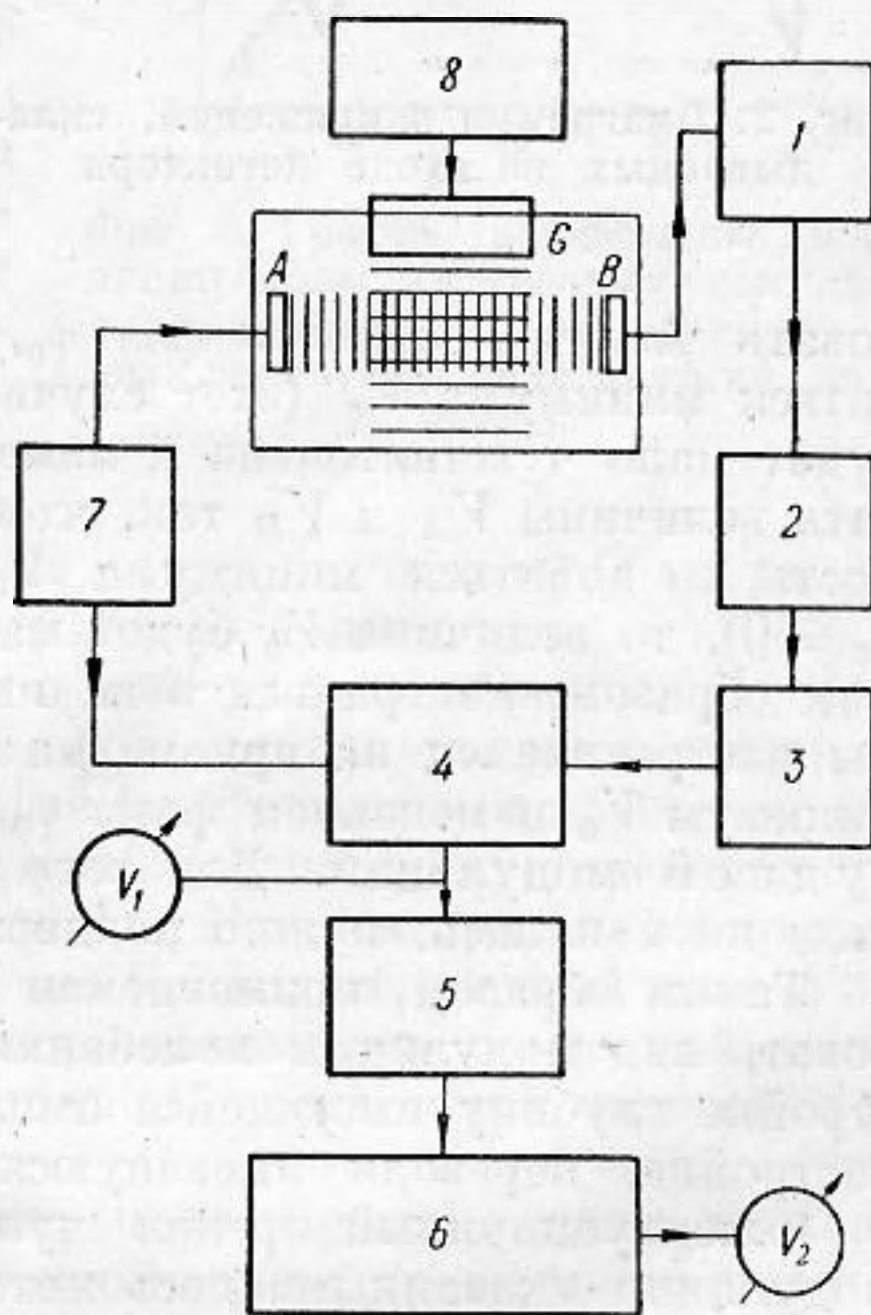
А. Г. Горелик и В. А. Зверев

Показана возможность применения метода, аналогичного методу И. Л. Берштейна [1], для обнаружения и исследования взаимодействия акустических волн в жидкостях. Этот метод позволяет не только обнаруживать наличие весьма малой модуляции, вызванной взаимодействием звуковых волн, но и определить ее характер (амплитудная, фазовая). Проведены контрольные эксперименты, которые подтверждают, что модуляция вызвана взаимодействием акустических волн.

При обычных (не очень больших) интенсивностях взаимодействие акустических волн, вызванное нелинейностью среды, выражено очень слабо, и для его обнаружения требуется аппаратура высокой чувствительности. Как показано в настоящей статье, для обнаружения и исследования взаимодействия акустических волн небольшой интенсивности можно применить метод, аналогичный разработанному И. Л. Берштейном [1], для исследования малых изменений фазы в радиофизике.

Рассмотрим (фиг. 1) стоячую ультразвуковую волну частоты ω , образующуюся в столбе воды между кварцевым излучателем *A* и приемником *B*. Когда расстояние между ними равно целому числу полуволн, в водяном столбе возникает резонанс. Пусть излучатель *C* (гидрофон) создает акустическую волну частоты Ω (причем $\Omega < \omega$), распространяющуюся в направлении, перпендикулярном *AB*. Вследствие нелинейности среды при этом происходит периодическое (с частотой Ω) изменение параметров (плотность, температура, коэффициент поглощения и т. д.) водяного столба *AB*, что в свою очередь приводит к модуляции (как амплитудной, так и фазовой) давления на приемнике *B*. Величина этой модуляции, естественно, зависит от давления, создаваемого низкочастотным излучателем *C*. Как показывает расчет, эта модуляция при обычных условиях весьма мала.

Обнаружение и исследование этой модуляции (как амплитудной, так и фазовой) составляло цель наших экспериментов. Заметим, что в работе Г. Л. Михайлова [2] — единственной известной нам более ранней экспериментальной работе, посвященной нелинейному взаимодействию акустических волн в жидкости — применялась аппаратура, пригодная для об-

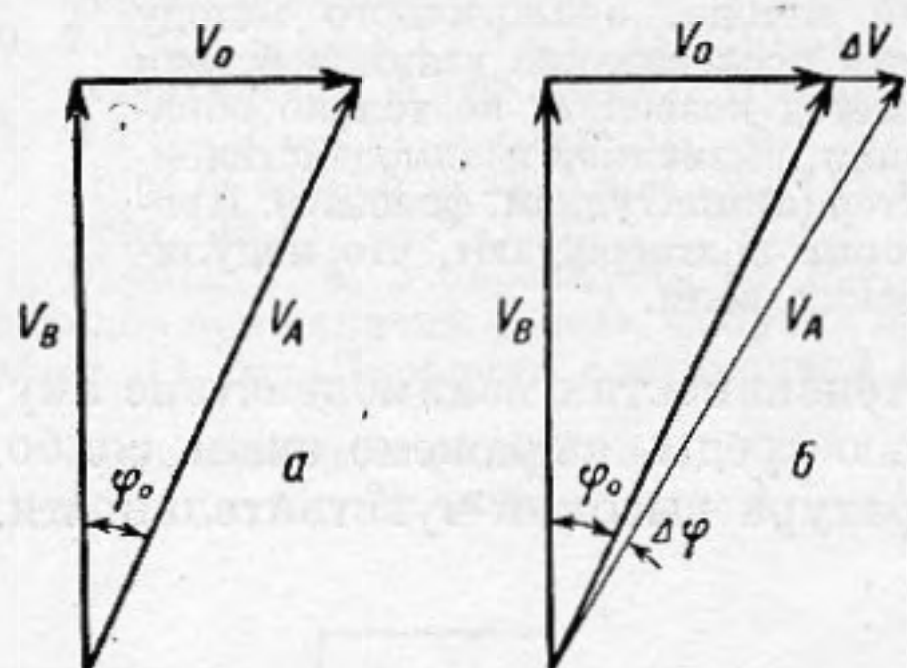


Фиг. 1. Общая блок-схема установки:

1 — усилитель высокой частоты, 2 — аттенюатор, 3 — фазовращатель, 4 — балансная схема, 5 — детектор, 6 — резонансный усилитель низкой частоты, 7 — генератор стандартных сигналов, 8 — звуковой генератор, V_1 — ВКС-7, V_2 — ламповый вольтметр

наружения только амплитудной модуляции, причем исследовались очень вязкие жидкости (например, глицерин).

Идею примененного нами метода поясняет векторная диаграмма фиг. 2. Вектор V_A изображает электрическое напряжение, снимаемое непосредственно с излучающего кварца, вектор V_B — напряжение, снимаемое с акустического приемника при выключенном низкочастотном излучателе через усилитель и фазовращатель. Эти напряжения подаются на вход балансной схемы. На выходе последней образуется разностное напряжение, изображаемое вектором V_0 (блок-схема электрической части установки дана на той же фиг. 1). Пусть теперь вследствие включения низкочастотного излучателя C возникает модуляция фазы и (или) амплитуды давле-



Фиг. 2. Диаграмма напряжений, складываемых на входе детектора

ния на приемнике B , а следовательно, и напряжения V_B . Вследствие этого амплитуда V_0 периодически меняется. Если мы подадим колебания V_0 на вход детектора, то при наличии модуляции ток на выходе последнего будет иметь слагаемую с частотой Ω .

Применяемый метод позволяет не только обнаруживать наличие модуляции (даже очень слабой,) но и определять ее характер (амплитудная, фазовая). Отделить амплитудную модуляцию от фазовой можно при помощи следующего приема. Если между напряжениями V_A и V_B фиксировать малую разность фаз φ_0 , а затем, регулируя величину V_B , добиться минимума V_0 (этот случай показан на фиг. 2, а), то величина V_0 будет мало чувствительна к изменению величины V_B . Если же фиксировать величины V_A и V_B так, чтобы между ними была небольшая разность, и добиться минимума V_0 изменением угла φ_0 (это будет при $\varphi_0 = 0$), то величина V_0 будет мало чувствительна к изменению φ_0 . Таким образом, настраиваясь на минимум V_0 изменением амплитуды V_B , мы настраиваемся на прием фазовой модуляции, а настраиваясь на минимум V_0 изменением фазы φ_0 , мы настраиваемся на прием амплитудной модуляции. Для того чтобы чувствительность детектора при этом не менялась, нужно поддерживать амплитуду V_0 постоянной.

Таким образом, применяемая нами схема дает возможность анализировать вид модуляции колебания V_B , увеличивая при надлежащей настройке глубину имеющейся амплитудной модуляции или, при другой настройке, переводя имеющуюся фазовую модуляцию в амплитудную.

Флюктуационный предел чувствительности при измерении фазовой модуляции указанным здесь методом был оценен И. Л. Берштейном [3].

Пусть изменение фазы происходит по синусоидальному закону.

$$\Delta\varphi = \alpha \cos \Omega t$$

(α — постоянная). Тогда флюктуационный предел выражается формулой

$$\alpha_{\min} = \frac{2}{bV_B} \sqrt{I_0 e \gamma \Delta F},$$

где I_0 — постоянная слагающая анодного тока I детекторной лампы, γ — усредненный за период коэффициент депрессии, e — заряд электрона, ΔF — полоса пропускания фильтра на выходе детектора,

$$b = \left(\frac{dI}{dV} \right)_{V=V_0}$$

Пусть $V_B = 10$ в, $b = 4 \cdot 10^{-3}$ ам/в, $I_0 = 8 \cdot 10^{-3}$ а, $\gamma = 0,3$, $\Delta F = 1$ гц. В этом случае $\alpha_{\min} = 4 \cdot 10^{-4}$ угл. сек.

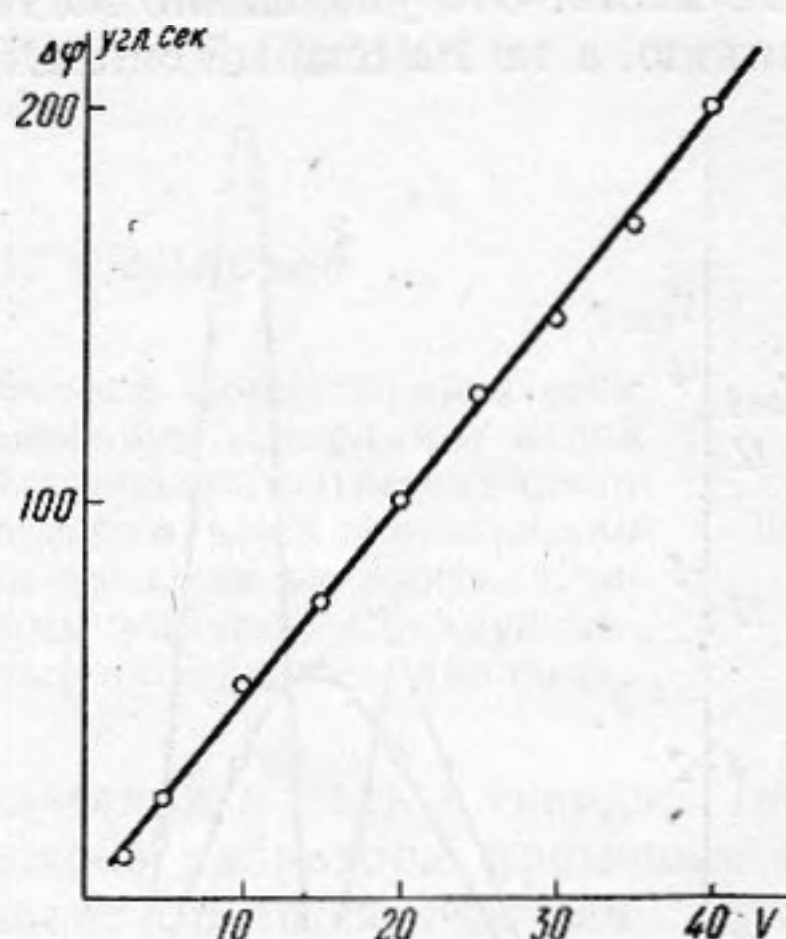
В наших экспериментах не было необходимости стремиться к достижению флюктуационного предела, так как получалось значение α порядка нескольких десятков угловых секунд и больше (фиг. 3).

В качестве акустического излучателя и приемника нами применялись идентичные кварцевые пластинки, настроенные на частоту 1,5 мгц. Источником напряжения, подаваемого на излучающий кварц, являлся генератор стандартного сигнала ГСС-6, также настроенный на частоту 1,5 мгц. Излучающий кварц включался последовательно с катушкой индуктивности, что позволяло получать на нем напряжение порядка 30 в. Напряжение, снимаемое с приемного кварца, усиливалось резонансным усилителем высокой частоты и через фазовращатель подавалось на одно из плеч балансной схемы. На другое плечо балансной схемы подавался сигнал, взятый непосредственно с ГСС-6. Балансная схема была собрана на двух лампах 6Ж4, работавших на общую анодную нагрузку — колебательный контур. На нем образуется разностный сигнал V_0 , подаваемый затем на детектор. Слагающую тока с частотой Ω на выходе детектора выделяет усилитель, настроенный на эту частоту ($4 \cdot 10^3$ гц). Наш усилитель имел полосу пропускания 5—7 гц, коэффициент усиления (по напряжению) до $2 \cdot 10^4$. Наличие сигнала частоты Ω на выходе усилителя наблюдалось при помощи лампового вольтметра.

Калибровка установки производилась следующим образом. При выключенном источнике низкочастотного звука на излучающий кварц подавался от ГСС-6 сигнал, модулированный по амплитуде с известной глубиной модуляции. На вход подавался только сигнал с акустического приемника. Регулируя его величину при помощи аттенюатора, мы добивались того, чтобы он принимал такое же значение V_0 , как разностный сигнал при измерении модуляции. Затем снималась зависимость показаний вольтметра от глубины амплитудной модуляции. С достаточной точностью эта зависимость оказалась линейной.

Переходим к описанию экспериментов, показывающих наличие модуляции, вызванной действием низкочастотной волны на высокочастотную. От ГСС-6 на излучающий кварц подается немодулированное колебание. Электрические напряжения как с излучателя, так и с приемника (через усилитель) подаются на оба плеча балансной схемы. Пока низкочастотный излучатель выключен, ламповый вольтметр показывает нуль. При включении низкочастотного излучателя стрелка лампового вольтметра отклоняется, причем отклонение стрелки лампового вольтметра пропорционально напряжению, подаваемому на излучатель. На фиг. 3 приводится полученная экспериментально линейная зависимость величины α (амплитуда периодического изменения фазы высокочастотного звука) от напряжения, подаваемого на низкочастотный излучатель. Заметим, что при напряжении 10 в применявшийся нами низкочастотный излучатель (электродинамического типа) потреблял мощность 0,1 в.

Большое внимание было уделено проверке того, что наблюдаемый эффект — показание лампового вольтметра — действительно представляет



Фиг. 3. График зависимости модуляции фазы (в угловых секундах) от напряжения, подаваемого на низкочастотный акустический излучатель

собой результат взаимодействия акустических волн, а не побочный эффект в аппаратуре.

Были произведены, в частности, следующие эксперименты.

1. Звуковой пучок низкой частоты перекрывался заслонкой. При этом вольтметр показывал нуль. Это свидетельствовало о том, что электрические наводки играли ничтожную роль.

2. Заслонкой перекрывался звуковой пучок высокой частоты. Вольтметр показывал нуль при перекрытии высокочастотного пучка в любом его месте. Это указывало на то, что аппаратура реагирует только на модуляцию, а не на слабый сигнал частоты Ω , который, возможно, попадал на приемный кварц вследствие рассеяния.

Были проведены опыты по анализу вида получающейся модуляции (фазовая, амплитудная). Ряд измерений производился при таких условиях, когда частота ω равнялась одной из собственных частот ω_n водного столба, а боковые частоты $\omega \pm \Omega$ равнялись другим его собственным частотам $\omega_{n \pm 2}$, т. е. одновременно имел место резонанс на трех частотах: ω и $\omega \pm \Omega$. При этих условиях отчетливо преобладала фазовая модуляция, как показали следующие опыты:

1. При настройке балансной схемы на прием амплитудной модуляции показание лампового вольтметра на выходе было много меньше, чем при настройке на прием фазовой модуляции.

2. При подаче на детектор одного только напряжения V_B с приемного кварца (без помощи балансной схемы) вольтметр показывал практически нуль.

При изменении частоты ω (уходе от резонанса) появлялась сильная амплитудная модуляция. Зависимость глубины амплитудной модуляции от частоты ω показана на фиг. 4. Сплошной чертой изображены показания выходного вольтметра. Пунктиром показаны соответствующие значения V_B (резонансная кривая водного столба).

Наблюдаемые явления легко объясняются, если принять, что главную роль в нашем опыте играет периодическое изменение под действием волны Ω скорости распространения волны (а не коэффициента поглощения), а следовательно, периодические изменения настройки водного столба AB . Если этот столб настроен на резонанс, малая расстройка изменяет (в первом приближении) только фазу его колебаний. Если же он выведен из резонанса, малая дополнительная расстройка заметно изменяет и амплитуду колебаний.

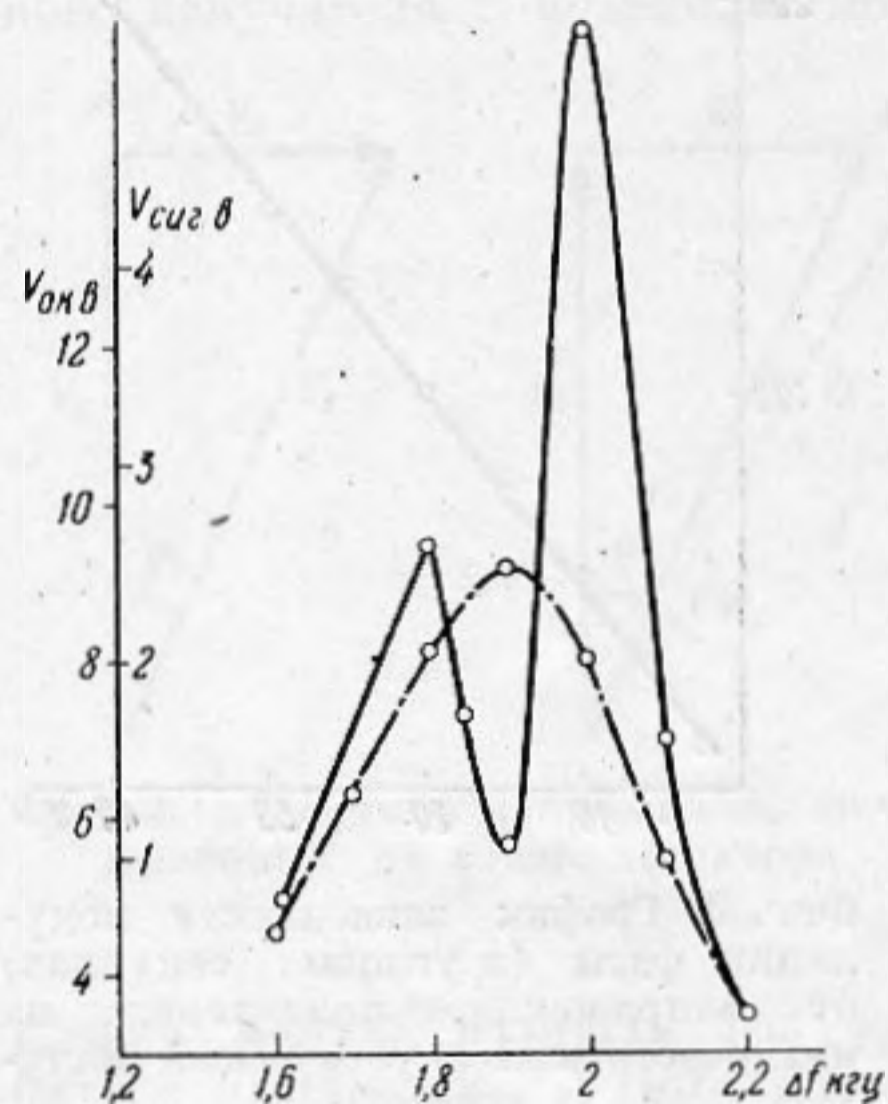
ЛИТЕРАТУРА

1. И. Л. Берштейн. Опыт Саньяка на радиоволнах. ДАН, 1950, 75, 635.
2. Г. Д. Михайлов. О взаимодействии ультразвуковых волн в жидкостях. ДАН, 1953, 89, 663.
3. И. Л. Берштейн. Диссертация. Институт радиотехники и электроники АН СССР, 1955.

Горьковский исследовательский
физико-технический институт

Горьковского государственного университета

Поступила в редакцию
4 мая 1955 г.



Фиг. 4. Зависимость глубины амплитудной модуляции от частоты ω .

Сплошная кривая — показания выходного прибора, штрих-пунктирная черта — изменение напряжения на акустическом приемнике. Левая шкала по оси ординат — напряжение на акустическом приемнике, правая — напряжение на выходном ламповом вольтметре