АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXI 1975 Вып. 1

УДК 534.26

ПОЛУЧЕНИЕ ВИДИМЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКОВЫХ ВОЛН ПРИ ДИФРАКЦИИ СВЕТА

В. А. Зверев, А. М. Павленко, Г. А. Шаронов

Приведены экспериментальные результаты по получению видимых изображений плоских источников звуковых волн при дифракции света на ультразвуке и по исследованию разрешающей способности данного метода акустической голографии. Рассматривается возможность применения метода для интроскопии оптически непрозрачных объектов.

В настоящее время начинает развиваться метод акустической голографии, основанный на дифракции света на ультразвуке [1—4]. К преимуществам этого метода относится то, что он позволяет мгновенно получать изображения источников ультразвука. При этом прозрачная среда с возбужденным в ней звуковым полем является трехмерной фазовой голограммой; при соответствующей обработке дифрагировавшего на ней света можно получить изображение источника звуковых волн.

Применение данного метода на низких ультразвуковых частотах (ниже 15 *Мгц*) имеет большой практический интерес благодаря малому затуханию звука в этом диапазоне частот.

Рассмотрим кратко принципы формирования изображений звуковых источников при дифракции света на ультразвуке. Пусть в плоскости $X=0$ в прозрачной среде (фиг. 1) помещен плоский источник звуковых волн. На некотором удалении поле источника можно представить в виде суперпозиции плоских волн с различными амплитудами и направлениями распространения. Эти направления можно вполне определить углами между волновым вектором $k=2\pi/\Lambda$ звука и осью x — угол α и плоскостью xz — угол β.

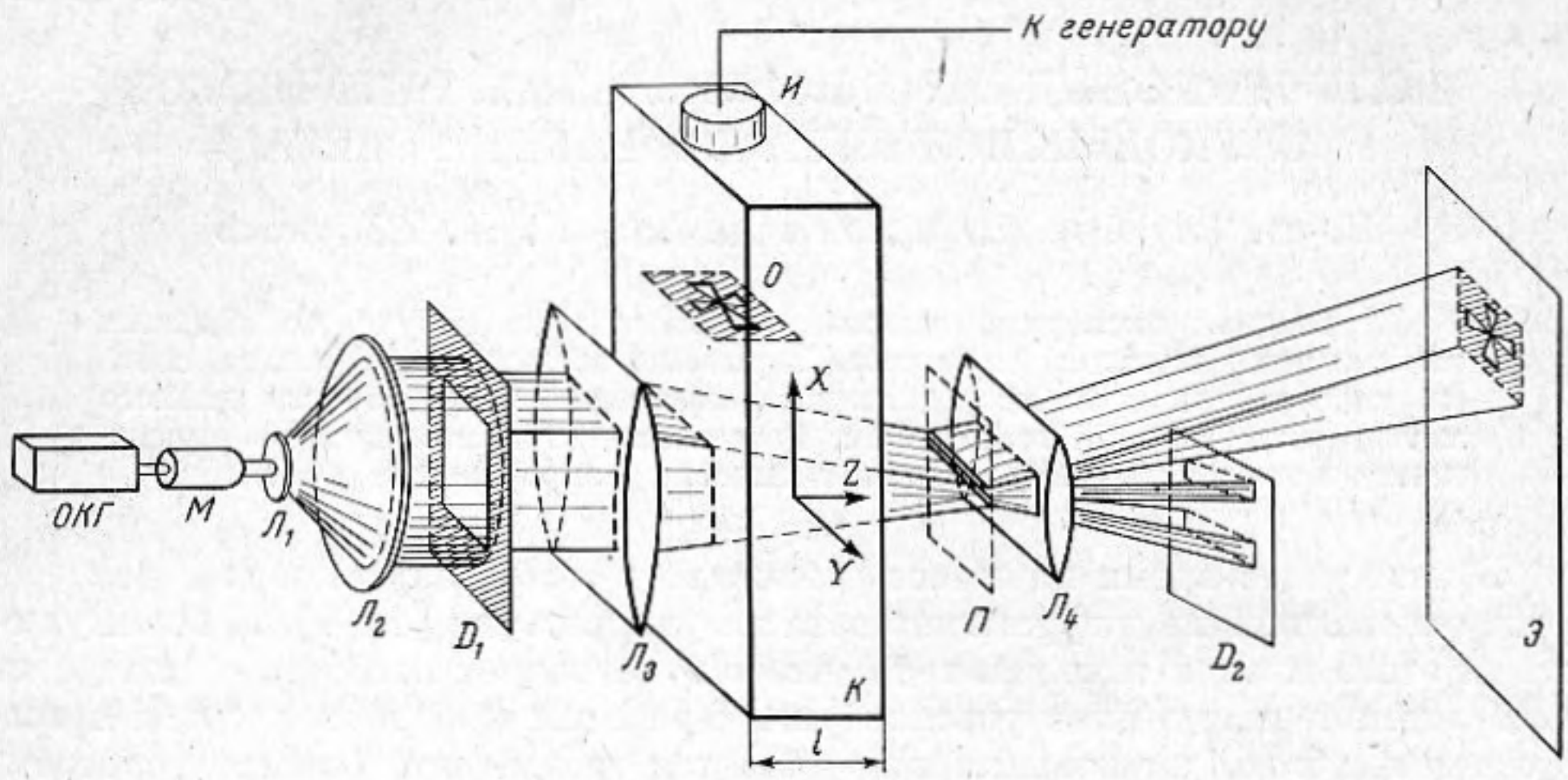
При освещении среды с таким ультразвуковым полем сходящейся когерентной световой волной происходит дифракция света на ультразвуке и поскольку при малых звуковых давлениях взаимодействие света с ультразвуком линейно, можно считать, что свет дифрагирует на каждой плоской волне разложения независимо. Следовательно, в дифрагировавшем пучке должна содержаться информация о звуковом поле, созданном источником, и, следовательно, об источнике.

Пусть световой пучок распространяется вдоль оси z (фиг. 1). Тогда при падении световой волны на ультразвуковые волны, распространяющиеся в плоскости xy, или, что то же самое, под различными углами β, происходит нормальная дифракция света. При этом происходит поворот плоской световой волны на угол β, под которым распространяется соответственная звуковая волна.

Взаимодействие света со звуковыми волнами различных направлений α носит характер косого падения. Для извлечения информации о звуковых волнах необходимо применить сходящийся пучок света. Такой пучок можно представить в виде суммы плоских волн, распространяющихся в плоскости xz под различными углами φ. Тем самым каждой плоской звуковой волне с направлением распространения α ставится в соответствие световая

волна, распространяющаяся под углом $\varphi=\alpha$, и дифракция возможна. Однако в силу особенностей механизма дифракции света при косом падении [4] на звуковой волне дифрагирует не одна плоская световая волна, а все волны, распространяющиеся под углами, лежащими внутри интервала $\Delta\varphi=\Lambda/l$. При Λ и l, таких, что $\lambda l/\Lambda^2\geqslant 1$ [5], каждой звуковой волне соответствует одна световая, и потери информации не происходит. Этот случай соответствует брегговской дифракции света на ультразвуке [1, 2].

Можно показать, что в некоторой плоскости, в которой дифрагирующие световые волны фокусируются, будет формироваться изображение источ-



Фиг. 1. Схема экспериментальной установки

ника звука, сжатое в Λ/λ раз по оси x (λ — длина волны света). Применяя цилиндрическую оптику, изображение можно увеличить по оси x и наблюдать его в реальном масштабе.

Оценим разрешающую способность данного метода получения изображений источников ультразвука. Для этого возьмем точечный источник звука. Полученное изображение будет описываться [4] выражением

$$\frac{\sin(ky\sin\beta_0)}{ky\sin\beta_0}\,\frac{\sin(kx\sin\alpha_0)}{kx\sin\alpha_0}, \tag{1}$$

где α_0 и β_0 — углы, определяющие максимальную ширину углового спектра источника звука, k — волновое число света.

Очевидно, что разрешение по координате x (соответствующей координате z в плоскости источника) зависит не только от ширины спектра источника звука, но и от ширины спектра светового источника φ_0. Будем считать, что $\varphi_0>\alpha_0$ и вместо α_0 в (1) возьмем φ_0.

Примем за разрешающую способность ширину отклика (1) между первыми нулями функции вида $\sin\xi/\xi$, что соответствует критерию разрешения по Рэлею. Тогда разрешение по y будет

$$\Delta y=\Lambda/\sin\beta_0$$

и по x

$$\Delta x=\lambda/\sin\varphi_0.$$

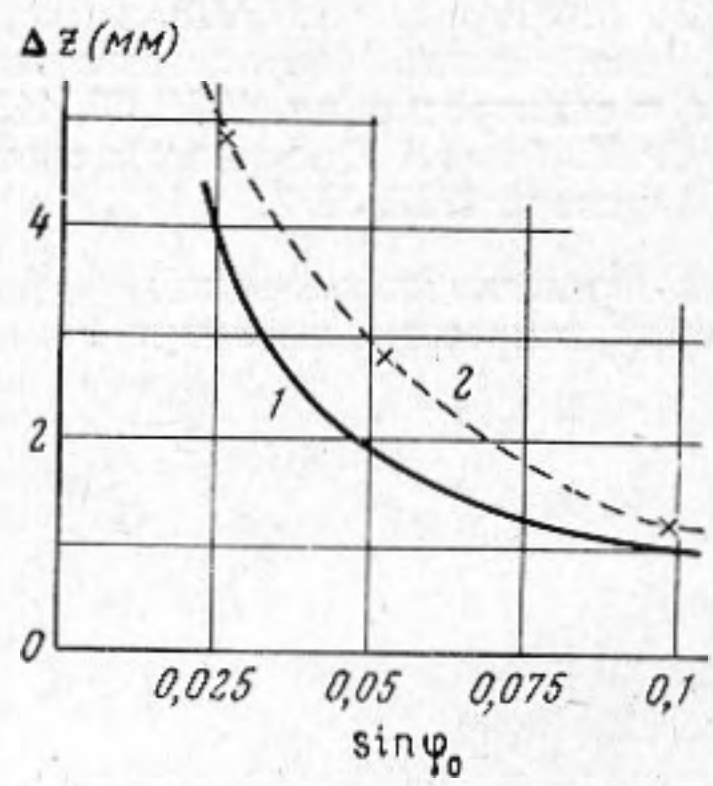
После увеличения в Λ/λ раз мы получим неискаженное изображение, причем разрешение по x будет $\Delta x=\dfrac{\Lambda}{\sin\varphi_0}=\Delta z$. Таким образом, разрешающая способность определяется частотой ультразвука и шириной углового спектра звука и света.

В процессе эксперимента были получены изображения плоских ультразвуковых источников при дифракции света на низкочастотном ультразвуке, т. е. при условиях, когда брегговская дифракция не имеет места. Схема установки представлена на фиг. 1. В качестве объектов О были использованы пластины из пластика и металла. Объекты помещали в кювету К с водой, снабженную окнами из оптического стекла, на пути ультразвуковой волны, создаваемой излучателем И диаметром 18 *мм*, работающем на частотах 5 и 15 *Мгц*.

Источником света служил газовый лазер ОКГ-11. Микроскоп М и линзы $Л_1$ и $Л_2$ создавали коллимированный однородный пучок света. Диафрагма $Д_1$ выделяла пучок прямоугольного сечения, размеры которого можно было плавно изменять. Цилиндрическая линза $Л_3$ создавала сходящийся пучок света, на пути которого помещалась кювета.

В плоскости П формируется изображение в дифракционных порядках. Линза $Л_4$ производит увеличение изображения объектов в Λ/λ раз. Изображение в первом порядке дифракции, выделенное диафрагмой $Д_2$, наблюдается на экране Э.

При выбранных условиях параметр $\lambda l/\Lambda$ равнялся 0,08 и 0,8 на частотах 5 и 15 *Мгц* соответственно, т. е. опыты проводились вне области селективного отражения Брэгга. На фиг. 2, *а* (см. вкл. к стр. 41) показана маска, формирующая плоский источник ультразвука. В ходе работы была проверена зависимость разрешения по координате z (в плоскости источника) от апертуры светового источника φ_0. Поскольку значения α_0 и β_0, оцененные с помощью теневого метода, были равны $\sim 10°$, а максимальная апертура света равнялась 6°, то разрешение по z определялось именно последней апертурой.



Фиг. 3. График зависимости разрешающей способности метода от апертуры сходящейся световой волны (*1* – теория, *2* – эксперимент)

В качестве миры использовалась та же крестообразная маска (фиг. 2, *а*); по качеству воспроизведения ее центральной части можно было определить разрешение. Результаты эксперимента иллюстрируются графиком фиг. 3, где дана зависимость разрешения по z от апертуры света на частоте 15 *Мгц*; ошибка при проведении эксперимента составляла 10%. Сравнивая фотографии 2, *б* и 2, *в* можно оценить частотную зависимость разрешения; на частоте 5 *Мгц* разрешение в три раза хуже, чем на частоте 15 *Мгц*. Была проверена также возможность применения описанного метода восстановления изображений источников звука для наблюдения внутренней структуры оптически непрозрачных объектов. Были получены изображения включений в сплошной винипластовой пластине толщиной 2,5 *мм*; неоднородности были созданы из стальной проволоки диаметром 0,8 *мм*. При проведении экспериментов пришлось столкнуться с рядом трудностей. Одна из них — ухудшение качества изображений вследствие течения жидкости, вызванного «звуковым ветром». Уменьшение мощности излучения ультразвука уменьшает эти искажения, но приводит к существенному уменьшению яркости изображений. Поэтому было применено импульсное включение излучателя.

Кроме того, было обнаружено, что наиболее сильные искажения вызывают медленное движение среды вдоль оси x. Быстрых движений в плоскости yz система как бы не замечает. Поэтому, перемешивая жидкость непосредственно за излучателем и тем самым нарушая медленные движения среды, удается получить устойчивые изображения хорошего качества (фиг. 4, см. вкл. к стр. 41).

Таким образом, в ходе работы были получены изображения плоских источников ультразвука удовлетворительного качества на частотах ниже частоты дифракции Брэгга. При этом достигнуто разрешение 8—10Λ, что соответствует 1 *мм* на частоте 15 *Мгц* и 3 *мм* на частоте 5 *Мгц*.

ЛИТЕРАТУРА

1. *A. Korpel.* Visualisation of the cross section of a sound beam by Bragg diffraction of light. Appl. Phys. Lett., 1966, *9*, 12, 425.
2. *A. Korpel.* Acoustic Imaging by Diffracted light. IEEE Trans. SU-15, 1968, *3*, 153.
3. *J. Landry.* Ultrasound imaging of internal structure by Bragg diffraction. Appl. Phys. Lett., 1969, *15*, 6, 186.
4. *В. А. Зверев, А. М. Павленко, Г. А. Шаронов.* О возможности получения видимых изображений источников звука при дифракции света на ультразвуке. Оптика и спектроскопия, 1971, *30*, 1157.
5. *С. М. Рытов.* Дифракция света на ультразвуковых волнах. Изв. АН СССР. Сер. физич., 1937, № 2.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила
1 апреля 1971 г.
После переработки
26 марта 1974 г.