

Г. В. АБРАМОВ,
Л. А. НАЗАРОВА, М. Н. КУДРЯШОВА

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КВАЗИПЛОСКОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ

Вопросам экспериментального исследования характеристик ультразвуковых полей посвящено значительное количество работ. При использовании квазиплоских ультразвуковых полей важно экспериментально проверить форму волнового фронта и распределение звукового давления по этому фронту. Сделать это можно различными методами. Наиболее перспективным является метод, основанный на использовании пьезоэлектрических чувствительных элементов. С его помощью можно определить форму волнового фронта ультразвуковой волны, т. к. он позволяет измерять мгновенные значения параметров ультразвукового поля.

В настоящей работе приводится методика экспериментального исследования формы фронта ультразвуковой волны квазиплоского ультразвукового поля (500×500 мм), создаваемого плоско-вогнутой линзой в воде, с помощью пьезоэлектрических чувствительных элементов (диапазон частот 1—5 Мгц, полностью заглушенный бассейн размером $2 \times 5 \times 2$ м). Режим работы — импульсный, $\tau_{\text{имп}} = 1 \div 3$ мсек, $f_{\text{н}} = 5$ Мгц.

Отметим, что экспериментальное определение формы квазиплоской ультразвуковой волны в этом диапазоне частот имеет ряд особенностей, обусловленных тем, что длина ультразвуковой волны на частоте 5 Мгц в воде составляет всего 0,3 мм, и поэтому внесение в ультразвуковое поле пьезоэлектрического приемника будет искажать его. Характер и степень искажения зависят от размеров и формы приемника и могут быть оценены.

Очевидно, что для уменьшения искажений поля размеры приемника должны быть меньше длины волны. Поэтому для данных измерений мы применяем миниатюрные пьезоэлектрические приемники [1, 2], диаметром $0,2 \div 0,3$ мм, чувствительность которых заключена в пределах от 0,01 до 0,3 мкв/бар. Частотная характе-

ристика такого типа приемников имеет максимум в диапазоне частот от 100 кГц до 5÷6 МГц.

Таким образом, используя [4], возможно рассчитать систематическую ошибку, вызванную искажением поля приемником, для данной длины волны и радиуса приемника и учесть ее при измерениях. Например, фазовые искажения, вносимые приемником

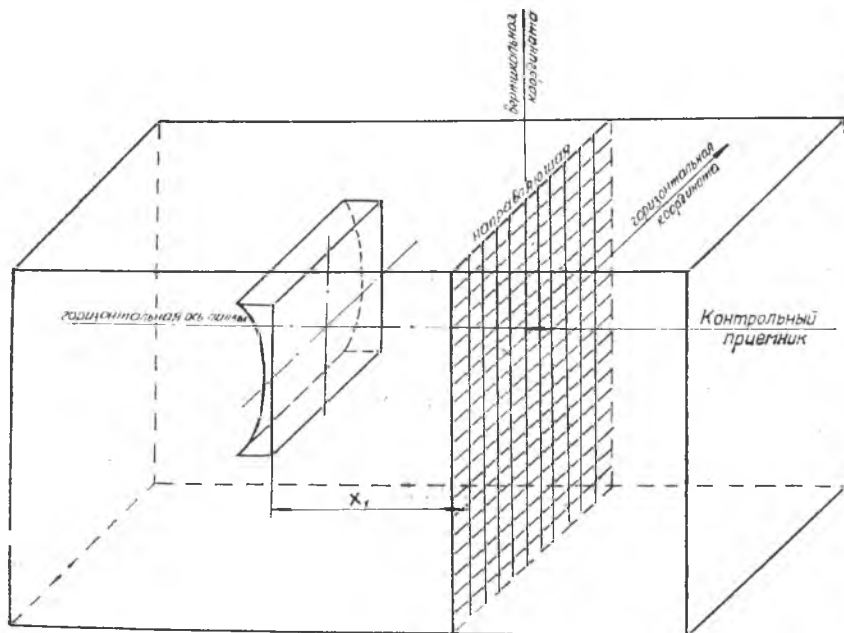


Рис. 1

диаметром 0,3 мм, при $\lambda=0,3$ мм составляют около 60° . Но эта задача трудоемкая, и ошибка вычисляется приближенно.

Поэтому при экспериментальном исследовании формы волны квазиплоского ультразвукового поля, где важно знать распределение звукового давления и фазы, а не их абсолютные значения, лучше с помощью двух приемников производить относительные измерения. Сигнал приемника, помещаемого на оси коллиматора, является опорным, с ним сравнивается сигнал второго приемника.

Первым методическим приёмом при эксперименте является изучение распределения звукового давления по горизонтальной координате при фиксированных глубинах погружения приемника и по вертикальной координате при фиксированном расстоянии приемника от базисных точек.

Вторым методическим приёмом является определение фазового сдвига (кривизны фронта квазиплоского поля) при перемеще-

нии приемника по той или другой координате. В качестве опорной фазы используется фаза приемника на оси коллиматора (рис. 1).

Сигналы обоих приемников усиливаются и поступают на измерительное устройство. Блок-схема измерений приведена на рис. 2.

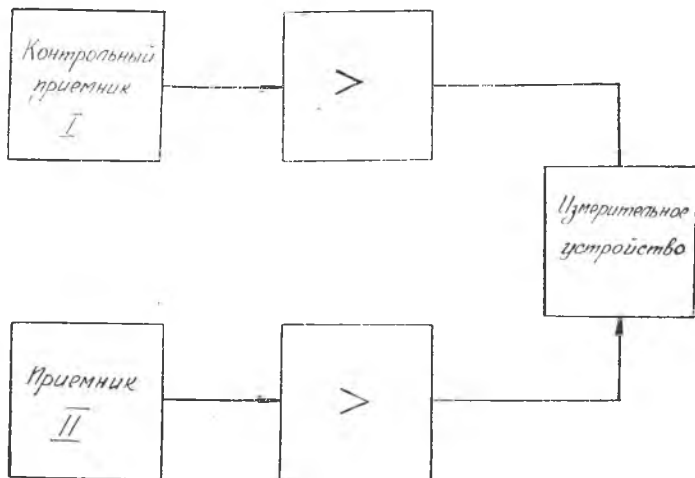


Рис. 2

Точность измерения при прочих равных условиях зависит от точности измерительного устройства, в качестве которого можно использовать катодный двухлучевой осциллограф, фазометр и др. Из всех регистрирующих устройств наиболее точно измерить фазу позволяет двухлучевой осциллограф, т. к. фазометр измеряет фазу в пределах $0^\circ \div \pm 180^\circ$.

Чтобы зафиксировать тонкие особенности интерференционной картины, необходимо использовать жесткую координатную систему, позволяющую задавать положение приемника относительно базисных точек и перемещать его непрерывно с большой степенью точности как по горизонтали, так и по вертикали.

Для этой цели можно рекомендовать прецизионное координатное устройство [5], позволяющее автоматически перемещать приемник с точностью, не меньшей 0,01 мм.

Точность измерения зависит не только от точности измерительного прибора, но и от погрешности координатного устройства δ . Фазовая погрешность в этом случае определяется по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{\delta \cdot 2\pi}{\lambda},$$

где δ — погрешность координатного устройства,

λ — длина волны.

Погрешность координатного устройства складывается из погрешностей, вызванных:

а) непараллельностью направляющей, по которой перемещается приемник, плоскости апертуры коллиматорного устройства δ_1 :

б) неточностью установки направляющей в горизонтальной плоскости δ_2 ;

в) неточностью изготовления самой направляющей δ_3 ;

г) неточностью установки штанги приемника в вертикальной плоскости δ_4 .

Рассмотрим эти составляющие погрешности измерения:

а) Погрешность за счет непараллельности направляющей плоскости апертуры δ_1 (рис. 3).

Расстоянию δ_1 (углу α) соответствует набег фазы, т. е. приемник измерит не фазу φ , а фазу $\varphi \pm \Delta\varphi_1$. То есть

$$\delta_1 = \frac{\pm \Delta\varphi_1 \cdot \lambda}{2\pi}.$$

Но $\text{tg } \alpha = \frac{\delta_1}{y} = \frac{\pm \Delta\varphi_1 \cdot \lambda}{y \cdot 2\pi}$ или $\pm \Delta\varphi_1 = \text{tg } \alpha \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot y$. Максимальная ошибка при этом $\pm \Delta\varphi_{1\text{max}} = \frac{2\pi}{\lambda} y_{\text{max}} \cdot \text{tg } \alpha$.

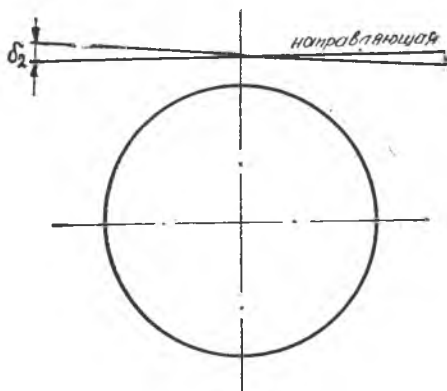


Рис. 4

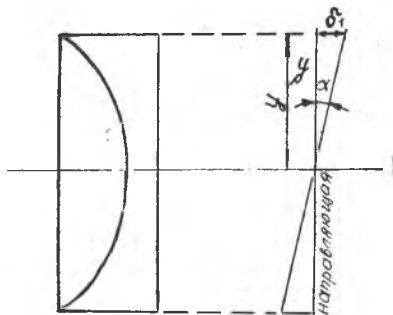


Рис. 3

Например, максимальная погрешность по апертуре коллиматора при перекосе в 0,1 мм направляющей длиной 2 м составляет 45°. Таким образом, точность измерения фазы зависит от угла α , и с ростом α увеличивается погрешность измерения $\pm \Delta\varphi_1$.

Точность измерения линейно зависит от расстояния от оси коллиматорного устройства y , на котором помещается точечный приемник. При одном и том же угле α при меньшем y полу-

чается меньшая ошибка измерения.

б) Неточность установки направляющей в горизонтальной плоскости, вызванная тем, что один конец направляющей располо-

жен выше другого на величину δ_2 , приводит к появлению фазовой ошибки $\Delta\varphi_2$ (рис. 4).

Расчет ее может быть произведен по формуле

$$\pm\Delta\varphi_2 = [\arctg(\operatorname{atg} k_1 l) - k_1 l] - [\arctg(\operatorname{atg} k_1 (l - \Delta l) - k_1 (l - \Delta l)],$$

где $a = \frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{m} \right)$, m — отношение волновых сопротивлений среды и материала линзы.

$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad l — \text{толщина линзы в данной точке.}$$

Так, например, при эксцентриситете 0,1 мм максимальная ошибка $\Delta\varphi_2$ по апертуре коллиматора составит $33^\circ,5$.

в) Неточность изготовления направляющей δ_3 .

Если направляющая, по которой перемещается приемник, изготовлена с определенной погрешностью δ_3 , то приемник будет измерять фазу не в той точке, в которой он должен мерить. При этом возникает погрешность измерения

$$\pm\Delta\varphi_3 = \frac{\delta_3 \cdot 2\pi}{\lambda},$$

где δ_3 — погрешность изготовления направляющей. Если погрешность изготовления направляющей составляет 0,1 мм, то $\Delta\varphi_3 = 45^\circ$ при $\lambda = 0,3$ мм.

г) Неточность установки штанги приемника в вертикальной плоскости определяется ошибкой оптического прибора, с помощью которого штанга приемника выставляется в вертикальной плоскости. Эта фазовая погрешность δ_4 также должна быть учтена.

Таким образом, погрешность координатного устройства равна

$$\Sigma \delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4,$$

и вызываемая этим погрешность измерения фазы равна

$$\pm\Delta\varphi = \pm\Delta\varphi_1 \pm \Delta\varphi_2 \pm \Delta\varphi_3 + \Delta\varphi_4, \quad \Delta\varphi_4 \max \approx 0,$$

$$\Delta\varphi_{\max} = \Delta\varphi_{1\max} + \Delta\varphi_{2\max} + \Delta\varphi_{3\max} + \Delta\varphi_{4\max} \approx 45^\circ + 33^\circ,5 + 45^\circ = 123^\circ,5$$

Рассмотрим, как зависит точность измерения фазы от длины волны. Задаваясь допустимой фазовой ошибкой измерения фазы квазиплоского поля и погрешностью координатного устройства, можно найти длину волны λ , для которой фаза будет определена с заданной точностью, т. е.

$$\lambda_{\text{иск}} = \frac{\delta \cdot 2\pi}{\pm\Delta\varphi_{\text{зад}}}$$

На основании этой формулы составим таблицу 1.

Таблица 1

$\pm \Delta\varphi_{\text{зад}}$	λ
$\pi/4$	$\geq 8\delta$
$\pi/8$	$\geq 16\delta$
$\pi/16$	$\geq 32\delta$
$\pi/32$	$\geq 64\delta$

Из таблицы можно сделать вывод, что измерения фазовой погрешности волнового фронта с точностью до единиц градусов возможны лишь для $\lambda \geq 64\delta$.

Пользуясь формулой $\Delta\varphi = \frac{\delta \cdot 2\pi}{\lambda}$ и зная $\Sigma\delta$ — суммарную погрешность координатного устройства, можно определить, какова точность измерения фазы на данной частоте.

Кроме этих погрешностей, возможны погрешности субъективного характера, грубые ошибки и т. п.

Таким образом, учет выше указанных погрешностей должен производиться в процессе проектирования бассейна и прецизионного координатного устройства, т. к. от них будет зависеть точность измерения.

Данная работа не имеет своей целью представить окончательную методику измерений квазиплоского ультразвукового поля с помощью миниатюрных пьезоэлектрических приемников ультразвука, а является попыткой проанализировать возможные ошибки при измерениях и обратить на них внимание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. В. Романенко. Миниатюрные пьезоэлектрические приемники ультразвука. АК. ж. 3, 4, 342, 1957.
2. Е. В. Романенко. Конструкция и применение миниатюрных приемников ультразвука. Техничко-информационный бюллетень ЦКБ ЭТО, 1960, 113, 37.
3. Источники мощного ультразвука. Под ред. проф. Л. Д. Розенберга, 1967.
4. Ф. Морз. Колебания и звук, ГИТТЛ, 1949.
5. И. М. Каневский. Установка для измерений ультразвуковых полей в жидкости. Измерительная техника, № 8, 1959.
6. Л. Д. Розенберг. Звуковые фокусирующие системы. Издательство Академии Наук, 1949.