

10

## **Применение плоских импульсных акустических волн в устройствах с фазированными решетками для ультразвуковой визуализации в слоистых средах**

© С.А. Титов

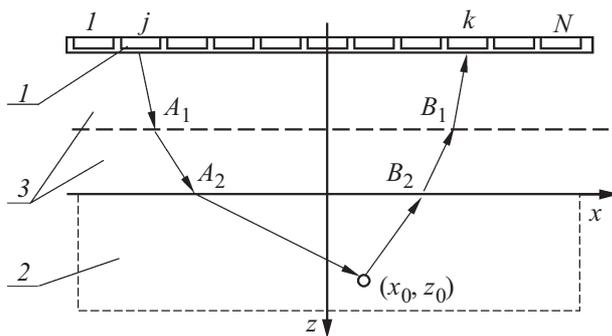
Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва,  
Россия  
E-mail: sergetitov@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 января 2018 г.

Предложен метод построения ультразвуковых изображений в слоистых средах, основанный на излучении и приеме под различными углами плоских импульсных волн. При прохождении через набор слоев плоские импульсные волны не меняют своей формы и направления в области визуализации, поэтому в предлагаемом методе отсутствует необходимость детального рассмотрения распространения волн в промежуточных слоях. Показано, что в отсутствие априорной информации о толщинах и акустических параметрах этих слоев или результатов их измерения метод позволяет получать изображения с пространственным разрешением, соответствующим теоретическому пределу.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.16.46475.17228

Распространенный метод построения изображений в устройствах ультразвуковой визуализации на фазированных решетках основан на суммировании сигналов приемопередающих элементов решетки, сдвинутых по времени для формирования фокуса в заданной точке объекта [1]. Нахождение этих временных сдвигов сводится к расчету времени распространения цилиндрической волны между элементами решетки и фокусом и для акустически однородной среды является относительно простым. Однако, если между ультразвуковой решеткой 1, и визуализируемой областью 2 находятся дополнительные слои 3 (рис. 1), для расчета этого времени для каждой пары приемопередающих элементов решетки и для каждой точки фокусировки  $(x_0, z_0)$  нужно найти точки



**Рис. 1.** Схема распространения волн: 1 — решетка ультразвуковых преобразователей, 2 — область визуализации, 3 — промежуточные слои.

пересечения лучами границ слоев  $A_1, A_2, \dots$  и  $B_1, B_2, \dots$ . Для одиночного слоя, скорость звука и толщина которого должны быть известны, нахождение одной такой точки требует решения системы трансцендентных уравнений [2,3]. Для двух и более слоев сложность и объем вычислений значительно возрастают, что приводит к практической нереализуемости такого подхода.

В настоящей работе для формирования ультразвуковых изображений в слоистых средах предложено использовать плоские импульсные волны. Преимущество такого метода обуславливается тем, что плоская волна сохраняет свою форму при прохождении через слои, а направление ее распространения в области визуализации задается непосредственно излучением решетки и не зависит от параметров промежуточных слоев.

Пусть решетка создает в своей плоскости распределение поля  $p_0 = f(t - s_1 x)$ , где временная функция  $f(t)$  задается параметрами ультразвуковых элементов решетки и генератора электрического сигнала. Такому распределению поля соответствует плоская волна, горизонтальная проекция вектора медленности которой равна  $s_1$ . При прохождении волны через набор слоев по закону преломления величина  $s_1$  остается неизменной, а приобретаемая волной задержка определяется скоростями звука  $C_i$  и толщинами слоев  $d_i$

$$\tau_0(s_1) = \sum d_i \sqrt{C_i^{-2} - s_1^2}. \quad (1)$$

Волна, отраженная от границы между нижним слоем и областью визуализации, может быть представлена в виде

$$p_1 = r(s_1)f(t - s_1x - 2\tau_0(s_1)),$$

где величина  $r(s_1)$  определяется коэффициентами прохождения и отражения на границах слоев. При приеме этой волны выходным электрическим сигналам элементов решетки сообщаются задержки  $t = \tau + s_1x$ , которые компенсируют линейно изменяющееся по апертуре время прихода волны. Суммирование всех канальных сигналов позволяет получить результирующий отклик вида

$$W_0(s_1, \tau) = r(s_1)f_2(\tau - 2\tau_0(s_1)), \quad (2)$$

где  $f_2$  учитывает не только временную структуру излученной волны, но и характеристики элементов решетки на прием.

Волна, прошедшая через слои и дошедшая до точки  $(x_0, z_0)$ , приобретает дополнительную задержку

$$\tau_{F1} = s_1x_0 + z_0\sqrt{C_L^{-2} - s_1^2}, \quad (3)$$

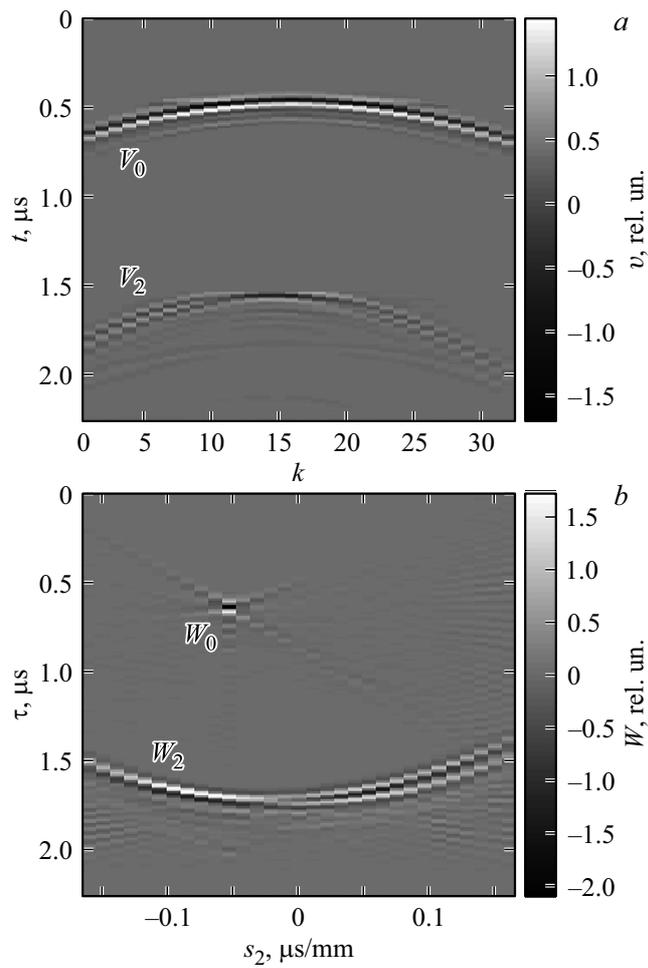
где  $C_L$  — скорость звука в среде. Если в этой точке находится отражатель, то в общем случае из этой точки распространяется рассеянная волна, которая может быть разложена в спектр плоских волн. Одна из компонент этого спектра, направление распространения которой характеризуется проекцией вектора медленности  $s_2$ , возвращаясь к решетке, приобретает также задержку

$$\tau_{F2} = -s_2x_0 + z_0\sqrt{C_L^{-2} - s_2^2}. \quad (4)$$

Прием этой плоской волны дает отклик, аналогичный (2):

$$W_2(s_1, s_2, \tau) = r_2(s_1, s_2)f_2(\tau - \tau_0(s_1) - \tau_0(s_2) - \tau_{F1}(s_1, x_0, z_0) - \tau_{F2}(s_2, x_0, z_0)), \quad (5)$$

где функция  $r_2(s_1, s_2)$  учитывает изменение амплитуды волны при распространении через слои и рассеянии на визуализируемой неоднородности.



**Рис. 2.** Пространственно-временной сигнал  $v_{jk}(t)$ ,  $j = 16$ , записанный для тестового объекта (а), и его разложение в спектр плоских волн  $W(s_1, s_2, \tau)$ ,  $s_1 = 0.053 \mu\text{s}/\text{mm}$  (б).

Для того чтобы построить изображение в точке  $(x_0, z_0)$ , нужно провести суммирование отклика  $W_2$  для всех комбинаций дискретизи-

рованных параметров  $(s_1, s_2)$ , компенсируя задержки  $\tau_0, \tau_{F1}, \tau_{F2}$ :

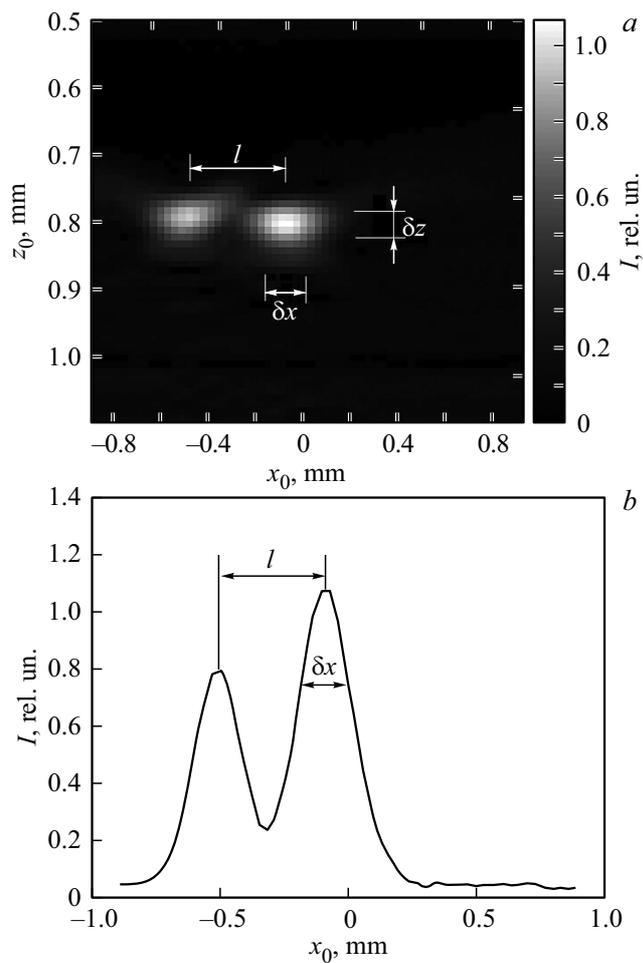
$$I(x_0, z_0) = \left| \sum_n \sum_m W_2(s_{1n}, s_{2m}, \tau_0(s_{1n}) + \tau_0(s_{2m}) + \tau_{F1}(s_{1n}, x_0, z_0) + \tau_{F2}(s_{2m}, x_0, z_0)) \right|. \quad (6)$$

Задержки  $\tau_0$  могут быть найдены по измеренному отклику  $W_0$ , отраженному от нижней границы слоев, а для расчета задержек  $\tau_{F1}, \tau_{F2}$  нужно знать только скорость в среде  $C_L$ .

Экспериментальная апробация предлагаемого метода была осуществлена с помощью одномерной решетки, состоящей из  $N = 32$  прямоугольных элементов. Центральная частота элементов была приблизительно равна 15 МГц, период их расположения составлял 0.25 мм. В качестве тестового объекта использовалась пластинка из оргстекла толщиной 1.53 мм, расположенная в воде на расстоянии 9 мм от решетки. Под пластинкой в воде на расстоянии 0.78 мм от нее находились острия двух стальных лезвий, ориентированные вдоль длинных сторон элементов решетки. Расстояние между остриями было равно  $l = 0.4$  мм. Электронный блок позволял отдельно регистрировать сигналы от всех приемопередающих пар элементов решетки  $v_{jk}(t)$ , где  $j, k$  ( $1 \leq j, k \leq N$ ) — номера передающего и приемного элементов соответственно.

На рис. 2, а в качестве примера показан в виде полутонного изображения сигнал  $v_{16k}(t)$ , записанный всеми элементами при использовании элемента с номером  $j = 16$  как передающего. На рисунке величина знакопеременного сигнала представлена градацией серого цвета в соответствии со шкалой, приведенной справа. На диаграмме присутствуют импульсы  $V_0$ , образованные отражением квазицилиндрической зондирующей волны от нижней поверхности пластинки, и импульсы  $V_2$ , производимые рассеянием на остриях. Волны, отраженные от верхней поверхности пластинки, приходят раньше импульсов  $V_0$  и не попадают в показанное временное окно.

В данном эксперименте отклики  $W_0, W_2$ , производимые плоскими волнами, синтезировались путем цифровой обработки полного пространственно-временного сигнала  $v_{jk}(t)$ . Для нахождения отклика плоских волн  $W$  для сигналов задаются задержки, линейно изменяю-



**Рис. 3.** Изображение тестового объекта  $I(x_0, z_0)$  (a) и зависимость  $I(x_0)$  при  $z_0 = 0.8$  mm (b).

щиеся по апертуре решетки, и производится их суммирование [4]:

$$W(s_1, s_2, \tau) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N v_{jk} \left( t - p \left( j - \frac{N+1}{2} \right) s_1 + p \left( k - \frac{N+1}{2} \right) s_2 \right). \quad (7)$$

Результат определения отклика  $W$  плоских волн показан на рис. 2,  $b$  как функция параметра  $s_2$  для  $s_1 = 0.053 \mu\text{s}/\text{mm}$ . Поскольку от нижней границы пластинки плоская волна отражается под углом, равным углу падения, отклик  $W_0$  имеет существенную величину при  $s_2 \approx s_1$ , что и наблюдается на приведенной диаграмме. На малых отражателях зондирующая волна рассеивается в широком диапазоне углов, поэтому отклик  $W_2$  существует во всем диапазоне  $s_2$ .

Результат построения изображения, произведенного по формуле (6), показан на рис. 3,  $a$ . Как видно, отклики от двух отражателей надежно различаются, а расстояние между их максимумами  $l$  соответствует расстоянию между отражателями (0,4 mm). Протяженность пространственного импульсного отклика по вертикали по уровню  $-3 \text{ dB}$  определяется длительностью временного импульса  $\delta T$  и скоростью звука в среде  $C_L$ :  $\delta z = \delta T C_L / 2 \approx 0.038 \text{ mm}$ , что соответствует экспериментальному значению  $\delta z = 0.035 \text{ mm}$  (рис. 3,  $a$ ). Ширина отклика в поперечном направлении составляет  $\delta x = 0.18 \text{ mm}$  (рис. 3,  $a, b$ ), а разрешающая способность по классическому критерию Рэлея для конфокальной когерентной системы визуализации имеет оценку  $\delta x \approx 0.15 \text{ mm}$  [5].

Таким образом, предлагаемый метод ультразвуковой визуализации в слоистых объектах обеспечивает фокусировку с требуемым пространственным разрешением. Следует отметить, что в этом методе необходимо знать только скорость звука в области визуализации, а информация о количестве и параметрах вышележащих слоев не требуется.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 16-07-01236.

## Список литературы

- [1] *Velichko A., Wilcox P., Drinkwater B.* // *Advances in acoustic microscopy and high resolution imaging: from principles to applications* / Ed. R. Maev. Weinheim: Wiley-VCH, 2013. P. 233–275.
- [2] *Jeune L.L., Robert S., Villaverde E.L., Prada C.* // *Ultrasonics*. 2016. V. 64. P. 128–138.
- [3] *Weston M., Mudge P., Davis C., Peyton A.* // *NDT&E Int.* 2012. V. 47. P. 43–50.
- [4] *Тупов С.А., Маев П.Г.* // *Акуст. журн.* 2013. Т. 59. № 5. С. 648–656.
- [5] *Кайно Г.* // *Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов.* Пер. с англ. М.: Мир, 1990. С. 221.