

УДК 534.6.08

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ В СЛОИСТЫХ ОБЪЕКТАХ С ПОМОЩЬЮ РАЗЛОЖЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО СИГНАЛА В СПЕКТР ПЛОСКИХ ВОЛН

© 2020 г. С. А. Титов^{1, 2, *}, П. В. Зинин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: sergetitov@mail.ru

Поступила в редакцию 29.07.2019 г.

После доработки 30.08.2019 г.

Принята к публикации 27.09.2019 г.

Рассмотрен метод визуализации в системе с фазированной ультразвуковой решеткой, осуществляемый через набор дополнительных слоев с неизвестными параметрами. Метод основан на разложении регистрируемого сигнала в спектр плоских импульсных волн и компенсации их задержек в слоях. Показано, что метод позволяет формировать изображения и производить измерение скорости звука по сигналу одиночного малого отражателя.

DOI: 10.31857/S0367676520010305

При решении различных задач в области ультразвуковой визуализации часто возникает ситуация, когда между ультразвуковой решеткой и исследуемым объектом находится ряд дополнительных слоев. При наличии единственного слоя с известной толщиной и скоростью звука в нем обычно рассчитывают время прохождения волн между элементами решетки и точкой фокусировки, учитывая преломление волн на границе раздела [1–3]. Объем вычислений, необходимый для реализации такого подхода, является весьма значительным, причем при наличии двух и более слоев он резко возрастает, что приводит к затруднению практического использования данного метода [4, 5]. Проблема еще более усложняется, если материалы слоев обладают анизотропией упругих свойств, либо пространство между решеткой и областью визуализации занято стратифицированной средой с непрерывно изменяющимися свойствами.

Использование плоских гармонических волн позволяет существенно упростить проблему, поскольку учесть их распространение через слои сравнительно легко [6, 7]. Вместе с тем, если в регистрируемом пространственно-временном сигнале можно выделить отклик от границы области визуализации, то более эффективным представляется использование плоских импульсных волн

[8]. Недавно такой подход были использован для измерения толщины слоя и скорости звука в нем [9]. В данной работе на основе разложения сигнала решетки в спектр плоских импульсных волн предлагается метод визуализации через набор слоев с неизвестными параметрами, а также метод измерения скорости звука в области визуализации по сигналу одиночного малого отражателя.

Схема измерений показана на рис. 1. Пространственно-временной сигнал $v(x_1, x_2, t)$, регистрируемый решеткой в зависимости от положений передающего и приемного элементов x_1, x_2 и времени t , может быть разложен в спектр откликов плоских импульсных волн путем его интегрирования по пространственным координатам:

$$V(s_1, s_2, \tau) = \iint v(-x_1, x_2, \tau + s_1 x_1 + s_2 x_2) dx_1 dx_2, \quad (1)$$

где переменные s_1, s_2 имеют смысл горизонтальных проекций векторов медленности падающей и рассеянной плоских волн, соответственно. Пределы интегрирования в выражении ограничены апертурой ультразвуковой решетки. Математически данное соотношение может трактоваться как преобразование Радона [10]. Пусть в принятом сигнале можно выделить составляющую $v_1(x_1, x_2, t)$, отраженную от границы между слоями и областью визуализации. Поскольку эта граница плоская, имеет место зеркальное отражение плоских

волн и, следовательно, $s_1 = s_2 = s$. Разложение этой составляющей в спектр плоских импульсных волн может быть представлено в виде свертки по временной переменной:

$$V_1(s, \tau) = A_1(s) p(\tau) * \delta(\tau - 2\tau_L(s)). \quad (2)$$

Здесь амплитуда спектра A_1 определяется диаграммой направленности элементов решетки и коэффициентами прохождения плоских волн через границы между слоями и коэффициентом отражения от верхней границы области визуализации, $p(\tau)$ является временным импульсным откликом измерительной системы. Задержки, приобретаемые составляющими спектра при прохождении набора слоев, равны:

$$\tau_L(s) = \sum_n d_n \sqrt{C_n^{-2} - s^2}, \quad (3)$$

где d_n есть толщины слоев и C_n — скорости звука в них. Следует отметить, что выражение (3) записано для конечного набора однородных слоев. Вместе с тем для случая горизонтально стратифицированной среды, заполняющей промежуток между решеткой и областью визуализации, также возможно введение функции $\tau_L(s)$, которая задает задержку плоской волны в такой среде.

Для составляющих спектра, прошедших через область визуализации и отраженных от ее нижней границы, можно записать аналогичное выражение:

$$V_2(s, \tau) = A_2(s) p(\tau) * \delta(\tau - 2\tau_L(s) - 2\tau_d(s)). \quad (4)$$

Здесь дополнительная задержка, приобретаемая волнами при прохождении через область визуализации, равна:

$$\tau_d(s) = d \sqrt{C^{-2} - s^2}, \quad (5)$$

где d и C — толщина этой области и скорость звука в ней, соответственно.

Путем измерения задержки V_2 относительно V_1 можно определить зависимость $\tau_d(s)$, а затем методом нелинейного оценивания восстановить скорость ультразвука в материале слоя C и его толщину d . Такой подход был развит и экспериментально подтвержден в работе [7]. Однако, если сигнал от нижней границы зоны визуализации не доступен для регистрации, но в принятом сигнале может быть выделен сигнал от отдельного точечного отражателя, то тогда также представляется возможным определение скорости C и координат отражателя.

Спектр отклика, рассеянного в области визуализации точечным отражателем с координатами (x_0, z_0) , может быть представлен в виде свертки по временной переменной:

$$V_0(s_1, s_2, \tau) = A_0(s_1, s_2) p(\tau) * \delta(\tau - \tau_L(s_1) - \tau_L(s_2) - \tau_x - \tau_z). \quad (6)$$

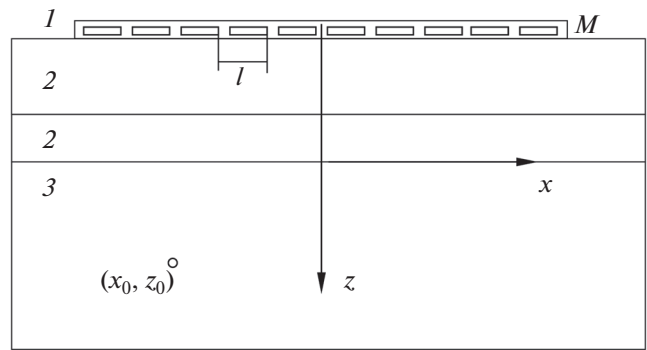


Рис. 1. Схема измерений: 1 — ультразвуковая решетка; 2 — промежуточные слои; 3 — область визуализации.

Здесь амплитуда спектра A_0 определяется диаграммой направленности элементов решетки и коэффициентами прохождения плоских волн через границы между слоями, а временные задержки плоских волн при их распространении от верхней границы области визуализации до отражателя и обратно в горизонтальном и вертикальном направлениях равны, соответственно:

$$\tau_x = x_0 (s_1 - s_2), \quad (7)$$

$$\tau_z = z_0 \left(\sqrt{C^{-2} - s_1^2} + \sqrt{C^{-2} - s_2^2} \right). \quad (8)$$

Способ измерения скорости C сводится к следующей последовательности операций. Сначала по спектру V_1 измеряют задержку плоских волн $\tau_L(s)$, отраженных от верхней плоскости области визуализации. Далее в выделенном отклике от точечного отражателя V_0 (6) полагают $s_1 = s_2$ и производят компенсацию измеренной задержки $\tau_L(s)$. Поскольку в полученном спектре $V_0(s, s, \tau)$ в соответствии с (7) задержка $\tau_x = 0$, можно измерить зависимость $\tau_z(s)$. Наконец, пользуясь модельным соотношением (8), методом нелинейного оценивания можно получить значения скорости C и глубины z_0 .

Предложенный метод измерения скорости звука в слое по сигналу, записанному от одиночного точечного отражателя, был подтвержден экспериментально на ряде тестовых образцов. В эксперименте использовалась 64-элементная ультразвуковая решетка с центральной частотой 5 МГц и периодом расположения прямоугольных элементов $l = 0.6$ мм.

На рис. 2 показаны результаты исследования тестового отверстия диаметром 0.8 мм, выполненного в дюралюминиевом блоке на глубине 12.5 мм. Отверстие располагалось примерно под центром решетки. Между решеткой и блоком дополнительно находилась пластина из полистирола толщиной 25.4 мм. Измеренный пространственно-временной сигнал ультразвуковой решетки

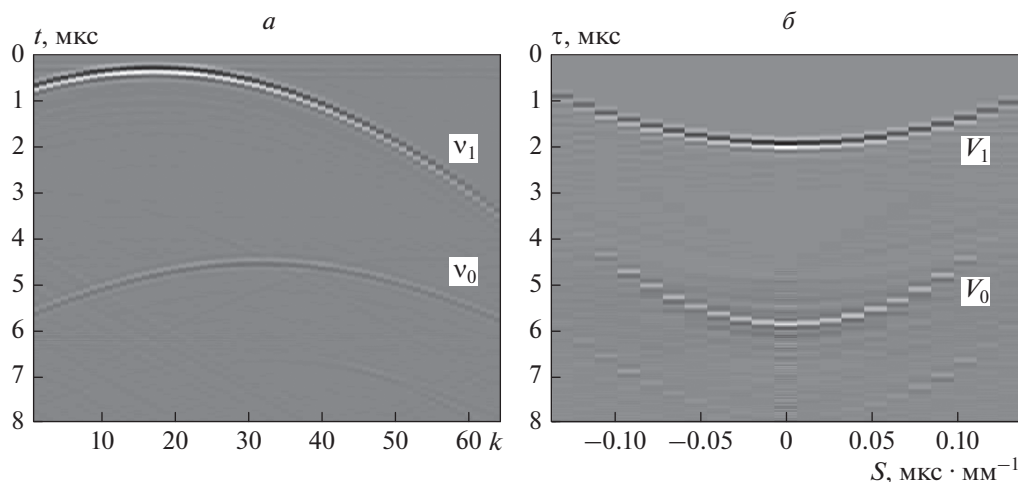


Рис. 2. Сигнал от тестового отверстия $v_{jk}(t)$ ($j = 16$) и спектр сигнала $V(s, \tau)$.

$v_{jk}(t)$ представлен на рисунке в виде полутонного изображения в зависимости от времени t и номеров передающего и приемного элементов j и k соответственно. Величина знакопеременного сигнала отображается оттенками серого в соответствии со шкалой, показанной справа. В качестве примера на рис. 2а приведены компоненты сигнала, принятые всеми элементами решетки, при использовании элемента с номером $j = 16$ в качестве передающего. В сигнале выделяется отклик v_1 , отраженный от границы алюминий–полистирол, и отклик v_0 от тестового отверстия. Задержка импульсов v_1 распределена по приемным элементам симметрично относительно передающего 16-го элемента в силу зеркальности отражения волн от верхней границы. Тестовое отверстие рассеивает падающую волну во все стороны, а время распространения зондирующей волны от элемента с фиксированным номером до отверстия постоянно. Поэтому задержка импульсов v_0 имеет минимум для приемного элемента, ближайшего к отверстию, в данном случае для элемента с номером $k = 32$ (рис. 2а).

Спектр плоских волн $V(s, \tau)$, рассчитанный по принятому сигналу, показан на рис. 2б. Диапазон параметра s , для которого рассчитывался спектр, был ограничен значением $|s| < s_m = 0.13 \text{ мкм} \cdot \text{мм}^{-1}$, чтобы не превышать критического значения для алюминия $s_m < C^{-1} = 0.16 \text{ мкм} \cdot \text{мм}^{-1}$. Расчет спектра проводился по дискретному варианту формулы (1), в котором интегрирование заменено суммированием по всем N элементам решетки:

$$V(s, \tau) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N v_{jk}(\tau + sl(j + k - N - 1)). \quad (9)$$

В полученном спектре выделяются составляющие V_1 и V_0 , которые создаются сигналами v_1 и v_0 ,

соответственно. Составляющая V_1 имеет задержку $\tau_L(s)$, а между V_1 и V_0 задержка равна $\tau_z(s)$. Выражение (8) для задержки τ_z можно записать в виде модельного уравнения, линейного относительно переменной s^2 :

$$\tau_z^2 = \frac{4z_0^2}{C^2} - 4z_0^2 s^2, \quad (10)$$

по которому методом наименьших квадратов можно найти z_0 и C . Используя многократно измеренные зависимости $\tau_z(s)$, мы получили значения расстояния $z_0 = 12.2 \pm 0.3 \text{ мм}$ и скорости $C = 6220 \pm 250 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Полученные результаты соответствует реальным значениям, а относительные погрешности измерения можно оценить как 3% и 4% для координаты и скорости ультразвука соответственно.

Для построения изображений по предлагаемому методу измеренный пространственно-временной сигнал сначала раскладывается в спектр плоских волн:

$$V(s_1, s_2, \tau) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N v_{jk}(\tau + s_1 l(j - N - 0.5) + s_2 l(k - N - 0.5)). \quad (11)$$

Далее в полученном спектре выделяется составляющая V_1 и с использованием диагональных компонент $s = s_1 = s_2$, проводится измерение задержки плоских волн $\tau_L(s)$. По измеренной зависимости рассчитываются задержки $\tau_L(s_1)$ и $\tau_L(s_2)$, и осуществляется их компенсация в составляющей спектра $V_0(s_1, s_2, \tau)$. При формировании изображения для каждой точки области визуализации производится также компенсация задержек τ_x, τ_z и осуществляется суммирование по параметрам (s_1, s_2) . В дискретном представлении описанный

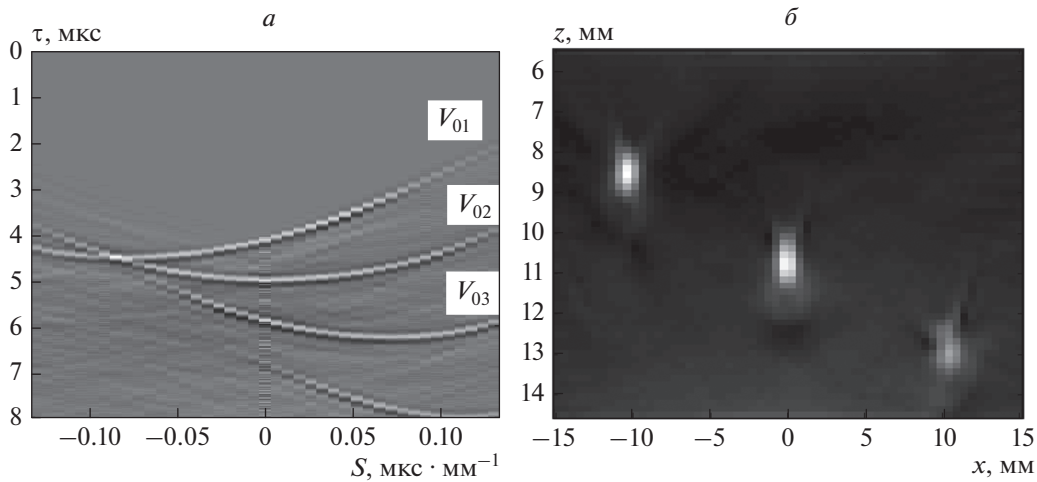


Рис. 3. Спектр $V_0(s_1, s_2, \tau)$ ($s_2 = 0.026 \text{ мм} \cdot \text{мкс}^{-1}$) и полученное изображение.

алгоритм построения изображения может быть выражен следующим образом:

$$I(x_0, z_0) = \sum_{n=-M}^M \sum_{m=-M}^M V_0(\Delta_s n, \Delta_s m, \tau + \tau_L(\Delta_s n) + \tau_L(\Delta_s m) + \tau_x + \tau_z), \quad (11)$$

$$\tau_x = x_0 \Delta_s (n - m), \quad (12)$$

$$\tau_z = z_0 (\sqrt{C^{-2} - \Delta_s^2 n^2} + \sqrt{C^{-2} - \Delta_s^2 m^2}). \quad (13)$$

Здесь $\Delta_s = s_m M^{-1}$ — шаг дискретизации спектра. Скорость ультразвука C в визуализируемой области должна быть известной либо быть определенной в соответствии с описанным выше методом. Шаг дискретизации Δ_s , или число отсчетов $2M + 1$ в полосе $2s_m$, выбираются таким образом, чтобы в изображении отсутствовали артефакты. Помехи такого сорта могут возникать, если в точках, где отсутствует отражатель, не происходит полной взаимной компенсации спектральных составляющих вследствие их малого числа.

В качестве тестового объекта визуализации использовался алюминиевый блок с тремя малыми отверстиями, расположенными на разной глубине. Между блоком и ультразвуковой решеткой находился слой полистирола толщиной 25.4 мм. Расстояния между отверстиями по горизонтали составляли 10 мм, по вертикали — 2 мм. На рис. 3а представлен рассчитанный спектр плоских волн компоненты V_0 , показанный при фиксированном значении параметра $s_2 = 0.026 \text{ мм} \cdot \text{мкс}^{-1}$. В спектре видны отдельные отклики $V_{01} - V_{03}$, образованные отражением от соответствующих отверстий. Полученное изображение, показанное на рис. 3б, правильно воспроизводит положение отверстий.

Разрешающая способность, полученная в данном эксперименте, может быть оценена по ширине δx и длине δz пространственного отклика. Из рис. 3б следует, что $\delta x \approx 0.9 \text{ мм}$, $\delta z \approx 0.7 \text{ мм}$. Теоретическое значение поперечного разрешения может быть оценено по известному выражению:

$$\delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_m}, \quad (14)$$

где λ — характерная длина волны, θ_m — максимальный апертурный угол. Для используемой в эксперименте частоты длина волны ультразвука в алюминии равна 1.2 мм, а угол может быть оценен из максимального значения проекции вектора медленности плоских волн: $\sin \theta_m \approx s_m C \approx 0.8$. Таким образом, теоретическая оценка составляет $\delta x \approx 0.75 \text{ мм}$, что согласуется с экспериментальным значением. Продольное разрешение в широкополосном импульсном режиме работы определяется скоростью звука в материале и длительностью сигнала. Считая, что она равна приблизительно периоду колебаний на центральной частоте 5 МГц, и учитывая, что при распространении волны до отражателя и обратно происходит удвоение времени, продольную разрешающую способность можно оценить $\delta z \approx 0.5\lambda = 0.6 \text{ мм}$. Данная оценка также находится в согласии с результатами эксперимента.

В работе рассмотрена задача ультразвуковой визуализации в системе с фазированной решеткой, осуществляемой через промежуточные слои. Показано, что по спектру плоских импульсных волн, получаемому путем преобразования полного пространственно-временного сигнала решетки, возможно найти задержку этих волн в системе слоев и исключить ее из спектра волн, рассеянных на неоднородностях в области визуализации. В работе предложена методика измерения скорости звука в области визуализации по простран-

ственно-временному сигналу, рассеянному одиночным малым отражателем. В этой методике спектр плоских импульсных волн этого сигнала используется для измерения зависимости задержки спектральных составляющих от направления распространения, а скорость звука и положение отражателя определяются по полученной зависимости методом нелинейного оценивания. Полученное значение скорости звука может использоваться далее на этапе построения ультразвукового изображения. Оно формируется путем суммирования составляющих спектра плоских импульсных волн, для которых осуществлена компенсация времен распространения от решетки до визуализируемой точки и обратно.

Экспериментальное подтверждение разработанной методики выполнено с помощью линейной решетки с центральной частотой 5 МГц. В качестве тестового объекта использовался алюминиевый блок с отверстиями, а между блоком и решеткой помещался дополнительный слой из полистирола. Погрешность измерения скорости продольной волны в блоке и положение одиночного тестового отверстия были определены с погрешностями 4 и 3% соответственно. Построенное ультразвуковое изображение группы тестовых

отверстий имеет продольное и поперечное разрешения, соответствующие теоретическим величинам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Drinkwater B.W., Wilcox P.D.* // NDT&E Int. 2006. V. 39. № 7. P. 525.
2. *Jeune L.L., Robert S., Villaverde E.L. et al.* // Ultrasonics. 2016. V. 64. P. 128.
3. *Weston M., Mudge P., Davis C. et al.* // NDT&E Int. 2012. V. 47. P. 43.
4. *Dziewierz J., Gachagan A.* // IEEE Trans. UFFC. 2013. V. 60. P. 1256.
5. *Cruza J.F., Camacho J., Moreno J.M. et al.* // NDT&E Int. 2015. V. 74. P. 1.
6. *Chen Y., Lou Y., Yen J.* // Ultrason. Imag. 2017. V. 39. P. 207.
7. *Merabet L., Robert S., Prada C.* // IEEE Trans. UFFC. 2019. V. 66. P. 772.
8. *Титов С.А.* // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 16. С. 41.
9. *Титов С.А., Маев Р.Г.* // Акуст. журн. Т. 59. № 5. 2013. С. 648; *Titov S.A. Maev R.G.* // Acoust. Phys. 2013. V. 59. № 5. P. 600.
10. *Kebaili A., Schmitt D.R.* // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. P. 3278.