

УДК 620.179.1

Определение формы объекта в ультразвуковой дефектоскопии с помощью кусочно-линейного представления

А.С. Фадин

Фадин Алексей Сергеевич — аспирант кафедры основ радиотехники НИУ «МЭИ», e-mail: Alerksei-fadin@yandex.ru

Предложен новый способ представления формы дна объекта с использованием неразрушающего ультразвукового контроля. Изображение дна объекта контроля представлено в виде множества коротких отрезков; каждый отрезок является предполагаемым местом отражения ультразвукового сигнала. Место пересечения отрезков является местом отражения ультразвукового сигнала. Предложен алгоритм стирания отрезков, которые не являются местом отражения ультразвукового сигнала от дна. Это стирание производится с использованием элементарной логики. Данная операция выполняется быстро. После стирания остаются отрезки, которые являются местом отражения ультразвукового сигнала от дна.

Ввиду того что среда постоянна и неизменна, становится возможным накапливать полученные эхо-сигналы, поэтому используется метод синтезированной апертуры. Применяется раздельно-совмещенный ультразвуковой датчик, который перемещается с постоянным шагом. Каждый сигнал заносится в память. Количество шагов N . После получения эхо-осциллограмм происходит обработка сигналов.

В предполагаемом объекте контроля присутствует сильное затухание ультразвука, поэтому используется сложно модулированный сигнал.

Проведено компьютерное моделирование. В каждой компьютерной модели использована новая форма дна объекта. Проведено сравнение томограммы и предложенного способа визуализации формы дна объекта. В компьютерной модели используется однородная среда с сильным затуханием.

Проведены эксперименты, в каждом из которых использована новая форма дна объекта. Проведено сравнение томограммы и предложенного способа визуализации формы дна объекта. В эксперименте в качестве среды использована вода.

Произведено сравнение полученных результатов, сделаны выводы. Во многих случаях новое представление объекта дает более четкую картину.

Ключевые слова: ультразвуковая дефектоскопия, метод синтезированной апертуры, алгоритм стирания.

Determining the Shape of an Object in Ultrasonic Flaw Detection Using Piecewise-Linear Representation

A.S. Fadin

Fadin Aleksey S. — Ph.D.-student of Fundamentals of Radio Engineering Dept., MPEI, e-mail: Alerksei-fadin@yandex.ru

A new way of representing the shape of an object bottom using non-destructive ultrasonic testing techniques is proposed. The image of the examined object's bottom is represented by a set of short segments. Each of these segments is a tentative ultrasonic signal reflection place. The segment intersection place is the place at which the ultrasonic signal is reflected.

An algorithm for erasing segments that are not a place at which the ultrasonic signal is reflected from the bottom is proposed. This erasing is performed using elementary logic and takes a short time to do. The segments that remain after erasing are the places at which the ultrasonic signal is reflected from the bottom.

Since the medium is constant and remains unchanged, it becomes possible to accumulate the obtained echo signals. Owing to this feature, the synthetic aperture method is used. An ultrasonic pitch-catch sensor moving with a constant step is used. Each signal is saved in memory. The total number of steps is N . After obtaining the echo oscillograms, the signals are subjected to processing.

It is assumed that strong attenuation of ultrasound is observed in the object being examined, due to which a complex modulated signal is used.

Computer-aided simulation was carried out. A new shape of the object bottom is used in each computer model. The proposed method for visualizing the object's bottom shape is compared with a tomogram. A homogeneous medium with strong damping is used in the computer model.

Experiments with a new object bottom shape in each of them are carried out. The tomogram and the proposed method for visualizing the object bottom shape are compared with each other. Water was used in the experiment as the medium.

The obtained results have been compared with each other, and conclusions have been drawn. In many cases, the new representation of an object gives a clearer picture.

Key words: ultrasonic flaw detection, synthetic aperture method, erasing algorithm.

Введение

В настоящее время в ультразвуковой (УЗ) дефектоскопии особую сложность представляет получение изображения формы дна объекта из материала со сложной структурой, например бетона, эхо-методом. В сложно-структурных материалах УЗ волна претерпевает множество переотражений от внутренних неоднородностей, что приводит к появлению пространственной помехи и быстрому затуханию сигнала. Эффективным методом выделения эхо-сигнала из пространственной помехи является многоканальная пространственная обработка сигналов [1], для чего применяются фазированные антенные решетки (ФАР) и сложно модулированные сигналы с последующей оптимальной фильтрацией. Еще одна проблема связана с влиянием акустической наводки, которая возникает в результате прохождения поверхностной волны от излучающего преобразователя к приемному. При использовании ФАР из датчиков продольного типа волн бороться с поверхностной волной очень сложно. Для подавления наводки целесообразно использовать раздельно-совмещенный датчик и накопление сигнала с последующим синтезированием апертуры.

Для решения поставленной задачи получения изображения формы донной поверхности необходимо проводить обработку полученных эхо-осциллограмм. Известен алгоритм «фокусировка в точку» [2], который позволяет получить изображение внутренней структуры объекта в виде амплитудно-цветового представления. Однако изображение плоской границы объекта, построенное с помощью этого алгоритма, имеет вид локальной яркостной отметки с максимумом интенсивности в центре [2]. Поэтому для обнаружения и визуализации плоской границы объекта был разработан алгоритм «фокусировка на плоскость» [3]. Этот алгоритм обладает высокой эффективностью, позволяя определить координаты плоскости и угол ее наклона с высокой точностью. Однако если граница изделия не плоская, а искривленная, этот алгоритм перестает работать и форму рельефа поверхности он определить не может. Были произведены попытки распознавания формы дна отражающей поверхности с использованием метода синтезированной апертуры [3], однако данный алгоритм был проверен только на отражении от плоской границы, имеющей определенный угол наклона.

Восстановить форму отражающей поверхности в металлах эхо-методом позволяет алгоритм, описанный в [4]. Учитываются разные схемы регистрации эхо-сигналов с учетом трансформации типа волны при многократном отражении ультразвукового пучка от неровных границ объекта контроля, состоящего из нескольких изотропных областей с разными акустическими свойствами. Однако в сложном структурном материале типа бетона затухание УЗ волны намного больше, чем в металле, поэтому работа идет в области

низких частот (порядка сотен килогерц) и вести учет переотражений невозможно ввиду расползания фронта волны.

В итоге на сегодняшний день нет универсального метода или алгоритма, способного определить форму отражающей поверхности эхо-методом в среде с сильными переотражениями и затуханием УЗ волны в области низких частот. Рассмотрим алгоритм для решения поставленной проблемы.

Кусочно-линейный алгоритм

Предложенный алгоритм обработки сигналов позволяет выявить форму отражающей поверхности в среде с сильным частотно-зависимым затуханием эхо-методом. Алгоритм работает в режиме синтезированной апертуры с использованием датчика, состоящего из приемного и передающего элементов (раздельно-совмещенный датчик). Особенность использования раздельно-совмещенного датчика состоит в том, что паразитная УЗ наводка при каждом его положении одинакова по времени прихода сигнала, а значит, можно избавляться от нее путем вычитания.

Обозначим расстояние между приемным и передающим элементами как $d_{\text{дат}}$ (рис. 1). Ввиду неизменности состояния среды можем сколь угодно долго накапливать сигналы синтезированной апертуры, не ограничиваясь во времени зондирования. Приемно-передающий датчик перемещается по поверхности объекта с шагом $d_{\text{син}}$.

Датчики излучают продольный тип волн. Обычно апертура датчика меньше длины волны, значит, датчики продольного типа волн имеют косинусную диаграмму направленности, следовательно, подчиняются зависимости

$$F(\theta) = \cos(\theta) = z/r_j, \quad (1)$$

где z — продольная координата; r_j — расстояние от датчика до места отражения волны.

Для зондирования используются импульсы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) с центральной частотой f_0 и шириной спектра Δf . Обработка эхо-сигнала при компьютерном моделировании, расчете или обработке реального эхо-отклика включает следующие математические операции: учет диаграмм направленности (ДН) излучающего и приемного датчиков, учет рассеивания и затухания УЗ сигнала, а также согласованную фильтрацию. Представлена формула, в которой учтены описанные выше операции:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi r} F(\theta)_1 F(\theta)_2 \exp(-\alpha r) \times \int S_{\text{эхо}}(\omega) S'_{\text{ЛЧМ}}(\omega) \exp(-j\omega t) d\omega, \quad (2)$$

где $F(\theta)_1$ и $F(\theta)_2$ — ДН для излучающего и приемного элементов соответственно; $\exp(-\alpha r)$ — учет закона затухания УЗ сигнала; $1/2\pi r$ — учет рассеивания УЗ сигнала; $S_{\text{эхо}}(\omega)$ — спектр эхо-сигнала; $S'_{\text{ЛЧМ}}(\omega)$ — оптимальный фильтр. Здесь

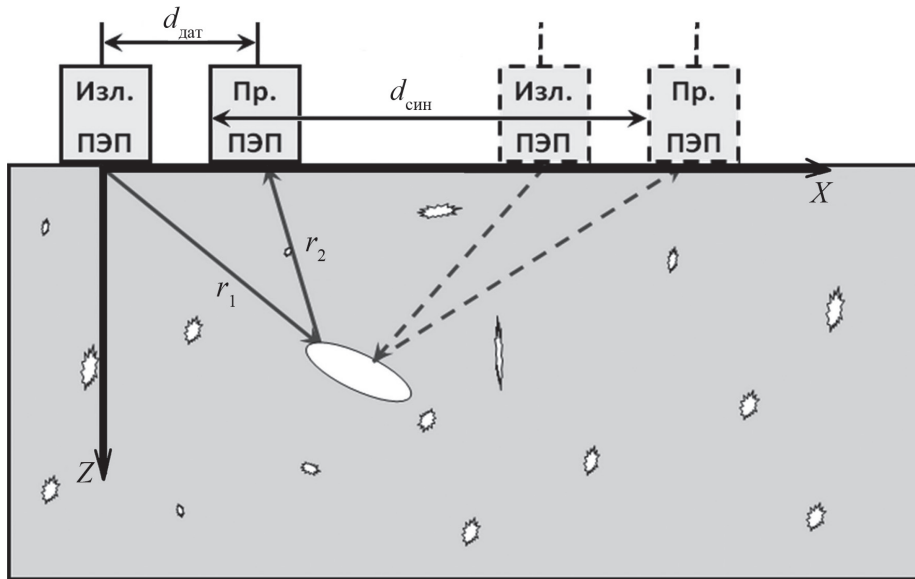


Рис. 1. Схема контроля объекта

$$r = r_1 + r_2, \quad (3)$$

где r_1 — расстояние от излучающего преобразователя до места отражения; r_2 — расстояние от места отражения до приемного преобразователя.

После получения всех эхо-осциллограмм проводится следующая обработка. Для каждой эхо-осциллограммы проводится вычитание паразитной наводки из принятого сигнала. Оператор выбирает общий нормированный порог $U_{пор}$, ниже которого все значения сигнала обнуляются.

Далее по положению максимума полученной осциллограммы определяется временная задержка эхо-сигнала $t_{эхо}$. Однако направление прихода отраженной волны остается неизвестным. Геометрическое место точек, соответствующих возможному месту отражения зондирующего сигнала, — это полуокружность с центром в месте положения датчика и радиусом, определяемым временной задержкой сигнала. Однако только одна точка на этой полуокружности соответствует фактическому месту отражения сигнала. Чтобы найти эту точку, производится зондирование объекта из другого положения датчика и строится аналогичная полуокружность, соответствующая новому положению датчика. Точка пересечения этих полуокружностей соответствует фактическому месту отражения сигнала. Чтобы найти эту точку пересечения, предложен следующий алгоритм.

В узлах виртуальной сетки с шагом $d_{сет}$ строятся отрезки длиной в два шага сетки по дуге окружности с радиусом, равным расстоянию от датчика до места отражения, и центром в месте расположения датчика (рис. 2, а). После этого проводится зондирование из следующего положения датчика и строится соответ-

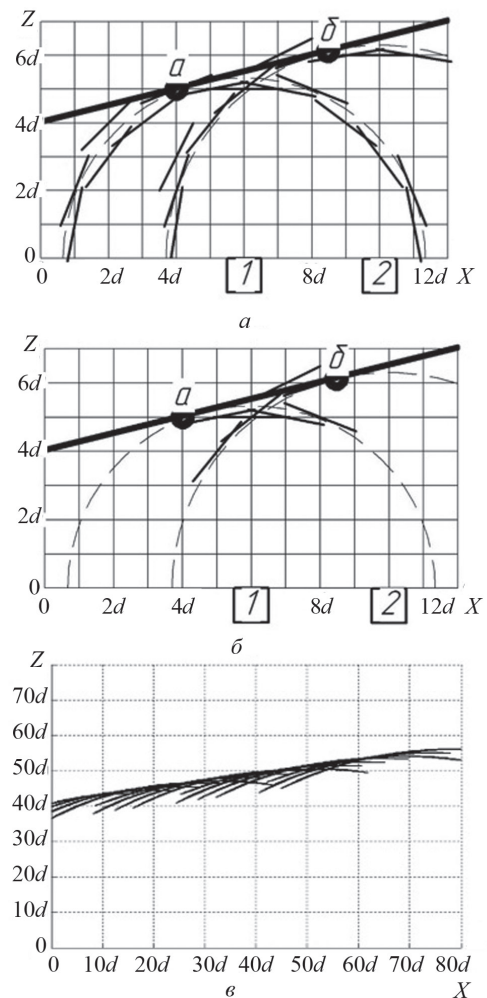


Рис. 2. Работа алгоритма:

а — построение возможных отражений по задержке эхо-сигнала; б — результат работы алгоритма по двум положениям датчика; в — итоговая картина по N положениям датчика

ствующая этому положению полуокружность, состоящая из отрезков.

Шаг сетки обязательно должен быть меньше $1/8$ части длины волны. Чем меньше шаг сетки, тем четче будет картина, но при этом дольше будет длиться обработка сигналов.

Далее проводится проверка на выполнение следующих условий: если отрезки данной полуокружности, соответствующие соседним отрезкам полуокружностей, оказываются в пределах одной ячейки сетки и не параллельны, то эти отрезки сохраняются, а остальные отрезки удаляются (рис. 2, б). Чтобы избежать появления ложных точек отражения, шаг сетки должен быть значительно меньше шага перемещения датчика. Соседними полуокружностями считаются соответствующие им соседние положения датчика.

Процесс продолжается, пока не будет получена полная картина отражающей границы изделия (рис. 2, в).

Стоит заметить, что рис. 2 является пояснительным, где шаг сетки выбран очень большим для наглядности, на самом деле он намного меньше. Результаты моделирования приведены далее.

В итоге получается картина аппроксимированной поверхности. В данном примере для наглядности и простоты объяснения в качестве объекта выбрана наклонная неограниченная плоскость. При большем числе положений датчика алгоритм обработки аналогичен.

Компьютерное моделирование

Рассмотрим несколько примеров моделирования для реального представления работы алгоритма. Созданное виртуальное пространство компьютерной модели имитирует среду, аналогичную бетону с коэффициентом затухания $\alpha = 40$ дБ/м. В качестве зондирующего сигнала использовали ЛЧМ сигнал с центральной частотой 100 кГц и шириной спектра 100 %.

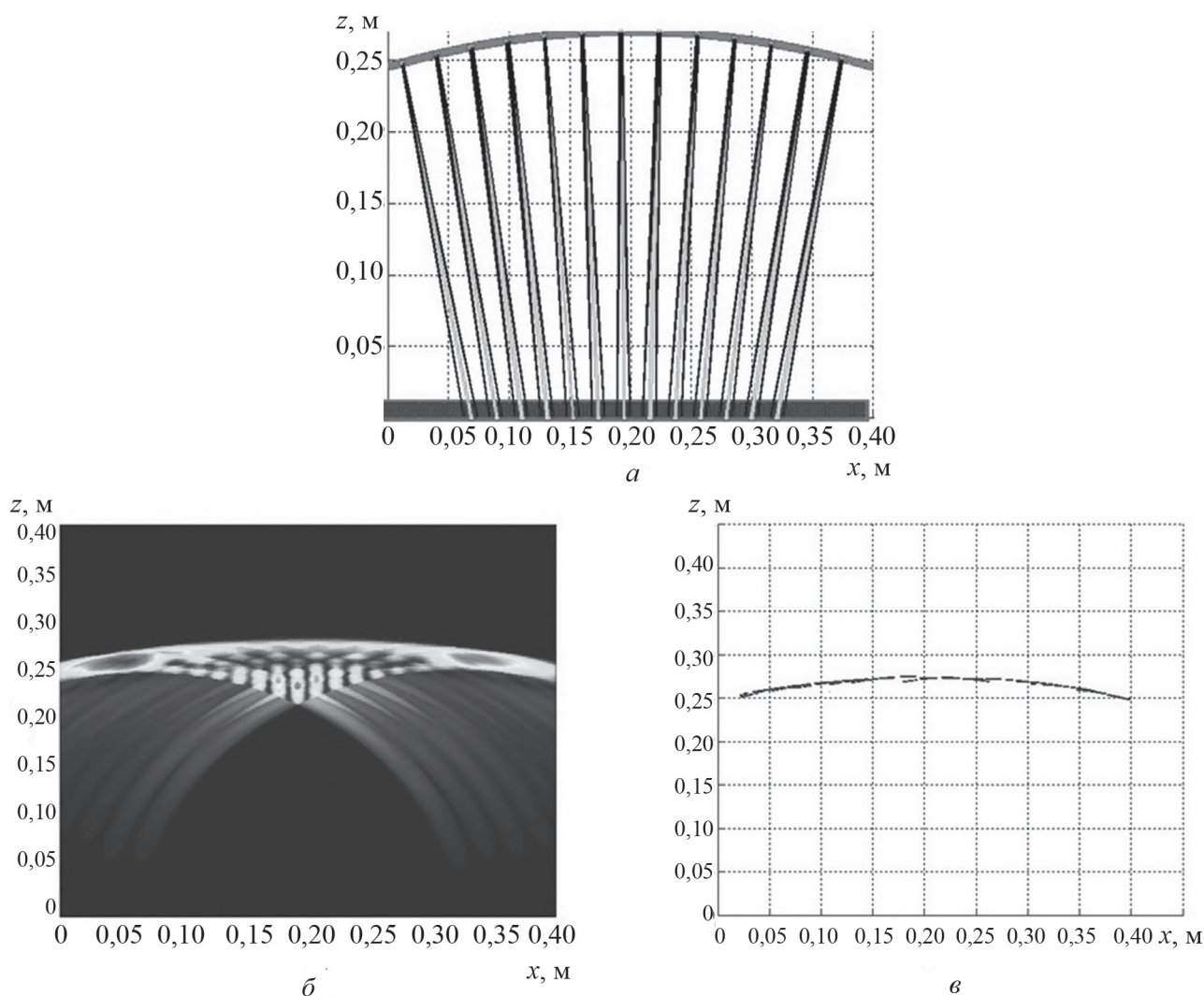


Рис. 3. Выгнутая вверх часть полуокружности:

a — модель отражающей поверхности; *б* — амплитудно-цветовое представление; *в* — кусочно-линейное представление

Расчет эхо-сигналов проводится по формуле (2). В модели проводится расчет хода волны по закону геометрической оптики. На рис. 3 представлены тестовая модель для выгнутой вверх поверхности (части окружности). На рис. 3, *а* представлена действительная форма поверхности (верхняя жирная линия). В модели учитывается наличие слепых зон, которыми являются крайние положения датчика. На рис. 3, *б* представлен результат расчета по алгоритму «фокусировка в точку» [2] в виде амплитудно-цветовой картины. Видны ложные отражения, вызванные синфазным сложением сигналов. На рис. 3, *в* представлен результат работы кусочно-линейного алгоритма. На изображении, полученном с помощью кусочно-линейного алгоритма, четко видна форма отражающей поверхности при отсутствии ложных отражений. Первое достоинство кусочно-линейного алгоритма — способность борьбы со случайным синфазным сложением сигналов.

Следующая тестовая компьютерная модель отражающей поверхности приведена на рис. 4, *а*. Она представляет собой две параллельные плоскости, расположенные на разной глубине. Это самый наглядный пример, показывающий, что при амплитудно-цветовом представлении акустического поля с помощью алгоритма «фокусировка в точку», можно не зарегистрировать наличие отражающей поверхности, расположенной дальше относительно сильно отражающей (ближней) поверхности (рис. 4, *б*). В кусочно-линейном представлении данная проблема отсутствует ввиду нормировки каждой полученной эхо-осциллограммы (рис. 4, *в*).

Таким образом, компьютерное моделирование показало не только работоспособность кусочно-линейного алгоритма, но и его достоинства в сравнении с амплитудно-цветовым представлением.

Экспериментальная часть

Экспериментальная проверка работоспособности кусочно-линейного алгоритма проведена на стенде иммерсионного контроля TRITON 1000 (модель US 521, изготовитель TecniTestNDT, Испания). В ванну погружали тестовые образцы разных форм из имевшихся композитных слоистых материалов. Погруженный датчик перемещался линейно с шагом $1/10$ длины волны. Ванна заполнена водой, поэтому скорость распространения объемной продольной волны 1500 м/с, что отличается от скорости распространения продольной УЗ волны в бетоне. Тем не менее в качестве зондирующего использовался ЛЧМ сигнал с центральной частотой 100 кГц и полосой 100 %. Подобраны тестовые образцы, плоскость отражения которых можно представить схематично в двумерном представлении.

Аналогично с компьютерным моделированием сравниваются методы построения в виде амплитудно-цветовой картины с кусочно-линейным представлением

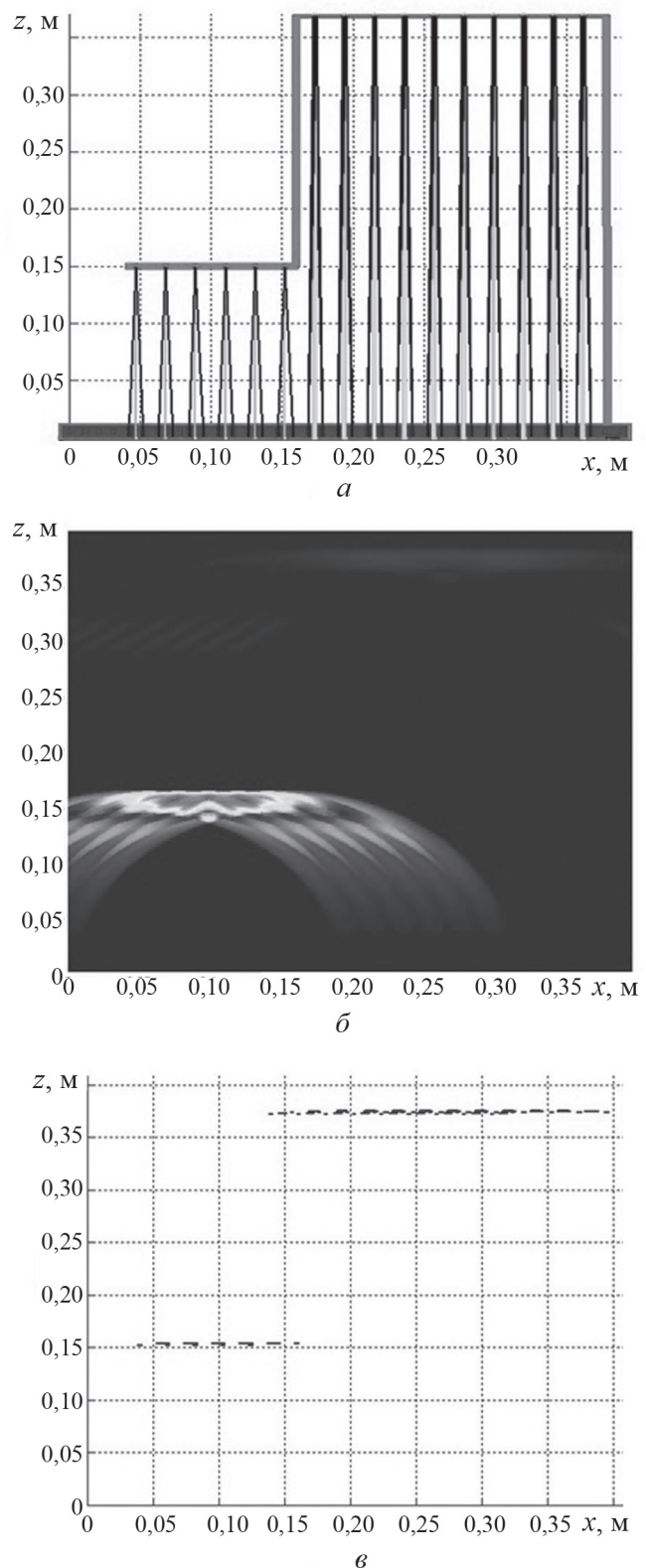


Рис. 4. Разноуровневые плоскости: *а* — модель отражающей поверхности; *б* — амплитудно-цветовое представление; *в* — кусочно-линейное представление

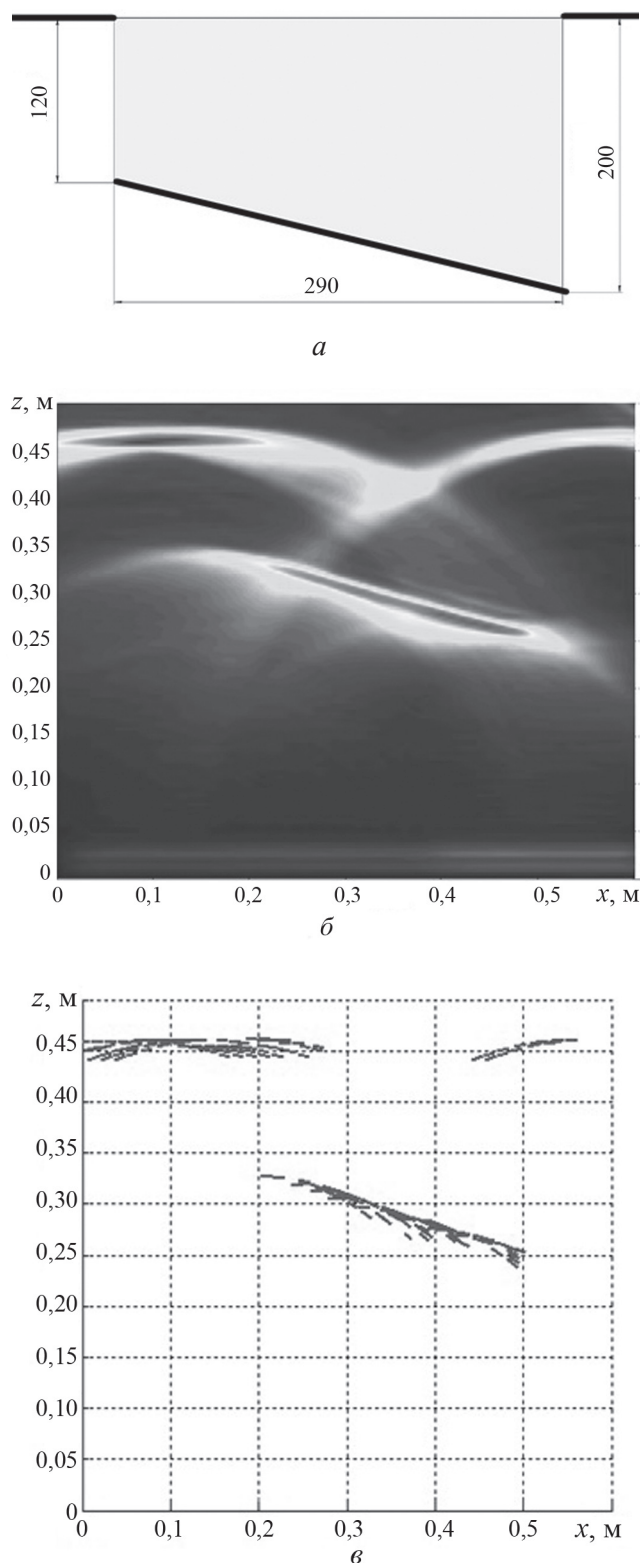


Рис. 5. Результаты обработки зондирования наклонной плоскости:

a — эскиз тестового образца; *б* — амплитудно-цветовое представление; *в* — результат работы кусочно-линейного представления

ем формы отражающей поверхности. На рис. 5, *a* представлена форма тестового образца и его габаритные размеры. Жирной линией выделена граница отражения. На рис. 5, *б* приведен результат работы алгоритма «фокусировка в точку», на рис. 5, *в* — результат работы представленного алгоритма.

Проведенный эксперимент с наклонной плоскостью дает информацию о форме отражающей поверхности, ее наклоне и протяженности.

Результат кусочно-линейного представления формы отражающей поверхности (см. рис. 5, *в*) получился более чистый. В нем отсутствует явление синфазного сложения (цветовое пятно за наклонной плоскостью на рис. 5, *б*), четко выделена граница тестовой поверхности. Алгоритм представления отражающих поверхностей в кусочно-линейном виде является более чувствительным, как было показано при компьютерном моделировании. Часть дна иммерсионного стенда четко видна за отражающей поверхностью тестового образца на промежутке 0,2 ... 0,3 м.

На рис. 6, *a* представлен тестовый образец изогнутой поверхности. Крайняя правая часть тестового образца имеет сильный наклон, около 35° , поэтому на входе приемного элемента отсутствует полезный эхо-сигнал. При амплитудно-цветовом представлении с использованием алгоритма «фокусировка в точку» (рис. 6, *б*) снова можно наблюдать явления синфазного сложения, что может ввести в заблуждение оператора. Данное явление отсутствует при использовании кусочно-линейного представления, также четче видна крайняя правая часть дна иммерсионного стенда.

Далее был проведен эксперимент с выгнутой вверх поверхностью (или частью окружности) (рис. 7, *a*). В результате для алгоритма «фокусировка в точку» (рис. 7, *б*) не наблюдается явления синфазного сложения сигналов ввиду большого радиуса кривизны тестового образца и малой длины волны по сравнению с протяженностью тестового образца, как это было в компьютерной модели (см. рис. 3). Для двух вариантов представления отражающей поверхности результат получается удовлетворительным: ясно видны форма и границы объекта, возможно определить его протяженность. Однако кусочно-линейный алгоритм более чувствителен. Снова можно наблюдать донный сигнал от иммерсионного стенда на фоне отражения от тестового образца.

Заключение

Приведенный алгоритм обработки эхо-осциллограмм и способ представления отражающих поверхностей является новым способом определения границ исследуемого объекта. Разработанный метод отлично справляется с явлением синфазного сложения, способен различать слабо отраженные эхо-сигналы на фоне

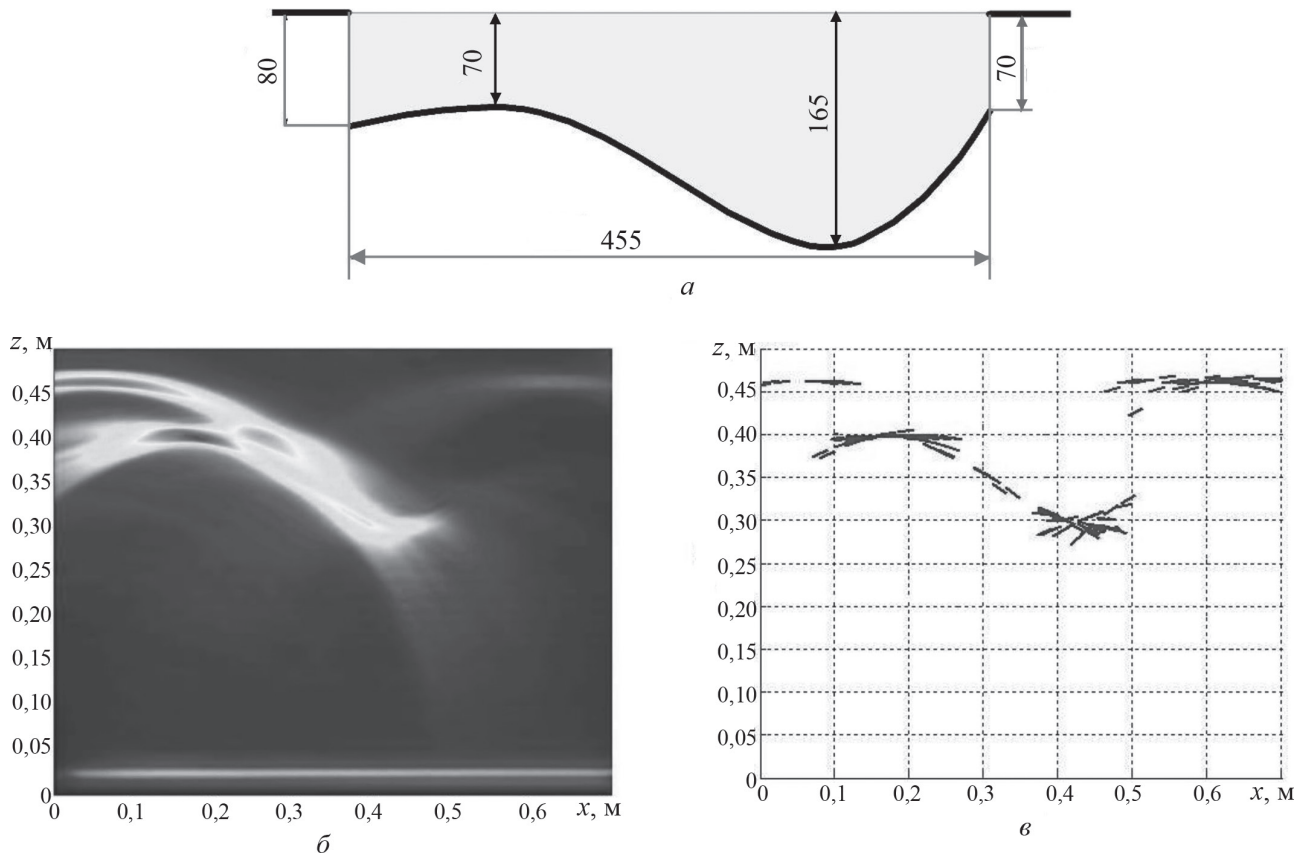


Рис. 6. Результаты обработки зондирования изогнутой поверхности:

a — эскиз тестового образца; *б* — амплитудно-цветовое представление; *в* — кусочно-линейное представление

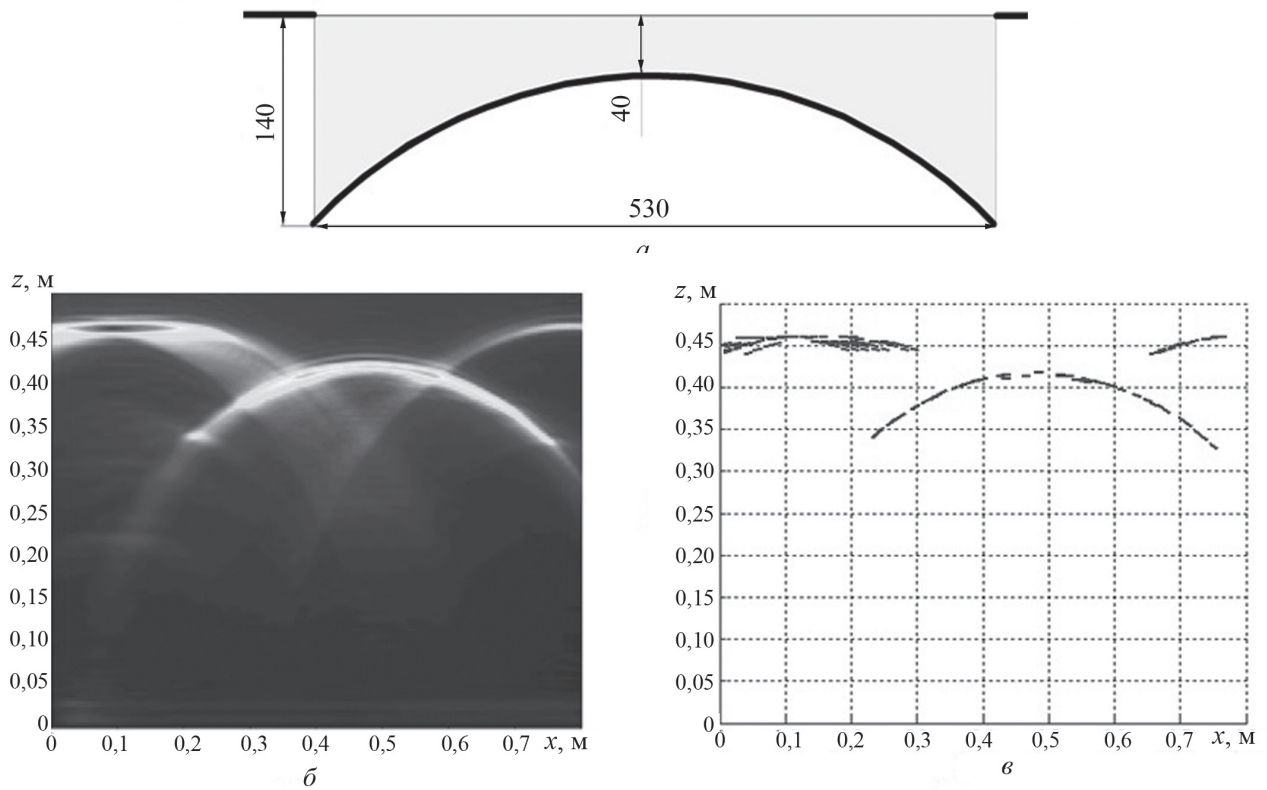


Рис. 7. Результаты обработки зондирования выгнутой вверх поверхности:

a — эскиз тестового образца; *б* — амплитудно-цветовое представление; *в* — кусочно-линейное представление

сильно отраженных (обладает большей чувствительностью). Дальнейшим развитием метода будет являться распознавание границ отражающей поверхности, близкой к краю контролируемого объекта. Данный метод планируется использовать в области УЗ низкочастотной томографии сложно структурных материалов типа бетона.

Литература

1. Качанов В.К., Каргашев В.Г., Шалимова Е.В. Основные положения теории пространственно-временной обработки сигналов применительно к задачам ультразвуковой дефектоскопии изделий из сложно структурных материалов // Дефектоскопия. 2010. № 4. С. 19—30.
2. Качанов В.К., Соколов И.В., Туркин М.В. и др. Особенности применения метода «фокусировка в точку» при ультразвуковой томографии изделий из сложно структурных материалов // Дефектоскопия. 2010. № 4. С. 30—45.
3. Качанов В.К., Соков И.В., Тимофеев Д.В. и др. Обнаружение отражающих плоскостей при ультразвуковой томографии строительных конструкций из бетона // Дефектоскопия. 2010. № 5. С. 36—45.
4. Базулин Е.Г. Разработка системы эксплуатационного ультразвукового неразрушающего контроля повышен-

ной информативности с применением антенных решеток: Автореферат дисс. ... д-ра. техн. наук. Москва, 2014.

References

1. **Kachanov V.K., Kartashev V.G., Shalimova E.V.** Osnovnye Polozhenija Teorii Prostranstvenno-Vremennoj Obrabotki Signalov Primenitel'no k Zadacham Ul'trazvukovoj Defektoskopii Izdelij iz Slozhno Strukturnyh Materialov. Defektoskopija. 2010;4:19—30. (in Russian).
2. **Kachanov V.K., Sokolov I.V., Turkin M.V. i dr.** Osobennosti Primenenija Metoda «Fokusirovka v Tochku» pri Ul'trazvukovoj Tomografii Izdelij iz Slozhno Strukturnyh Materialov. Defektoskopija. 2010;4:30—45. (in Russian).
3. **Kachanov V.K., Sokov I.V., Timofeev D.V. i dr.** Obnaruzhenie otrazhajushhijh Ploskostej pri Ul'trazvukovoj Tomografii Stroitel'nyh Konstrukcij iz Betona. Defektoskopija. 2010;5:36—45. (in Russian).
4. **Bazulin E.G.** Razrabotka Sistemy Jekspluatacionnogo Ul'trazvukovogo Nerazrushajushhego Kontrolja Povyshennoj Informativnosti s Primeneniem Antennyh Reshjetok: Avtoreferat diss. ... D-ra. Tehn. Nauk. Moskva, 2014. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 28.12.2015