

УДК 621.396.96; 532; 534-143

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ОТ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА НА ЕГО ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗА

В. П. Ющенко, В. Н. Легкий, С. А. Литвиненко, С. А. Буднов

*Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20  
E-mail: jwp@aport2000.ru*

Рассмотрена реконструкция изображения сечения тонкой проволоки, полученного с помощью ультразвукового локатора в водной среде на частоте 1,3 МГц при монохроматическом зондирующем сигнале. Реконструкция изображения осуществлена с использованием синтезированной апертуры путём корреляционной обработки траекторного доплеровского сигнала с рассчитанными опорными траекторными сигналами от точечных объектов. Учтено мешающее действие на реконструкцию изображения отражённой ультразвуковой волны от поверхностной волны, оставляемой движущейся проволокой. Приведены результаты реконструкции изображения сечения проволоки по модельным и экспериментальным траекторным сигналам при наличии поверхностной волны.

*Ключевые слова:* поверхностная волна, ультразвук, монохроматический зондирующий сигнал, апертурный синтез, реконструкция изображения, траекторный сигнал, томография.

DOI: 10.15372/AUT20180309

**Введение.** Существуют различные методы реконструкции изображения с применением акустических волн. Для практической деятельности представляет интерес развитие метода реконструкции изображения объекта, основанного на фокусировке, получаемой при синтезе апертуры [1–7]. Выбор акустических волн по сравнению с радиоволнами даёт возможность, например, обеспечить проникающее зондирование биологических объектов, добиться высокой разрешающей способности при томографировании, а также исключить вредное воздействие СВЧ-излучения [8–10]. Использование монохроматического сигнала избавляет от дисперсионных искажений реконструированного изображения, имеющих место при импульсном зондировании. Под дисперсионными искажениями понимается ухудшение качества изображения, вызванное неодинаковой скоростью распространения различных компонентов спектра импульсного зондирующего сигнала в дисперсионной среде, к которой относятся ткани живого организма. Однако при монохроматическом зондировании есть препятствия, которые требуется преодолеть, чтобы получить изображение без искажений.

Синтез апертуры связан с перемещением объекта относительно локатора. Казалось бы не важно, что перемещать: локатор с антеннами или предмет. Главное — обеспечить их относительное перемещение. С проблемой перемещения приходится сталкиваться как при синтезе апертуры при движении по прямолинейной траектории [1, 3], так и при синтезе апертуры при движении по кругу [2, 5, 6]. Если предмет миниатюрный, то его перемещение будет сопровождаться слабыми поверхностными волнами, но если предмет имеет значительные размеры, то его перемещение порождает поверхностные волны большой амплитуды. Покажем, как это отразится на результатах реконструкции изображения тестовых объектов.

При проведении экспериментов имело место значительное расхождение результатов реконструкции изображения, построенного по экспериментальным траекторным сигналам и сигналам, полученным в результате моделирования. Анализ этих расхождений показал, что необходимо учитывать отражения от поверхностной волны, оставляемой перемещающимся объектом.

Целью предлагаемой работы является исследование влияния отражённых от поверхностной волны акустических зондирующих сигналов на качество реконструированного изображения предмета, построенного методом синтезированной апертуры. Предполагаются экспериментальные исследования и проверка их результатов с помощью моделирования.

**Описание экспериментальной установки.** Чтобы отражение от поверхностной волны было преобладающим, а сигнал от объекта минимальным, в качестве томографируемого объекта была взята тонкая медная проволока диаметром 1 мм, практически не дающая отражения. В этом случае сигнал, отражённый от объекта, будет ничтожно малым по сравнению с сигналом, отражённым от поверхностной волны. Ультразвуковая экспериментальная установка для томографирования предметов в воде представлена на рис. 1. Белый квадрат из поглощающего ультразвук материала на внутренней боковой стенке резервуара содержит два пьезокерамических элемента.

Структурная схема установки для экспериментального сбора данных (для регистрации траекторного доплеровского сигнала) приведена на рис. 2. На рис. 2, *a* приняты следующие обозначения: 1, 2 — излучающий и принимающий пьезодатчики,  $90^\circ$  — фазосдвигающая на  $90^\circ$  цепочка, См — смеситель сигналов (перемножитель), РУ — резонансный усилитель, УДЧ — усилитель доплеровских частот, АЦП — аналого-цифровой преобразователь,  $V_{от}$  — скорость объекта относительно локатора вдоль траектории,  $R_i$  — расстояние от проволоки до локатора в  $i$ -й момент времени.

**Модельное представление фронта поверхностной волны.** Фронт поверхностной волны от движущейся проволоки представлен в виде совокупности отражающих точек, расположенных на расстоянии 3 мм вдоль линий, образующих острый угол размером приблизительно  $45^\circ$  (см. рис. 2, *a*), а также на расстоянии 0,4 мм перпендикулярно поверхности воды, но не выходящих за пределы острого угла, т. е. модель фронта представляет собой угол  $45^\circ$ , образованный ленточной полоской, ширина которой ограничена по высоте углом раскрытия диаграммы направленности пьезодатчиков  $6^\circ$  (рис. 2, *b*).

Предусмотрено затухание поверхностной волны по глубине от поверхности воды по экспоненциальному закону  $A(m) = A_0 e^{-k(m\Delta z)}$  [10, с. 25, (6.3)], где  $A_0 = 1$  — амплитуда волны на поверхности воды;  $k = 2\pi/\lambda_1$  — волновое число ( $\lambda_1 = 1,5$  см — длина поверх-



Рис. 1

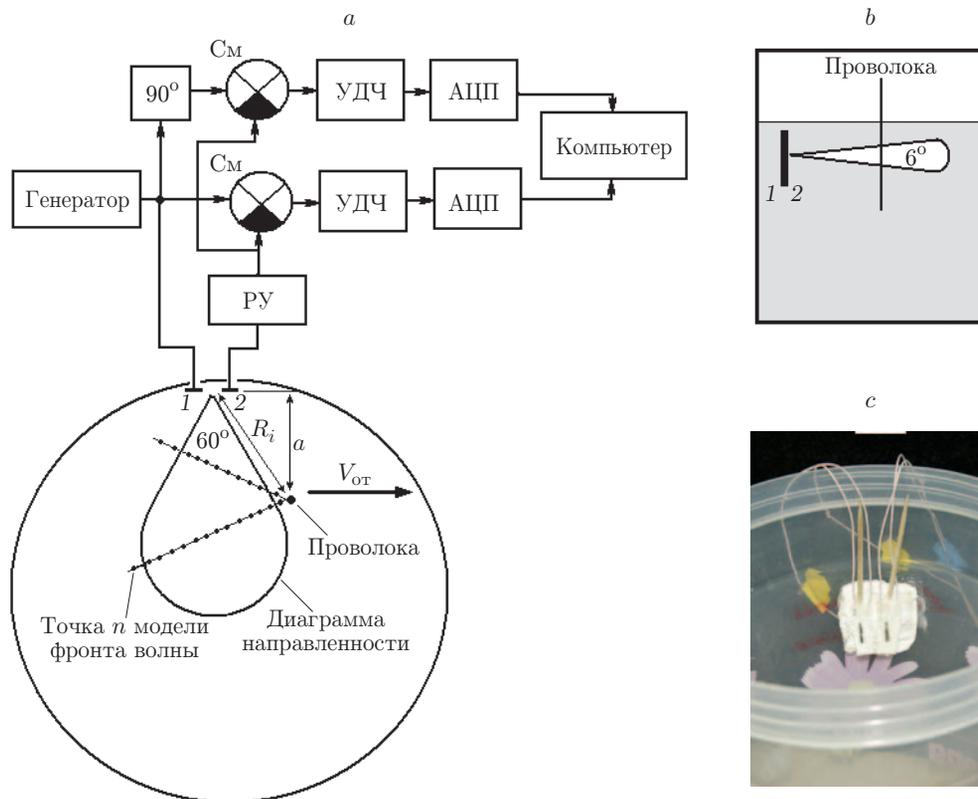


Рис. 2

ностной волны, создаваемой движущейся проволокой, характерная для гравитационно-капиллярных волн [11, с. 109]);  $\Delta 3 = 0,4$  — расстояние между точками модели фронта в вертикальном направлении, т. е. по глубине;  $m$  — порядковый номер точки фронта по вертикали;  $M$  — количество точек по вертикали.

**Модельное представление сигнала для фронта поверхностной волны.** Исходя из геометрической схемы сбора данных и многоточечной модели поверхностной волны (см. рис. 2, а), можно выразить дальность  $R_{n,m}(i)$  от пьезодатчиков 1, 2 до всех  $n \times m$  точек фронта модели поверхностной волны в  $i$ -й момент времени через координаты промаха  $a + n\Delta 2$ , координаты глубины  $m\Delta 3$  и расстояние вдоль траектории  $n\Delta 1 - V_{от}idt$  с помощью формулы Пифагора

$$R_{n,m}(i) = \sqrt{(C/2 \pm n\Delta 1 - V_{от}idt)^2 + (a^2 + n\Delta 2)^2 + (m\Delta 3)^2}. \quad (1)$$

Зная расстояние  $R_{n,m}(i)$ , определим фазовый путь волны

$$\varphi_{n,m}(i) = 4\pi R_{n,m}(i)/\lambda, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина ультразвуковой зондирующей волны.

Сигнал от одной точки фронта с индексами  $n, m$  представим в виде

$$S_{n,m}(i) = [A_{n,m}/(R_{n,m}(i))^4] \sin \varphi_{n,m}(i). \quad (3)$$

Все точки модели фронта поверхностной волны в сумме дадут траекторный сигнал

$$S(i) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M S_{n,m}(i), \quad n = 1, 2, 3, \dots, N, \quad m = 1, 2, 3, \dots, M. \quad (4)$$

В формулах (1)–(4)  $n$  — номер точки модели фронта в горизонтальной плоскости;  $N$  — общее количество точек по горизонтали;  $dt$  — шаг по времени;  $C$  — длина траектории, на которой синтезируется апертура антенны;  $\Delta 1$  и  $\Delta 2$  — расстояния между точками модели вдоль траектории и вдоль промаха соответственно;  $a$  — промах (кратчайшее расстояние от траектории локатора до объекта по перпендикуляру к траектории);  $\varphi_{n,m}(i)$  — угловой путь фазы сигнала;  $A_{n,m}$  — амплитуда мощности сигнала с учётом глубины;  $S_{n,m}(i)$  — дискретные отсчёты сигнала от точки модели с индексами  $n, m$ ;  $S(i)$  — дискретные отсчёты суммарного сигнала от всех точек модели.

**Модельное представление сигнала для проволоки.** Проволока моделировалась также с помощью многоточечной модели. Точки модели располагались вдоль прямой линии, перпендикулярной поверхности воды. Учитывался отрезок проволоки, охваченный диаграммой направленности с углом раскрыва  $6^\circ$  (рис. 2, *b*). Количество точек  $M = 40$ , расстояние между точками  $\lambda/3$ , длина модели проволоки 1,5 см, промах составлял 6,9 см, т. е. размер модели проволоки соответствовал отсечению её длины углом раскрыва диаграммы направленности  $6^\circ$ . Каждая точка давала отражённый сигнал, затем все сигналы суммировались.

**Результаты моделирования траекторных сигналов и реконструированных изображений с пояснением принципов реконструкции.** Результаты моделирования траекторного сигнала, обусловленного фронтом поверхностной волны, показаны на рис. 3. Траекторный сигнал, рассчитанный для модели фронта поверхностной волны, которую должна порождать движущаяся проволока, с учётом затухания сигнала по глубине приведён на рис. 3, *a*. На рис. 3, *c* изображён спектр этого сигнала. На рис. 3, *b* показана передаточная функция поверхностной волны, представляющая собой двумерную корреля-

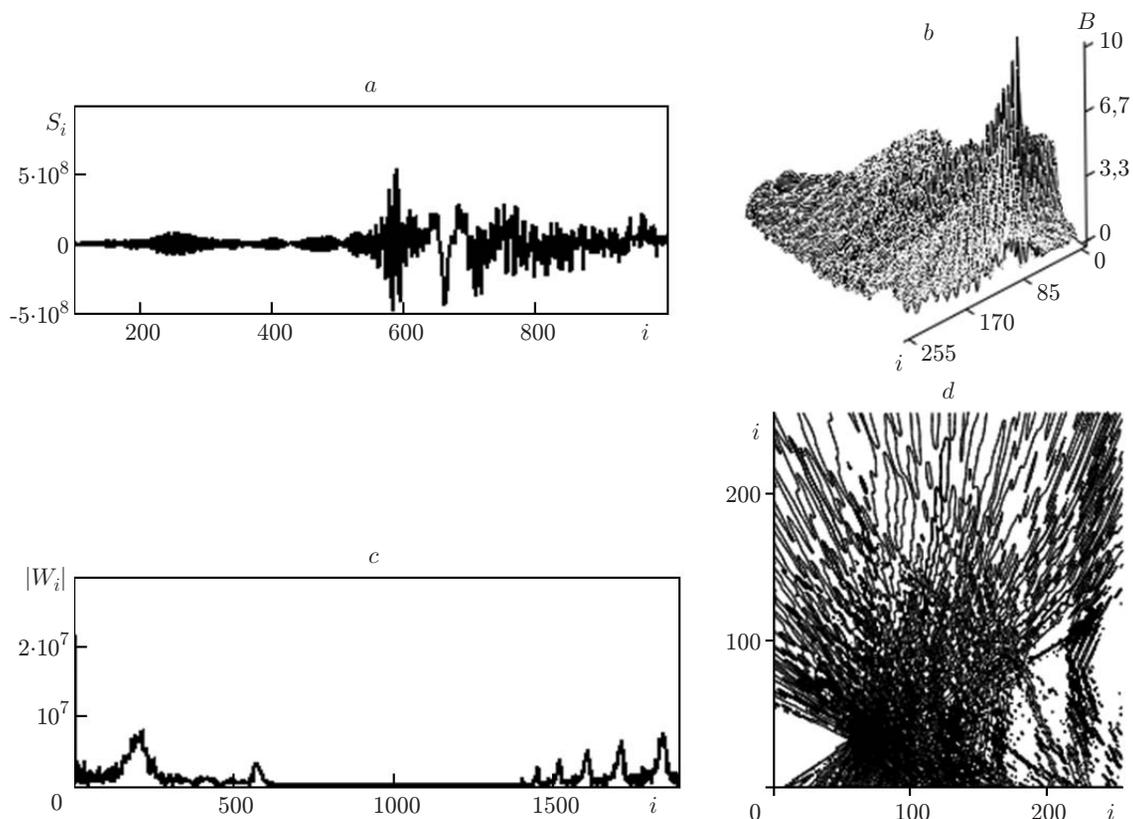


Рис. 3

ционную функцию траекторного сигнала с опорными сигналами от точечных объектов в координатах расстояния вдоль траектории в дискретные моменты времени и в дискретных координатах промаха. С построением корреляционной функции можно ознакомиться в работах [1, 3, 4, 6, 7]. На рис. 3, *d* показан вид корреляционной поверхности сверху как результат сечения горизонтальными плоскостями на разной высоте. Обозначения на рисунках:  $W_i$  — спектр траекторного сигнала, полученный с помощью быстрого преобразования Фурье;  $B$  — двумерная корреляционная функция, образованная путём корреляции траекторного сигнала с каждым опорным сигналом, представляющим собой траекторный сигнал от точечного объекта при различных промахах;  $S_i$  — отсчёты траекторного сигнала.

Каждая  $m$ -я точка вертикальной модели проволоки в  $i$ -й момент времени удалена от пьезодатчиков локатора на расстояние  $R_m(i)$ , которое определяется формулой

$$R_m(i) = \sqrt{(C/2 - V_{\text{от}}i(dt))^2 + a^2 + (m\Delta 4)^2}. \quad (5)$$

Фазовый путь волны находится из выражения

$$\varphi_m(i) = 4\pi R_m(i)/\lambda. \quad (6)$$

Траекторный сигнал от  $m$ -й точки можно рассчитать по формуле

$$S_m(i) = [A/(R_m(i))^4] \sin \varphi_m(i). \quad (7)$$

Траекторный сигнал в дискретные моменты  $i$  от всех точек модели проволоки определяется выражением

$$S(i) = \sum_{m=1}^M S_m(i). \quad (8)$$

Обозначения в формулах (5)–(8) аналогичны обозначениям в (1)–(4);  $\Delta 4$  — расстояние между точками модели проволоки по вертикали. При этом амплитуды сигналов, отражённые от каждой точки модели проволоки, выбирались равными единице:  $A = 1$ .

Результаты моделирования траекторного сигнала от проволоки с учётом раскрыва диаграммы направленности  $6^\circ$  в вертикальной плоскости и реконструкции изображения по этому сигналу приведены на рис. 4.

Представляет интерес модельная ситуация, при которой сигнал от проволоки соизмерим с сигналом от фронта поверхностной волны (рис. 5).

**Результаты обработки экспериментальных данных.** Условия эксперимента следующие: пьезодатчики располагаются на глубине 1 см от поверхности воды, что соизмеримо с длиной волны, при этом в слое будет присутствовать поверхностная волна. Её интенсивность на такой глубине упадёт примерно в 65 раз [11–13]. Однако нельзя исключить, что в раскрыв диаграммы направленности попадёт значительная часть энергии волны с предповерхностного слоя, где она не претерпела сильного ослабления.

Результаты эксперимента представлены на рис. 6, анализ которых показывает, что поверхностная волна проникает на некоторую глубину и попадает в раскрыв диаграммы направленности пьезодатчиков. Как видно из сопоставления рис. 6, *a* с рис. 5, *a* и рис. 4, *a*, сигнал от проволоки на рис. 6, *a* не присутствует. В данном случае есть только сигнал, отражённый от поверхностной волны, поэтому невозможно восстановление изображения объекта в сечении по полученному сигналу.

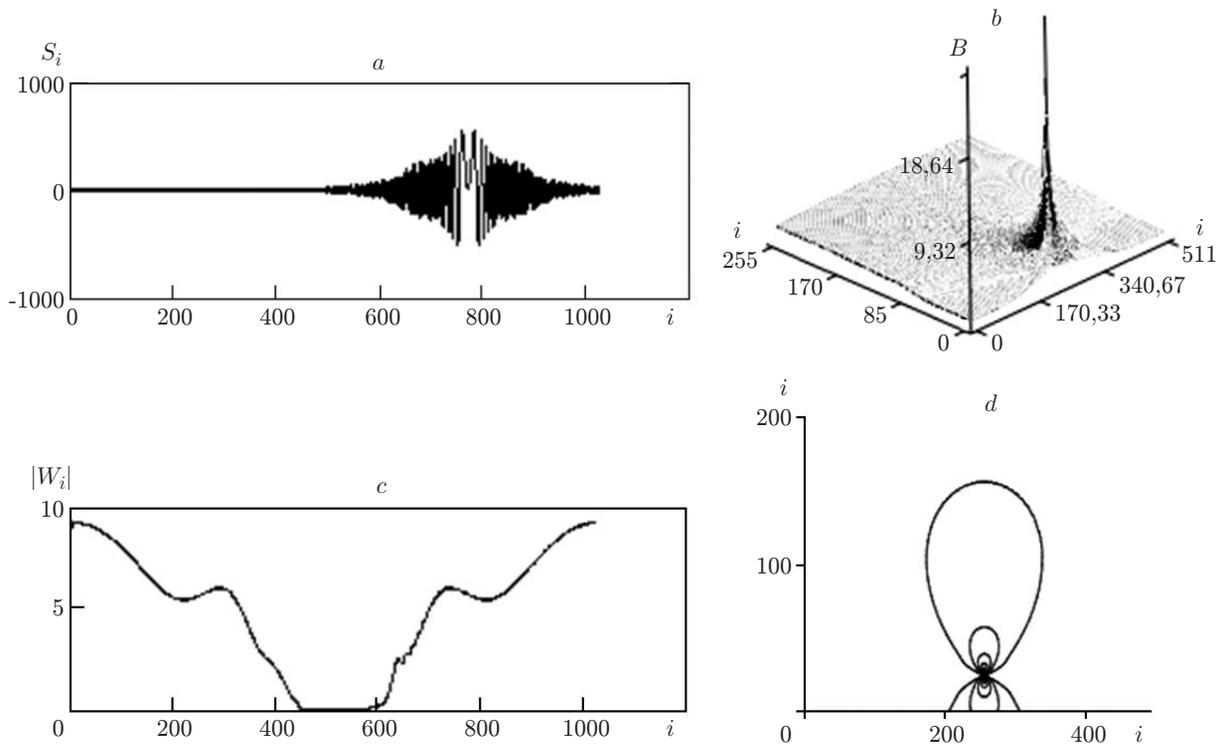


Рис. 4

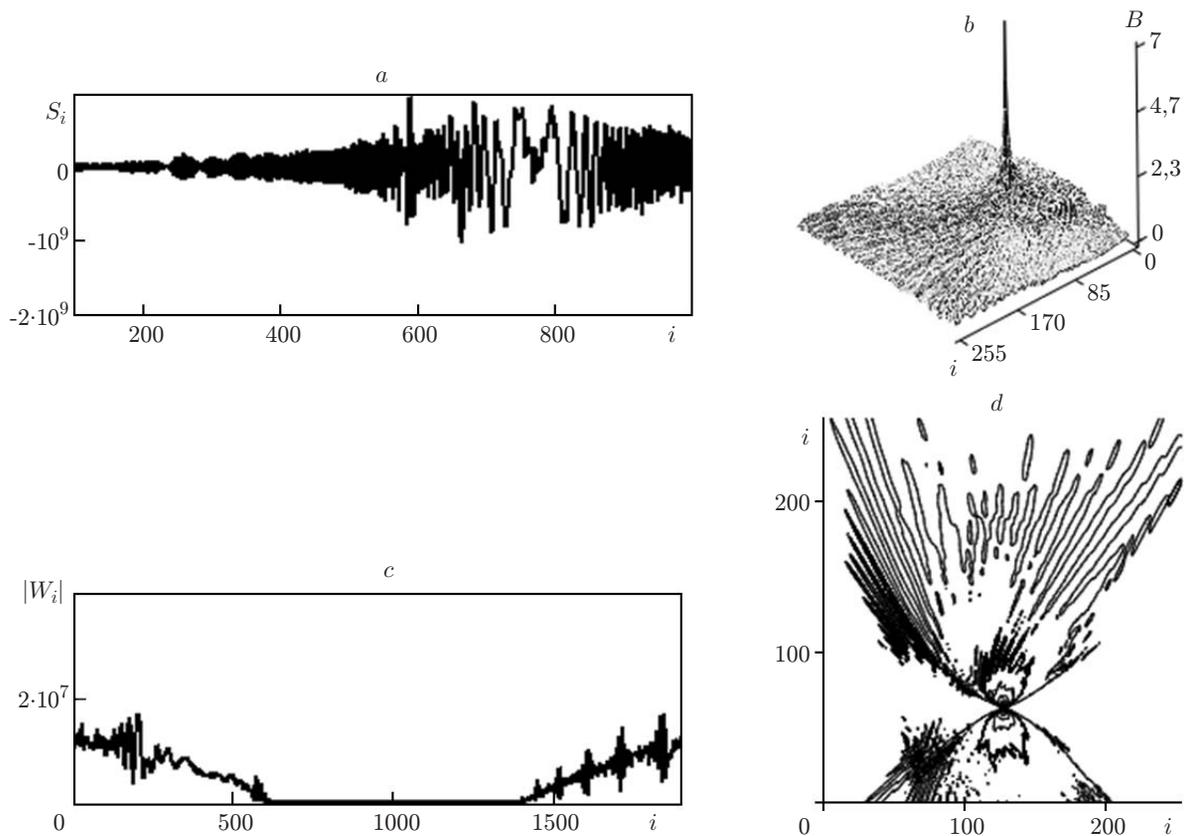


Рис. 5

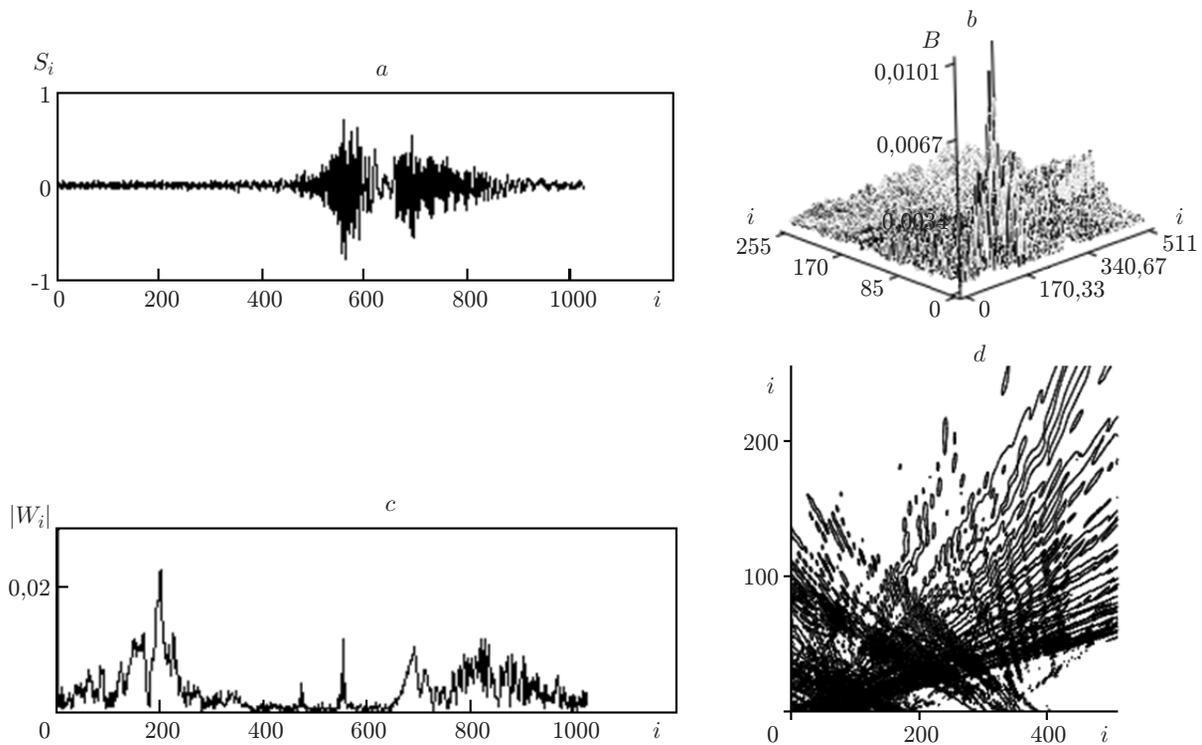


Рис. 6

**Обсуждение результатов моделирования и экспериментов.** Сопоставление рис. 3 и 6 свидетельствует о сходстве результатов моделирования и эксперимента. Таким образом, с помощью простой многоточечной модели поверхностной волны удалось описать взаимодействие ультразвукового зондирующего сигнала с поверхностной волной, образованной движущимся предметом.

В экспериментах по томографированию в водной среде впервые выявлено отражение зондирующей ультразвуковой волны от поверхностной волны, оставляемой на воде движущимся предметом. Процесс движения необходим для синтеза апертуры антенны, с помощью которой производится реконструкция изображения объекта. При реконструкции изображения необходимо учитывать следующие обстоятельства, связанные с поверхностной волной.

1. Поверхностная волна образуется в слое воды толщиной до 1 см и резко затухает по экспоненциальному закону в слое толщиной 1 см.

2. Если сигнал от поверхностной волны значительно преобладает над сигналом от объекта, то поверхностная волна не даст возможности реконструировать изображение.

3. При образовании поверхностной волны следует предпочесть передвижение обтекаемых антенн локатора томографируемым объектам.

Можно дать рекомендации по уменьшению влияния поверхностной волны на результаты реконструкции изображения.

1. Следует отказаться от перемещения предметов в воде, лучше перемещать антенны локатора, сделав их конструктивно обтекаемыми.

2. Варьируя скорость перемещения, можно ослабить давление плотной жидкости в поверхностной волне и тем самым ослабить отражение зондирующего сигнала от неё. Уменьшение скорости относительного перемещения увеличивает время сбора данных, что может создать неудобства для пациента или замедлить технологический процесс сбора данных для томографирования.

3. Поверхностная волна ослабевает с увеличением глубины [11, 12], погружая систему сбора данных более чем на 1 см, можно избавиться от влияния поверхностной волны.

4. Радикальное решение проблемы искажения реконструированного изображения из-за влияния поверхностной волны — отказ от перемещения. Для этого следует отсчёты информации брать не в дискретные моменты времени, а в дискретных точках пространства по прямой, используя коммутируемые акустические антенные решётки.

**Заключение.** Результаты полученных исследований предполагается применять при создании ультразвукового томографа, работающего в водной среде, который требует перемещения антенн или томографируемых предметов. Кроме того, для изучения гидродинамических процессов получена новая методика исследования поверхностной волны или обтекающих уплотнений движущихся в воде объектов путём зондирования этих уплотнений ультразвуковой волной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ющенко В. П. Доплеровское сканирование структуры объекта с помощью синтезированной апертуры // Приборы и техника эксперимента. 2001. № 2. С. 41–45.
2. Ющенко В. П. Круговой апертурный синтез для целей томографии // Автометрия. 2002. 38, № 6. С. 28–35.
3. Ющенко В. П. Сопоставление двух методов когерентной томографии // Радиотехника и электроника. 2004. 49, № 2. С. 196–205.
4. Ющенко В. П. Восстановление внутренней структуры гомогенных объектов с локальной неоднородностью // Автометрия. 2005. 41, № 1. С. 50–57.
5. Ющенко В. П., Литвиненко С. А. Влияние диаграммы направленности на качество реконструкции объектов при круговом синтезе апертуры // Автометрия. 2016. 52, № 4. С. 14–20.
6. Yushchenko W. P. Object image reconstruction by using trajectory Doppler signal in the process of monochromatic probing and circular aperture synthesis of antenna // Electrical and Electron. Eng. 2012. 2, N 2. P. 1–6. DOI: 10.5923/j.eee. 20120202.01.
7. Ющенко В. П., Литвиненко С. А., Ромодин В. Б., Шебалкова Л. В. Монохромная СВЧ-томография с синтезом апертуры антенны методом взаимных корреляций // Автометрия. 2007. 43, № 6. С. 28–38.
8. Орлова М. В., Легкий В. Н. Синтез систем ближней локации: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. 182 с.
9. Денисова Е. В., Легкий В. Н. Автономные информационные системы обнаружения скрытых объектов: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. 128 с.
10. Шебалкова Л. В., Легкий В. Н., Ромодин В. Б. Микроволновые и ультразвуковые сенсоры: Учеб. пособие / Под ред. В. Н. Легкого. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. 172 с.
11. Красильников В. А., Крылов В. В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 403 с.
12. Кадомцев Б. Б., Рыдник В. И. Волны вокруг нас. М.: Знание, 1981. 152 с.
13. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. 576 с.