

Supersonic Shear Imaging: описание и реализация метода на акустической системе Verasonics

А. Е. Спивак,* И. Ю. Демин, А. А. Лисин, А. Е. Симонов

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского,
радиофизический факультет, кафедра акустики
Россия 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23*

(Статья поступила 30.07.2019; Подписана в печать 31.07.2019)

В работе описан метод эластографии сдвиговой волной Supersonic Shear Imaging. Представлены схема реализации данного метода на акустической системе Verasonics и алгоритм обработки и вывода данных в виде карты эластичности. Проведено физическое моделирование с калиброванным фантомом фирмы CIRS на системе Verasonics с использованием методов SSI и SWEI, а также на экспертной ультразвуковой системе Supersonic Aixplorer. Проведено сопоставление полученных результатов, и сделаны выводы о качестве работы метода на исследовательской системе.

PACS: 43.25.Zx

УДК: 534.2, 534.7

Ключевые слова: эластография сдвиговой волной, Supersonic Shear Imaging, SSI, скорость сдвиговых волн, модуль Юнга, карта эластичности, фантом, Verasonics.

ВВЕДЕНИЕ

Существует широкий спектр патологических процессов, которые изменяют материальные свойства ткани органов, таких как печень, молочная железа, щитовидная железа, скелетные мышцы, поджелудочная железа, селезенка, почка и т. д. Различные процессы, такие как воспаление, фиброз, отек и образование раковых клеток — все это способствует изменению материальных свойств органов, поскольку составляющие органов изменяются в микроскопическом масштабе, что приводит к изменениям, наблюдаемым в макроскопическом масштабе (от микрометров до сантиметров). В течение последних 25 лет ученые работают над методами отображения упругих свойств органов и тканей в организме, эластографией. В настоящее время в работах, посвящённых исследованию проблемы обнаружения злокачественных опухолей, применяется один из методов эластографии Supersonic Shear Imaging (SSI), реализованный на экспертных ультразвуковых системах фирмы Supersonic [1–6]. Данная технология позволяет количественно оценить модуль Юнга в целой области. В лаборатории «МедЛаб» Радиофизического факультета Нижегородского государственного университета на акустической системе Verasonics с открытой архитектурой был реализован метод Supersonic Shear Imaging.

Исследовательская система Verasonics представляет собой универсальный ультразвуковой диагностический прибор, предназначенный для макетирования и отладки различных алгоритмов медицинской акустики (рис. 1). В ней есть возможность в широких пределах изменять параметры ультразвуковых волн и программировать их в зависимости от задач и объектов исследования. Принимаемые эхосигналы записываются при-

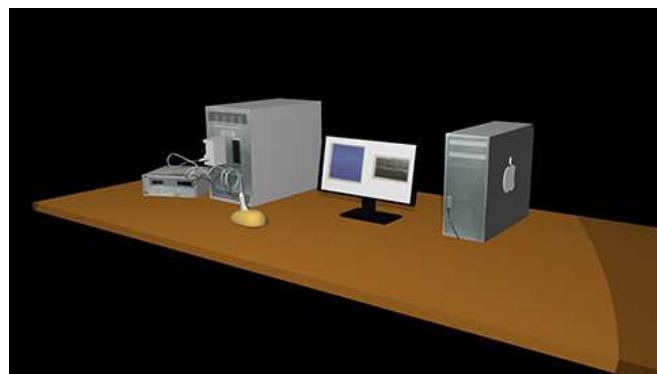


Рис. 1: Акустическая система Verasonics

бором и доступны для постобработки в виде массивов числовых данных. Весь сценарий посылки импульсов, приема и обработки данных, построения изображения программируется пользователем на языке MATLAB.

В 2004 г. в журнале IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control вышла статья «Supersonic Shear Imaging: A New Technique for Soft Tissue Elasticity Mapping» [7]. Данная работа представляла новый метод определения упругих свойств исследуемой ткани Supersonic Shear Imaging, в котором использовались некоторые черты уже ранее представленных методик ультразвукового диагностирования, в частности Shear Wave Elasticity Imaging (SWEI) [8].

Supersonic Shear Imaging представляет собой дальнейшее развитие метода SWEI. В среде возбуждается несколько источников распространения сдвиговых волн. Для этого в среду последовательно запускается несколько фокусирующих импульсов, отличающиеся смещением точки фокусировки по глубине, создавая движущийся источник сдвига. Главным условием создания данного источника является его перемещение с большей скоростью, чем скорость сдвиговой волны

*E-mail: strigino831@gmail.com

в среде, т.е. «число Маха» $M > 1$. Сформировавшиеся сдвиговые волны, интерферируя между собой вдоль образующегося «конуса Маха», формируют две квазиплоские волны, распространяющиеся в разные стороны (рис. 2).

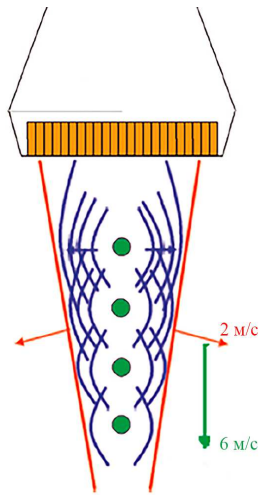


Рис. 2: Схема формирования квазиплоской сдвиговой волны

Имея большую амплитуду по сравнению с обычной сдвиговой волной, формируемая в методе SWEI, квазиплоская волна преодолевает достаточно большое расстояние и проникает в различные объекты в среде, прежде чем затухнуть, а её форма позволяет ей равномерно распределяться по всей глубине исследуемой области.

Отдельно остановимся на «числе Маха». Оно отвечает за угол, под которым будет распространяться квазиплоская сдвиговая волна. С увеличением данного показателя, угол начнет стремиться к 90° по отношению к направлению распространения волны. В связи с этим даже выделяют отдельные режимы работы данного метода на основе значения числа M (Mach 3, Mach 4, Mach 5, Mach 10, Mach –3). Отдельно стоит отметить режим работы Mach –3, в котором начало формирования конуса начинается с самой глубокой точки. Однако наиболее часто упоминаются в литературе режимы Mach 3 и Mach 10, в которых отношение скорости смещения фокуса к скорости сдвиговой волны равно 3 и равно 10, соответственно.

После генерации квазиплоских сдвиговых волн, проводится процесс регистрации их распространения в среде с использованием метода Ultrafast Imaging. В SSI данная методика используется сразу для нескольких целей. После каждого пуска сфокусированного импульса, запускается небольшая пачка изображающих импульсов. На основании данных, полученных ими, делаются выводы о формировании конуса Маха. Основная пачка импульсов, в которой количество изображающих импульсов может достигать 100, запускается уже после формирования квазиплоских волн. Она регистрирует их дальнейшее распространение, и на ос-

новании записанных данных производится дальнейшая обработка и вывод результатов о эластичности ткани в выбранном участке.

При реализации метода SSI на Verasonics для формирования квазиплоской сдвиговой волны было взято 5 фокусирующих импульсов. Расстояние по глубине между точками фокусировки было выбрано 5 мм. Оптимальная разница между скоростью смещения фокуса сдвига (V_f) и скоростью сдвиговой волны, которая при разработке метода была приравнена к 2.76 м/с ($V_{sh} = 2.76$ м/с), или же «число Маха» было выбрано равным 3 ($M = 3$).

Первоначально на Verasonics была выполнена схема, приближенная к классической. Она позволяла достоверно сохранять данные о распространении каждой отдельной сдвиговой волны благодаря наличию пачки из 5 изображающих импульсов после первых 4 фокусирующих. Однако они приводили к крупным интервалам между толкающими импульсами, что давало очень небольшую разницу между скоростью смещения фокуса и скоростью сдвиговой волны в среде ($V_f = 3.57$ м/с, $M = 1.5$). Было обнаружено, что из-за данного фактора при измерении в средах с большей эластичностью есть вероятность не образования квазиплоских сдвиговых волн, на чем основана вся методика. В связи с этим данная схема была модифицирована (рис. 3). Вместо пачки импульсов, между фокусирующими пускался лишь один изображающий. Это позволило сохранить часть данных о распространении каждой отдельной сдвиговой волны, а также увеличить разницу между скоростью смещения фокуса ($V_f = 8.3$ м/с) и скоростью сдвиговой волны в среде, который начал достигать максимального значения, равного $M = 3$, что достаточно для образования квазиплоских сдвиговых волн и имеется запас при измерении в более эластичных средах. Для случаев измерения объектов, в которых среда имеет более высокий показатель упругости (для рассмотрения была взята среда с модулем Юнга 48 кПа или 4 м/с), была модифицирована схема импульсов, посылаемых в среду, при работе метода SSI. В данной схеме были убраны промежуточные изображающие импульсы, которые регистрируют формирование конуса Маха. Данный шаг позволил увеличить скорость смещения фокуса ($V_f = 12.5$ м/с), что позволяет получать $M = 3$ при работе со средами, в которых скорость сдвиговых волн равна 4 м/с, а для менее упругих сред число Маха может достигать $M = 6$, что влияет на угол, под которым распространяются квазиплоские сдвиговые волны. Контролировать формирование конуса в данной схеме предполагается за счет уже его финальной формы, которая видна регистрируется первым изображающим импульсом.

Отдельно остановимся на пачке изображающих импульсов, регистрирующих распространение квазиплоских сдвиговых волн. За основу была взята схема, которая уже применялась на акустической системе Verasonics при реализации на ней метода SWEI [9]. Для качественного отслеживания динамики распро-

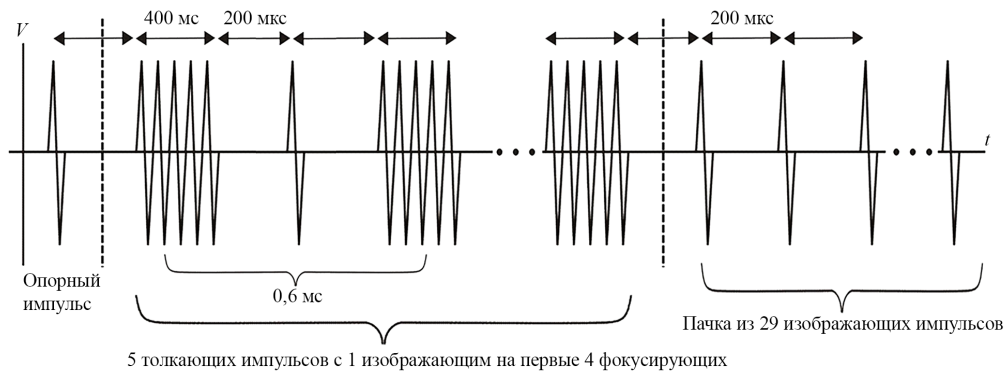


Рис. 3:

Схема реализации метода SSI на акустической системе Verasonics

странения волн в среде достаточной задержкой между импульсами является 200 мкс. Однако в ходе реализации SSI было выявлено, что 19 изображающих импульсов недостаточно для полного отслеживания распространения квазиплоских сдвиговых волн на исследуемом участке. В связи с этим число изображающих импульсов было увеличено до 29. С помощью данной последовательности импульсов система может регистрировать изменения в среде за счет распространения квазиплоских сдвиговых волн в течении 6 мс. При $V_{sh} = 2 \text{ м/с}$ это позволяет увеличить исследуемую зону с 1 см, которая применялась при подсчете скорости сдвиговой волны по обеим её компонентам и её визуализации в методе SWEI, до 3 см с включением области формирования конуса.

Первоначальная обработка данных, полученных в ходе работы метода SSI с целью получения информации о смещении точек в различных координатах исследуемого участка среды, схожа с применяемой в методе SWEI. Смещение вычисляется с помощью расчета корреляции одного из изображающих импульсов с опорным. По сдвигу пика корреляционной кривой относительно нуля можно вычислить запаздывание волны, вызванное смещением среды. Однако при обработке данных, полученных в ходе работы метода SSI на Verasonics, необходимо было учитывать появление изображающих импульсов, которые отвечают за регистрацию формирования квазиплоских сдвиговых волн.

Первым алгоритмом, написанным для конечной обработки данных для метода SSI, является визуализация формирования и распространения квазиплоских сдвиговых волн (рис. 4). Данный алгоритм базируется на скрипте отображения распространения сдвиговой волны в методе SWEI, но имеет несколько характерных отличий [?].

1. В связи с возросшей амплитудой квазиплоской сдвиговой волны по сравнению с простой, запускаемой в методе SWEI, волна распространяется на большие расстояния. Также, учитывая тот момент, что по глубине разница между первой и последней точками фокусировки равна 20 мм, есть

необходимость увеличивать сетку не только по ширине, но и по высоте (глубине). Итоговый размер сетки для визуализации волн был выбран 101×51 ячейку (при переводе в единицы измерения получатся 30 мм по глубине и 15 мм по ширине).

2. Verasonics при работе метода SSI снимает данные с 33 изображающих импульсов, не считая опорный. Обработка всех этих данных с учетом размеров новой сетки приводит к значительному увеличению времени работы алгоритма. Для нивелирования данных моментов было принято решение сократить число учитываемых изображающих импульсов до 11. При обработке будут учитываться только импульсы, снимающие состояние среды в процессе формирования конуса Маха, а после формирования квазиплоских сдвиговых волн и начала их распространения — каждый третий изображающий импульс из основной пачки.

На основании данного алгоритма можно судить о правильности формирования квазиплоских сдвиговых волн. Благодаря ему была отбракована первая схема реализации метода SSI на акустической системе Verasonics, поскольку при визуализации было четко выражено отсутствие явления формирования квазиплоских сдвиговых волн, и наблюдалось только распространение отдельно сформированных сдвиговых волн.

Для обработки данных при работе метода Supersonic Shear Imaging с акустической системы Verasonics и получения конечного результата в виде выявления упругих характеристик в исследуемом объекте, таких как скорость сдвиговой волны или модуль Юнга, был написан отдельный алгоритм. За основу, с точки зрения визуального представления результата, был взят интерфейс экспертной системы Supersonic Aixplorer, а именно его elasticity map.

За основу был взят алгоритм получения сетки, сохраняющей в своих ячейках данные о смещении в каждой точке исследуемой области, применяемый при ви-

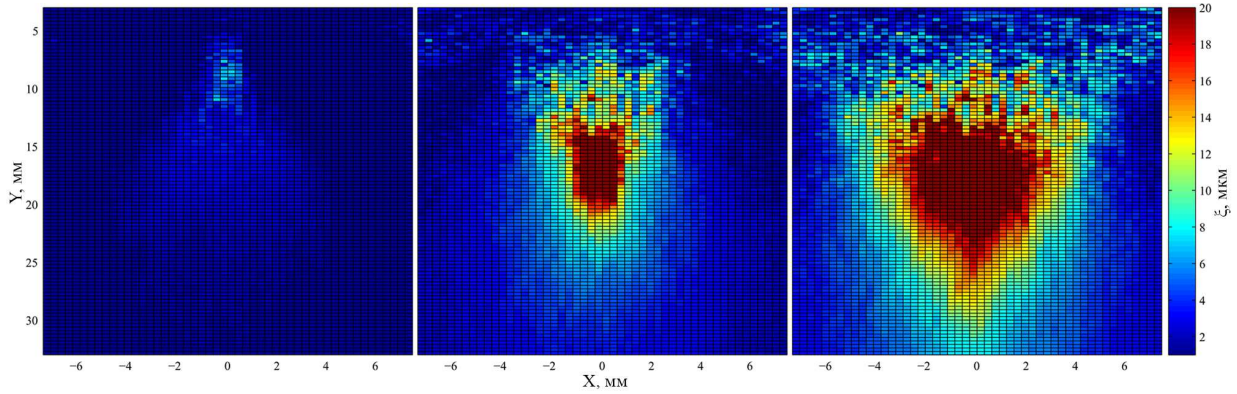


Рис. 4: Визуализация формирования квазиплоских сдвиговых волн

зуализации распространения сдвиговой волны и квазиплоской волны. Однако в случае получения elasticity map, размер сетки был увеличен до 101×101 точки или 30×30 мм, а при её получении учитываются все изображающие импульсы (кадры, фреймы) из пачки, регистрирующей распространение квазиплоской сдвиговой волны, но при этом не учитываются импульсы, записывающие состояние среды в момент формирования конуса Маха.

В каждой точке, через которую прошла квазиплоская сдвиговая волна, функция смещения имеет четко выраженный максимум в определённый момент времени, соответствующий времени прихода фронта волны в данный участок исследуемой области. На основании этого, сопоставив координаты пикселя по оси, параллельной оси распространения квазиплоской сдвиговой волны с временем прихода волны в данную точку, и зная такие же параметры у соседнего пикселя, можно вычислить скорость прохождения волны на данном участке. Теоретически, для этих целей достаточно двух пикселей. Но из-за воздействия шумов, этого недостаточно. Для нивелирования эффекта шумов предлагается брать большее количество пикселей.

В ходе написания алгоритма было предложено брать минимум три точки с главной центральной. В данном случае получаемый результат в виде скорости и пересчитываемым из неё модулем Юнга приписывался бы 2-ой (иными словами центральной) точке. Обусловленность такого выбора заключается в влиянии среды на прохождение волны в данной точке по сравнению с предыдущими и последующими. Также данная схема позволяет облегчить алгоритм обработки при подсчете значения модуля Юнга на краевых точках. Были опробованы комбинации из 3, 5, 7 и 9 точек. В ходе работы было выявлено, что оптимальным значением является 5 точек с главной центральной.

По итогам поиска оптимального количества учитываемых пикселей для подсчета скорости был написан алгоритм, который на выходе выдавал массив размерами 101 на 101 ячеек, в каждой из которых записано значение модуля Юнга в данной точке (рис. 5). Ис-

пользуя внутренние возможности программной среды MATLAB, мы получаем карту распределения модуля Юнга на исследуемом участке в зависимости от объектов, находящихся в ней. Модуль Юнга выбран в качестве численного итогового результата как более простой с точки зрения восприятия (его значение в зависимости от исследуемого объекта может варьировать в пределах от 0 до 100 кПа и более), чем скорость сдвиговой волны, чье значение, как уже упоминалось, может варьироваться от 1 до 20 м/с.

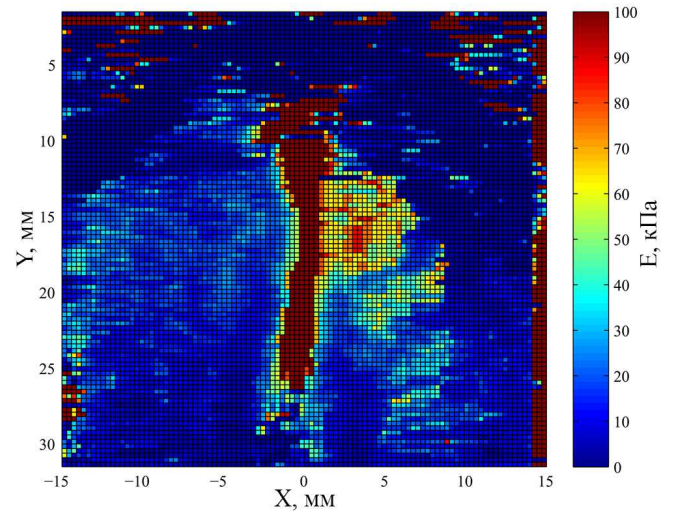


Рис. 5: Elasticity map, полученный на основе работы метода SSI на акустической системе Verasonics

Для тестирования и отладки схемы реализации метода Supersonic Shear Imaging на Verasonics, а также разработанного алгоритма получения elasticity map по итогам работы метода была проведена серия экспериментов с использованием калиброванного фантома CIRS MODEL 049 ELASTICITY QA PHANTOM — SPHERICAL. Данный фантом представляет собой макет мягкой биологической ткани, сделанный из зердана, содержащий в себе включения в виде сфер разного радиуса с определенным значением модуля Юнга. При

измерении данного фантома было выявлено несколько моментов при работе с методом SSI. Главной его особенностью является необходимость прицеливаться не в сам объект, как это происходит в методе SWEI, а в стороне от объекта. Это обусловлено тем, что при обработке результатов в центральной области elasticity map появляется так называемая слепая зона, которая соответствует размерам формируемого нами конуса Маха. Она появляется из-за того, что в нашем алгоритме не учитываются первые 4 изображающие импульсы, которые регистрирует среды в момент формирования квазиплоских сдвиговых волн. Если начинать распространение волн прямо из исследуемого объекта, то в таком случае часть объекта (а возможно и весь, в зависимости от его размеров) будет перекрыта слепой зоной, а значит теряется часть данных о нем.

В ходе работы с фантомом с помощью метода SSI были измерены 4 вложения — сферы разных типов. Результаты представлено в табл. I. Стоит отметить, что результат приведен сразу в значениях модуля Юнга, что отличается от метода SWEI. Для проверки на корректность полученных результатов приведены измерения калиброванного фантома с помощью акустической системы Verasonics с использованием метода SWEI, а также с помощью экспертной системы Supersonic Aixplorer. Результаты, полученные с помощью метода SWEI, приведены в двух размерностях — скорость сдвиговой волны и модуль Юнга — по причине получаемого изначального результата в виде скорости и уже последующего её пересчета в модуль Юнга. Стоит также отметить, что при измерении на исследовательской системе Verasonics при работе методов SWEI и SSI на элементы ультразвукового трансдьюсера подавалось одно значение напряжения — 50 В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из результатов, наблюдается хорошая сходимость между результатами, полученными с помощью акустической системы Verasonics методом SSI, и результатами, полученными экспертной системой Supersonic Aixplorer. Данный сходимость показывает корректность реализации метода на исследовательской системе, а также схожесть алгоритмов обработки полученных данных в сравнении с коммерческим аналогом. Стоит отметить, что при обработке результатов измерения сферы четвертого типа проявляется неоднородность данного объекта с точки зрения упругих характеристик, значение модуля Юнга изменяется от 56.32 до 87.15 кПа (в табл. I для данного объекта приведено среднее значение модуля Юнга). Сравнивая полученные результаты с паспортными, можно увидеть, что результаты не доходят до тех значений, что приводятся в справочной информации вместе с фантомом. Однако, полагаясь на результаты, полученные на экспертной системе, можно предположить, что мы имеем дело с некорректностью данных, приведённых для

конкретного фантома, а не с неправильностью работы реализованного метода.

При сравнении результатов, полученных с помощью методов SWEI и SSI на исследовательской системе Verasonics, видно, что значения в среде (background) и сферах с 1 по 3 тип схожи, что объясняется в том числе схожестью обработки результатов. При измерении сферы типа 4 методом SWEI, результат не удалось получить, из-за слишком большой разности упругих характеристик между средой и данной сферой. В методе SSI за счет большей амплитуды квазиплоской волны обеспечивается её распространения на большие расстояния и проникновение в объекты, имеющие сильные упругие характеристики, что позволяет измерить сферу типа 4.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект 18-42-520056.

1. Руденко О. В., Сафонов Д. В., Демин И. Ю., Рыхтик П. И., Андреев В. Г., Гурбатов С. Н., Романов С. В. Эластография сдвиговой волны: анализ клинических примеров (под. ред. А. В. Борсукова). Глава 1. Смоленск, 2017. С. 8.
2. Андреев В. Г., Шанин А. В., Демин И. Ю. // Акустический журнал. 2014. **60**, № 6. С. 673.
3. Халитов Р. Ш., Гурбатов С. Н., Демин И. Ю. // Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та. 2015. № 4. 154349.
4. Khalitov R. Sh., Gurbatov S. N., Demin I. Yu. // Physics of Wave Phenomena. 2016. **24**, № 1. P.73.
5. Сафонов Д. В., Рыхтик П. И., Шатохина И. В., Романов С. В., Гурбатов С. Н., Демин И. Ю. // Современные технологии в медицине. 2017. **9**, № 4. С. 51.
6. Tanter M., Bercoff J., Athanasiou A. // Ultrasound in Med. & Biol. 2008. **34**. P. 1373.
7. Bercoff J., Tanter M., Fink M. // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2004. **51**. P. 396.
8. Sarvazyan A. P., Rudenko O. V., Swanson S. D. // Ultrasound Med. Biol. 1998. **24**. P. 1419.
9. Демин И. Ю., Лисин А. А., Спивак А. Е., Шнейдман Д. Д. // Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та. 2018. № 6. 1860101.
10. Спивак А. Е., Лисин А. А., Чукилева Л. А., Шнейдман Д. Д., Демин И. Ю. / В кн.: Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине. : Материалы Всерос. школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. - Саратов: Изд-во Саратовский источник, 2017. С. 37.

Таблица I: Сравнение результатов измерения калиброванного фантома CIRS MODEL 049

Type	Verasonics, SWEI		Verasonics, SSI	Supersonic Aixplorer	Данные CIRS
	V, м/с	E, кПа		E, кПа	
Background	2.63	20.72	19.3	20.59	25
I	1.46	6.36	8.51	7.05	8
II	1.83	10.02	11.52	11.20	14
III	3.25	31.69	31.37	33.19	45
IV	XX	XX	5.17	61.18	80

Supersonic Shear Imaging: description and implementation of the method on Verasonics research system

A. E. Spivak^a, I. Yu. Demin, A. A. Lisin, A. E. Simonov

*Department of Acoustics, Faculty of Radiophysics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: ^astrigino831@gmail.com*

The work describes the method of shear wave elastography Supersonic Shear Imaging. A scheme for implementing this method on the Verasonics research system and an algorithm for processing and outputting data in the form of an elasticity map are presented. Physical modeling was carried out with a CIRS model 049 elasticity phantom on the Verasonics research system using SSI and SWEI methods, and on the Supersonic Aixplorer ultrasound system. The results were compared and conclusions were drawn about the quality of the method for the research system.

PACS: 43.25.Zx

Keywords: shear wave elastography, Supersonic Shear Imaging, SSI, shear wave velocity, Young's modulus, elasticity map, phantom, Verasonics.

Received 2019.

Сведения об авторах

1. Спивак Алексей Евгеньевич — студент магистратуры; тел.: (831) 465-63-05, e-mail: strigino831@gmail.com.
2. Демин Игорь Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент.
3. Лисин Артем Алексеевич — студент магистратуры.
4. Симонов Артем Евгеньевич — студент 4 курса.