

Система для расчета скоростей звука в особых областиах по данным УЗИ-томографии

Леонова Анна Васильевна

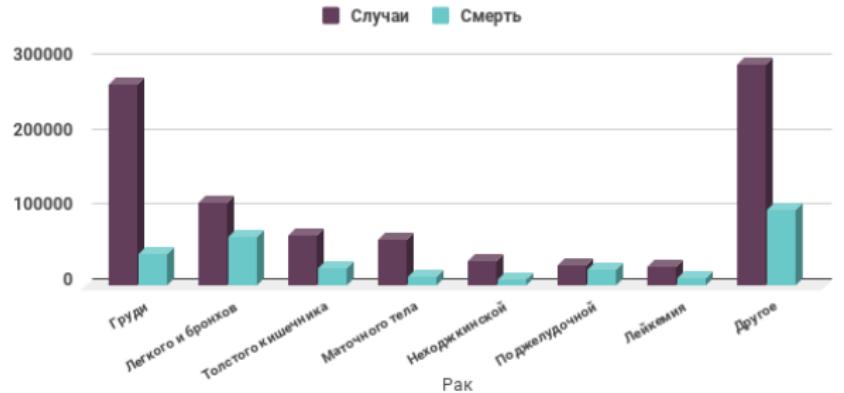
Науч.руководитель: д. ф.-м. н., профессор
Границин О.Н.
Рецензент: к. ф.-м. н., ст. науч. сотр. ИПМаш РАН
Иванский Ю.В.

Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург

9 июня 2020 г.

Актуальность

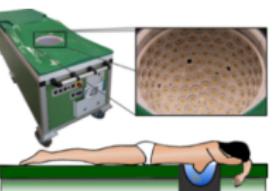
Соотношение смертей и случаев рака у женщин (2019)*



(a) Delphinus



(b) QT
Ultrasound



(c) KIT



(d) MUL

В настоящее время существует серьезная проблема с детектированием рака молочной железы на ранних стадиях, что демонстрируется на графике: наибольший процент регистрации случаев рака у женщины — онкология груди, а также второе место по количеству смертей. Стандартные методы диагностики причиняют вред здоровью или недостаточно точны. Поэтому сейчас большое развитие получает ультразвуковая томография для скрининга молочной железы: не было обнаружено негативных побочных эффектов УЗИ (Ультразвуковое исследование, УЗИ), а также УЗИ неинвазивно, то есть без вмешательства в организм человека (в отличие от биопсии). Сейчас в мире существует 4 похожих разработки в этом направлении. Но часть из них приостановлена. На картинке d) вы видите томограф исследования, в рамках которого в collaboration с китайским университетом (Huazhong University of Science and Technology, г.Ухань, Китай) была сделана эта работа.

* American Cancer Society

Цель и задачи

Разработка системы для расчета скоростей звука в особых областях по данным УЗИ-томографии

- Формирование требований к системе
- Разработка архитектуры системы
- Разработка прототипа системы
- Апробирование системы на реальных данных

Цель — система для расчета скоростей звука в особых областях. Для достижения этой цели ставятся следующие задачи: формирование требований к системе и разработка ее архитектуры, разработка прототипа этой системы и его апробация на реальных данных УЗ аппарата.

Требования к процессу обработки

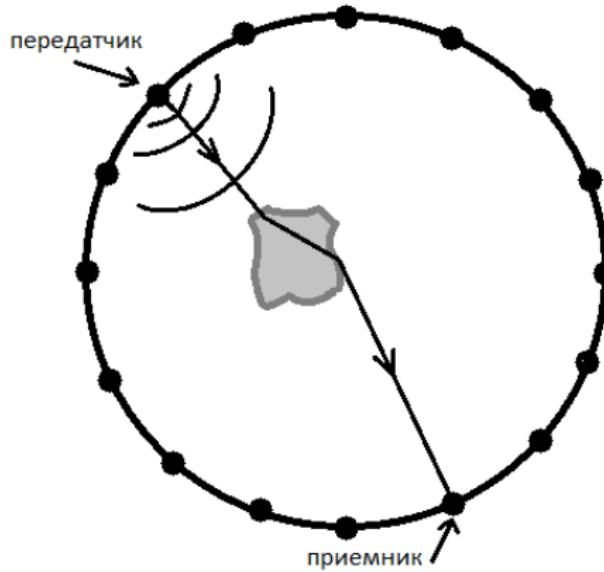


Рис. 2: Круговой трансдьюсер с N сенсорами

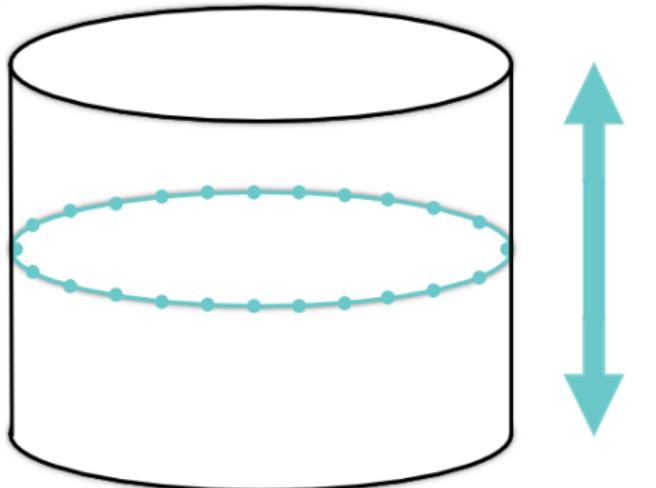


Рис. 3: Схема аппарата

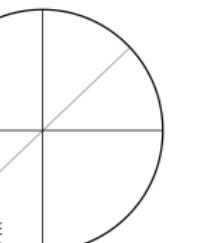
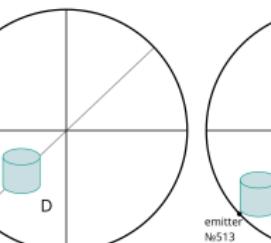
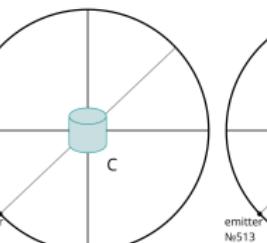
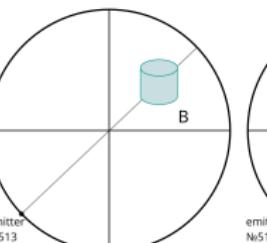
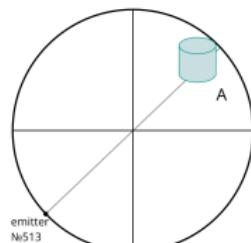
Система разрабатывается в рамках проекта реконструкции изображений при акустической томографии. Система для расчета скоростей звука в особых областях должна соответствовать математической модели. Имеется круговой трансдьюсер с N датчиками, где $N = 2048$, как показано на рисунке 2. Внутри него исследуемая область. УЗ-томограф представляет собой цилиндр, где путем перемещения этого кольца (Рис. 2) в вертикальном направлении, происходит сканирование. Результатом такой процедуры сканирования являются поперечные «срезы». Эта работа направлена на исследование этих срезов. Каждый датчик является излучателем УЗ-волн и приемником. Рассматривается задача обнаружения особых областей (серый объект на Рис. 2) и определения скорости звука в них. Исходные сырье данные – это показания датчиков, регистрирующих уровень сигнала на протяжении определенного времени. Исследуемые данные – это время прохождения сквозного сигнала через рассматриваемую область, извлеченное из сырьих данных. Эти исследуемые данные используются для восстановления распределения скорости в интересующей области. Это задача сложная из-за возникающей нелинейности, т.к. она возникает из-за преломления на границе сред при распространении сигнала (Рис. 2).

Экспериментальные данные

35 экспериментов — > 1,5 Тб данных

Один срез сканирования — 30 Гб данных

Диаметры объектов: 1, 2, 3, 4, 5 см



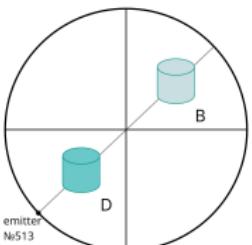
(a) Позиция А

(b) Позиция В

(c) Позиция С

(d) Позиция D

(e) Позиция E



(f) Два объекта: позиции В и D



(g) Объекты экспериментов

Этот проект в коллaborации с китайским университетом длится много лет. В прошлом году в Китай были совершены поездки, в которых я также принимала участие. В этих поездках проходили теоретические семинары и дискуссии. В результате этих поездок были получено много исходных сырых данных (объемом больше 1,5 Тб) — 35 разных экспериментов. В основном, каждый эксперимент — это один срез сканирования (объемом 30 Гб).

Таким образом, моей задачей было расширить работу, начатую совместно с выпускницей прошлого года Ксенией Гонта: улучшить обработку исходных данных, сделать возможным обработать все данные эксперимента (а не $\frac{1}{8}$ их часть), реализовать вычисление скорости звука особых областей, в том числе для нескольких объектов.

Эксперименты представляли собой сканирование аппаратом объектов разного диаметра в разных местоположениях: местоположения приведены на слайде — от позиции А до позиции Е (Рис. а-е), а диаметры объектов от 1 см до 5 см.

Также эксперименты проводились для двух объектов в позиции В и D (Рис. f), но для объектов разных размеров. Пример объектов представлен на Рис. g.

Требования к входным данным

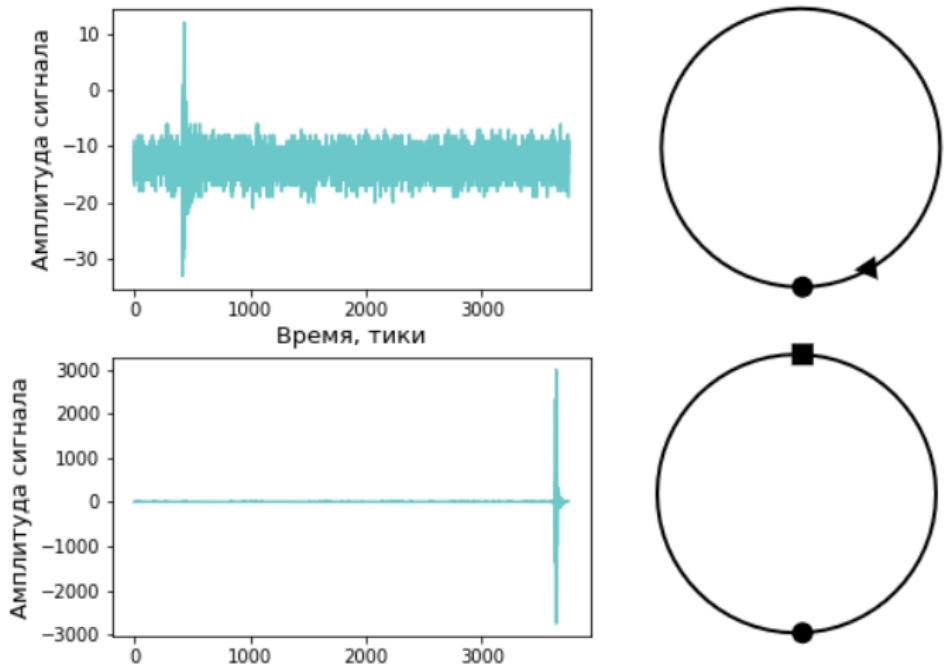
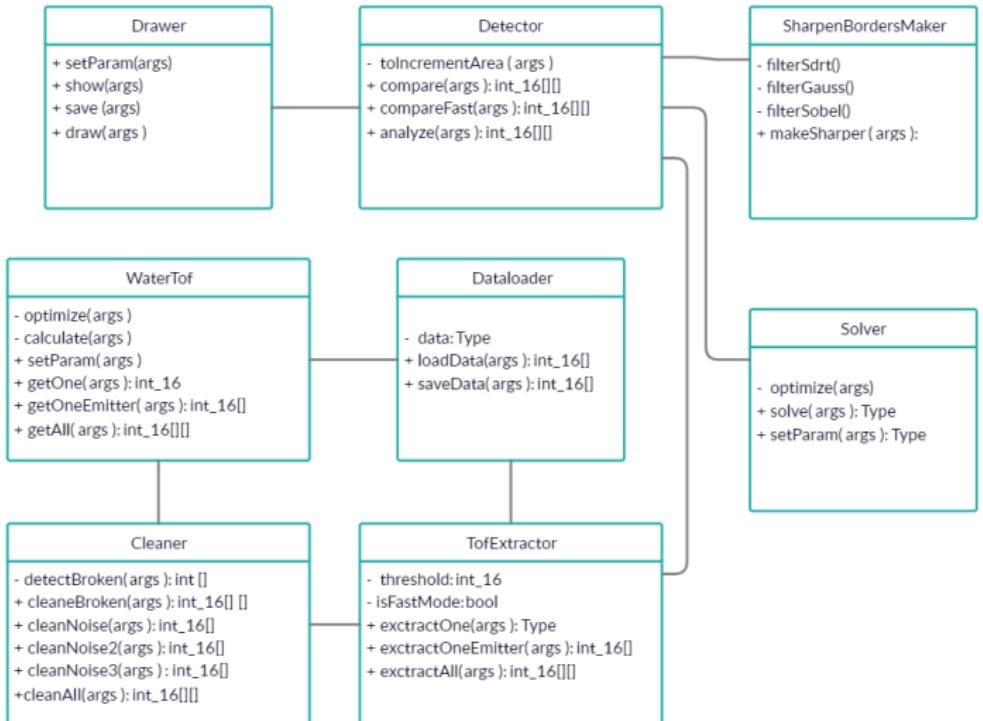


Рис. 5: Примеры исходных данных: ● – излучающий датчик, ■, ▼ – принимающие датчики

На слайде представлена структура входных данных для пары датчиков (принимающего и излучающего). По горизонтальной оси откладывается дискретное время — тики, по вертикальной — амплитуда сигнала.

Архитектура



На слайде представлена диаграмма классов программного решения. Основными компонентами являются:

1. TofExtractor (который обрабатывает исходные сырые данные),
2. Detector (который выделяет особые области) и
3. Solver (который определяет плотность особых областей).

Плотность областей связана с распространением звука в них, поэтому далее эти понятия будут взаимозаменяемы. Рассмотрим эти компоненты подробнее.

Компонент «Извлечения времени прибытия» (1)

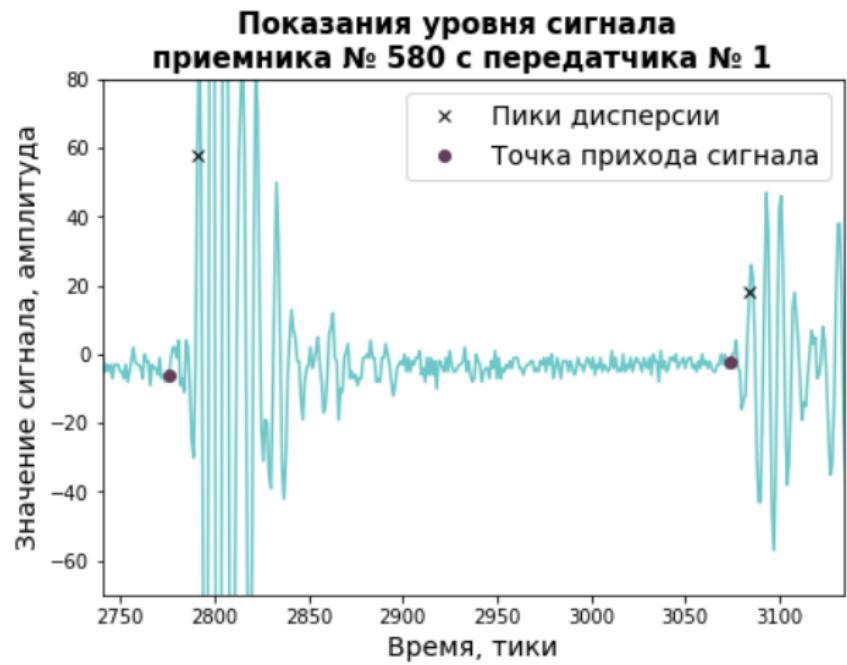
Время прибытия (Time-of-flight, TOF)

Методы:

- Сравнение с эталонным сигналом
- Вычисление TOF по пороговому значению
- Подход на основе информационного критерия Акаике
- Модифицированный подход на основе информационного критерия Акаике

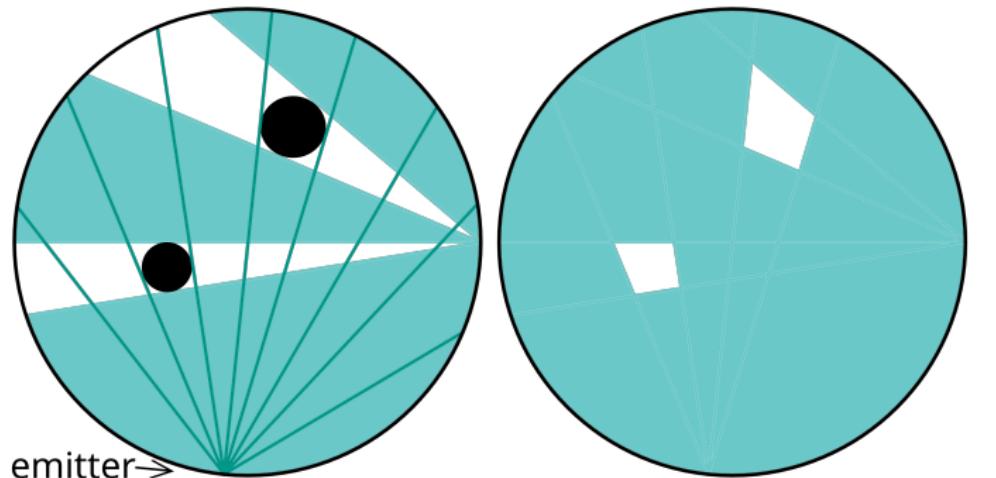
Этот компонент обрабатывает исходные данные. Нас интересует первое время прибытия сигнала — Time-of-flight — от передатчику к приемнику ультразвуковой волны. Были рассмотрены способы для извлечения TOF, представленные на слайде и проанализированы. Подходящие для нашей задачи способы были реализованы: вычисление по пороговому значению (быстрый, менее точный), подход на основе информационного критерия Акаике и его модификация (более долгая по времени выполнения, но более точная).

Компонент «Извлечения времени прибытия» (2)



Результат работы этого компонента представлен на рисунке. Фиолетовыми точками обозначены времена приходов сигналов, эти TOF всех сигналов хорошо обнаружены и очень близки к результатам, которые указали эксперты.

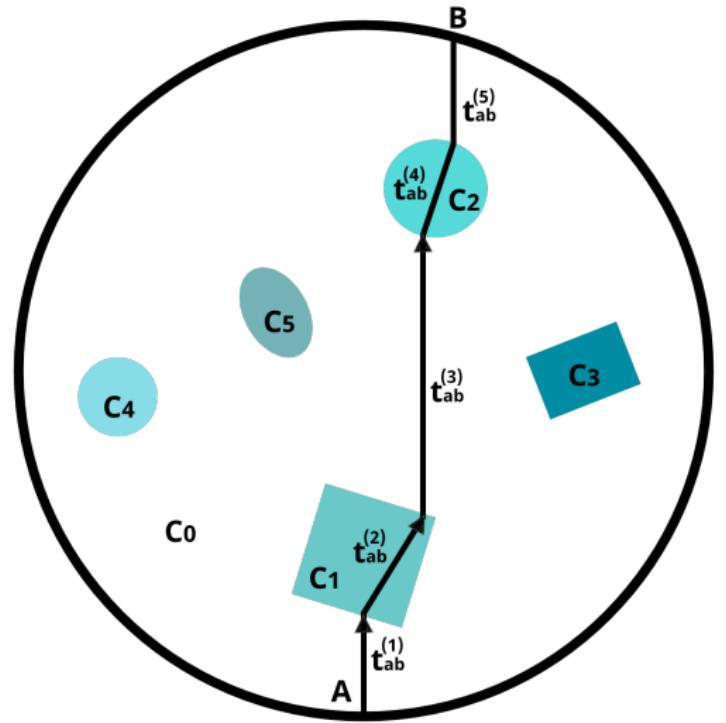
Компонент «Детекция особых областей»



Следующий компонент детекции особых областей реализует алгоритм, который визуализирован на слайде. Этот алгоритм заключается в сравнении времен прибытия сигнала в среде без объектов и исследуемой среде. Стоит упомянуть, что эксперименты проводятся в однородной среде, достаточно похожей на исследуемую (например, в воде, так как скорость распространения звука в воде достаточно близка к скорости звука в ткани груди).

Для выполнения компонента детекции потребуются данные воды (данные эксперимента без объекта) и очищенные данные. Предподготовленные данные подаются этому модулю для обнаружения особых областей.

Компонент «Определение плотности» (1)



После обнаружения особых областей форма и местоположение объектов стали известны. Следующая задача — найти скорость звука этих объектов. Для этого был реализован компонент определения плотности, решающий задачу, приведенную на слайде. Закрашенные области — объекты, найденные на предыдущем шаге. Их окружает однородная среда — вода. C_i — неизвестные скорости звука, которые надо найти. C_0 — известная скорость звука в воде. Черная ломаная — траектория преломленного луча из датчика в датчик B , которая проходит за время t_{ab} .

Оптимизационная задача

M – объектов;

$c_k, k = 1, \dots, M$ – искомые неизвестные скорости в объектах;

c_0 – скорость в окружающей среде, t_{ij} – известные времена из i в j

$$F = \sum_i \sum_j (\hat{t}_{ij}(c_1, \dots, c_M) - t_{ij})^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\hat{t}_{ij}(c_1, \dots, c_M)$ – функция времени от неизвестных c_k
для датчиков i, j .

Таким образом, ставится задача оптимизации, которая представлена следующим образом: найти такие значения скоростей c_1, \dots, c_M , чтобы вычисленные значения $\hat{t}_{ij}(c_1, \dots, c_M)$ были минимально различными из табличного набора значений t_{ij} .

Компонент «Определение плотности» (2): Трассировка луча

Из уравнения эйконала получаем следующую систему¹, описывающую движение звука в заданном направлении :

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{r}}{dt} = c\mathbf{n} \\ \frac{d\mathbf{b}}{dt} = -\frac{c_0 \nabla c}{c} \end{cases}, \quad (2)$$

где \mathbf{r} – вектор координаты зависящий от времени, \mathbf{n} – единичный вектор, ортогональный волновому фронту $\mathbf{n} = \frac{\mathbf{b}}{b}$, c_0 – скорость в воде, \mathbf{c} – значение распределения скорости распространения звука.

Решаем методом Рунге-Кутта 4ого порядка

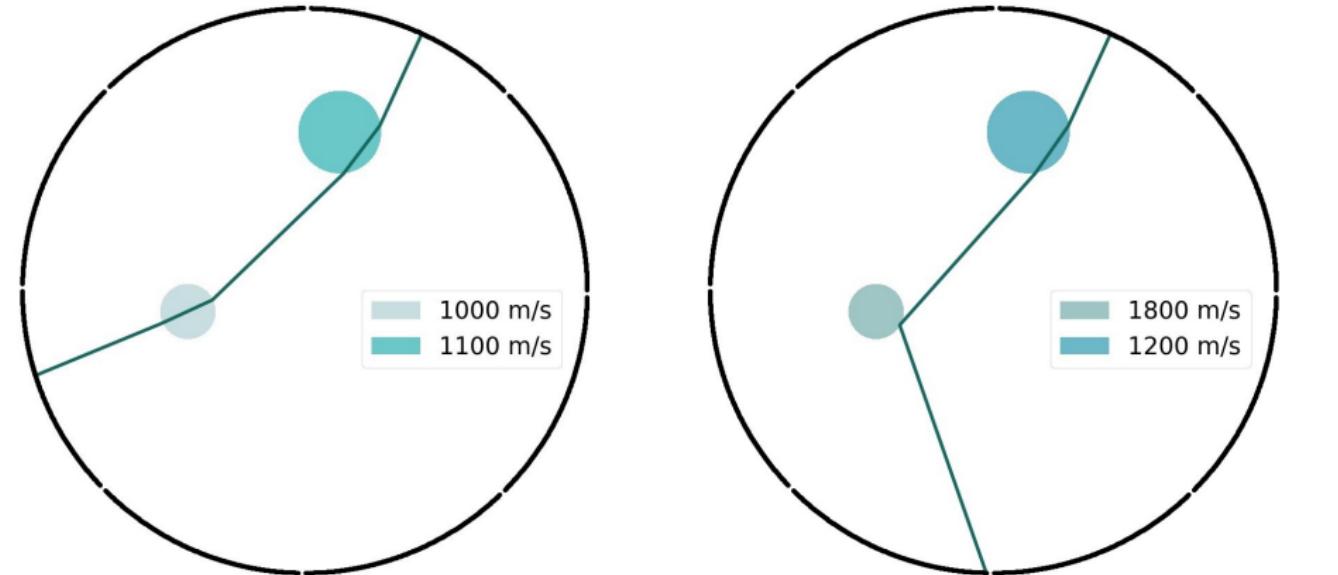
Для решения этой задачи требовалось реализовать трассировку луча. Это было реализовано с помощью решения системы уравнения, представленной на слайде, методом Рунге-Кутта 4ого порядка.

¹Jovanović I. Inverse problems in acoustic tomography: theory and applications :

Diss. – 2008.

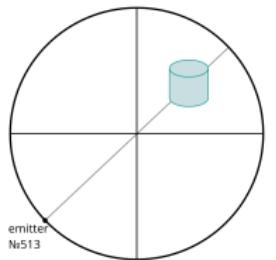


Компонент «Определение плотности» (3)

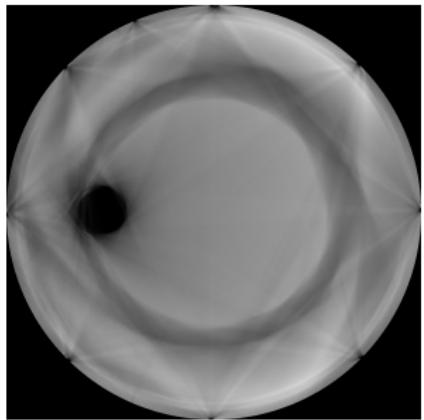


Пример работы компоненты на этапе трассировки лучей при разных скоростях звука в объектах на тестовых данных приведен на слайде. Перебором плотностей и перетрассировкой лучей ищется оптимальные скорости звука.

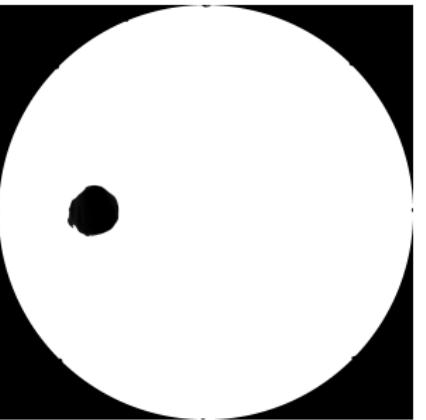
Апробация прототипа системы: эксперимент 2B (1)



(a) Эксперимент 2B: позиция объекта



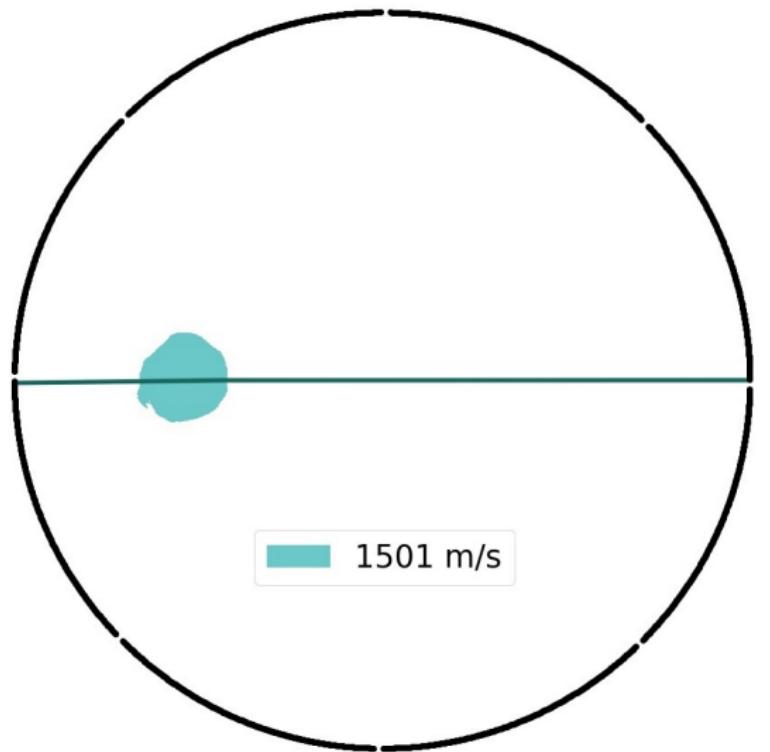
(b) Детекция без фильтрации



(c) Детекция с фильтрацией

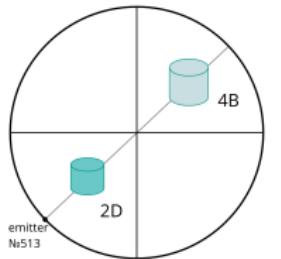
Таким образом, для реализованного прототипа системы была проведена апробация на реальных экспериментальных данных с УЗ томографа. Рассматривается эксперимент с одним объектом, радиус которого 2 см и позиция В, как показано на рисунке а). Для этого эксперимента были извлечены времена прихода сигналов и построены карты препятствий, что продемонстрировано на слайде под пунктами б) и с).

Апробация прототипа системы: эксперимент 2В (2)

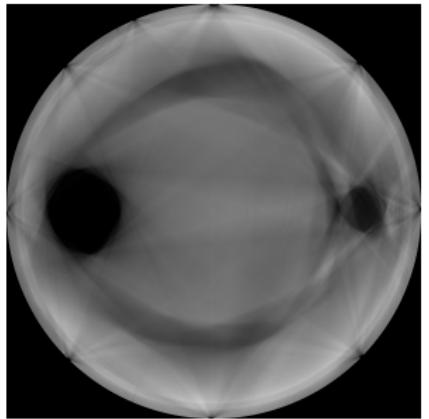


Для этого же эксперимента была найдена скорость звука в объекте. Этой скорости соответствует следующий путь из определенного сенсора-излучателя. Хочется подчеркнуть, что преломление имеется, но не столь заметно, так как плотности воды и объекта близки.

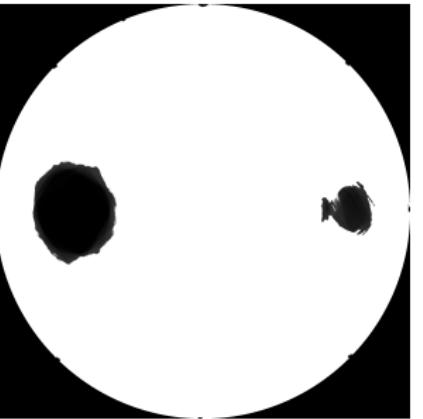
Апробация прототипа системы: эксперимент 4B-2D (1)



(a) Эксперимент 4B-2D: позиции объектов



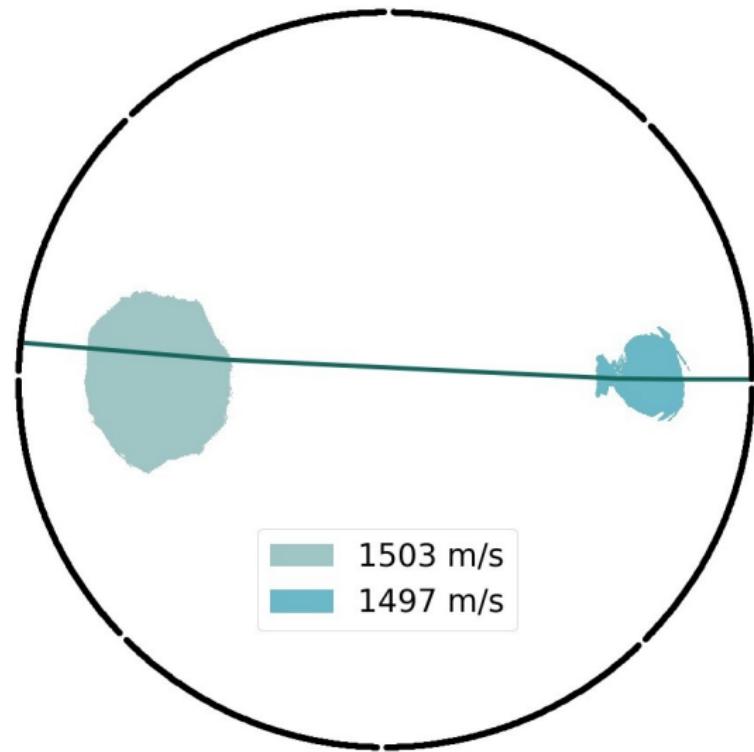
(b) Детекция без фильтрации



(c) Детекция с фильтрацией

Также прототип был апробирован на эксперименте с двумя объектами, радиусы которых 2 и 4 см, расположенных как на картинке а). Были извлечены времена прихода сигналов и построены карты расположения объектов, что продемонстрировано на слайде под пунктами б) и с).

Апробация прототипа системы: эксперимент 4B-2D (2)



Для этого же эксперимента были найдены скорости звука в объектах. Этим скоростям соответствует следующий путь из определенного сенсора-излучателя, представленный на слайде.

Результаты

- Составлены требования к системе
- Разработана архитектура системы
- Разработан прототип системы
- Апробирован прототип системы на реальных данных

Результаты были представлены:

- на XXI международной конференции
“Навигация и управление движением”,
- на конференции СПИСОК-2019,
- at the 9th International Scientific Conference on Physics and Control,
- в журнале Physics and Control (Q2, Scopus)

Таким образом, получены следующие результаты, перечисленные на слайде: составлены требования к системе и разработана её архитектура, разработан прототип системы, для реализации которого решены несколько подзадач: извлечение времени прохода сигнала, детекция формы и местоположения объектов, определение скорости звука в объекте и трассировка лучей.

Результаты работы были представлены на конференциях, указанных на слайде, и опубликованы статьи.