

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

Леонова Анна Васильевна

Науч.руководитель: д. ф.-м. н., профессор

Граничин О.Н.

Рецензент: к. ф.-м. н., ст. науч. сотр. ИПМаш РАН

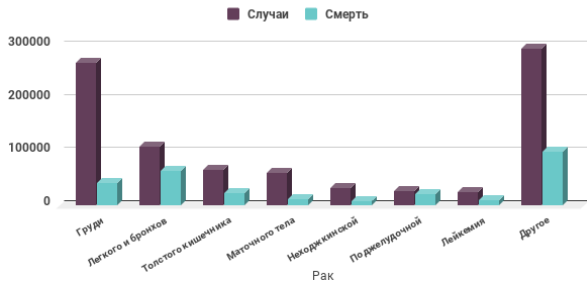
Иванский Ю.В.

Санкт-Петербургский государственный университет

Санкт-Петербург

9 июня 2020 г.

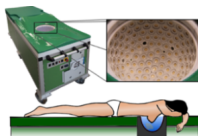
Соотношение смертей и случаев рака у женщин (2019)*



(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 коллаборации с китайским университетом (Huazhong University of Science and Technology, г.Ухань, Китай) была сделана эта работа.

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.

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

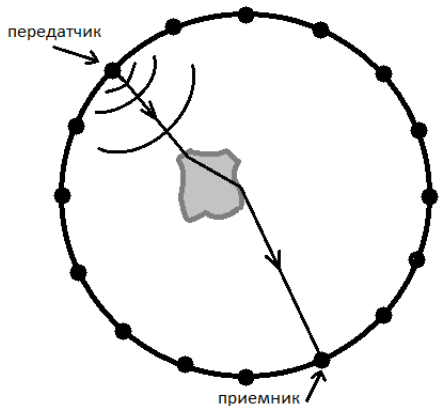


Рис. 2: Круговой транзьюсер с N сенсорами

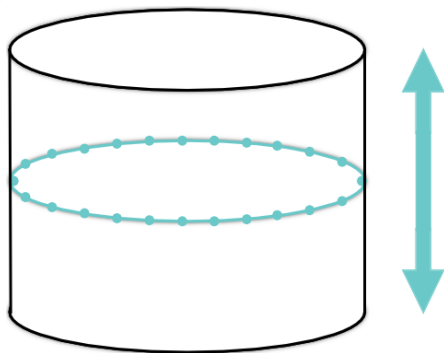


Рис. 3: Схема аппарата

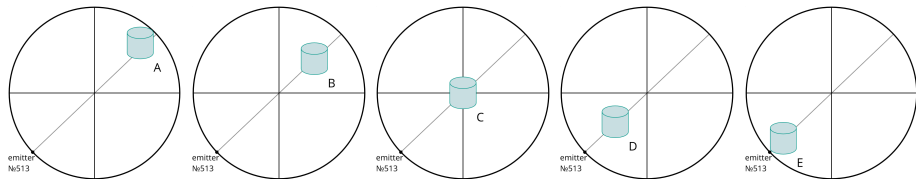
Система разрабатывается в рамках проекта реконструкции изображений при акустической томографии. Система для расчета скоростей звука в особых областях должна соответствовать математической модели. Имеется круговой транзьюсер с N датчиками, где $N = 2048$, как показано на рисунке 2. Внутри него исследуемая 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-волны и приемником. Рассматривается задача обнаружения особых областей (серый объект на Рис. 2) и определения скорости звука в них. Исходные сырые данные – это показания датчиков, регистрирующих уровень сигнала на протяжении определенного времени. Исследуемые данные – это время прохождения сквозного сигнала через рассматриваемую область, извлеченное из сырых 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

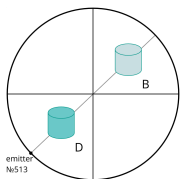
35 экспериментов — > 1,5 Тб данных

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

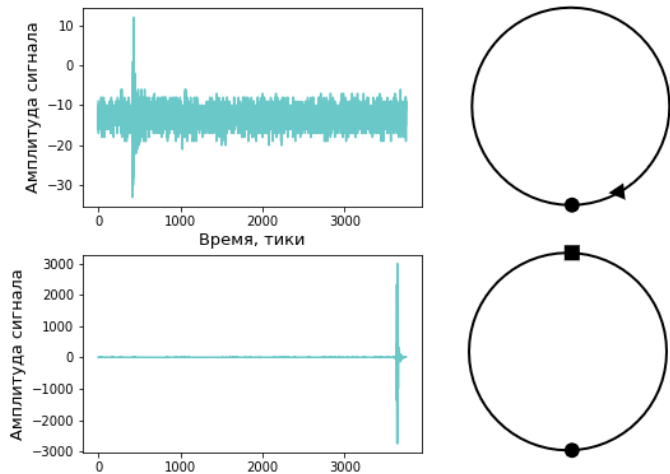
Этот проект в коллаборации с китайским университетом длится много лет. В прошлом году в Китай были совершены поездки, в которых я также принимала участие. В этих поездках проходили теоретические семинары и дискуссии. В результате этих поездок были получены много исходных сырых данных (объемом больше 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 Гонтой: 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 E (Рис. а-е), а диаметры объектов от 1 см до 5 см.

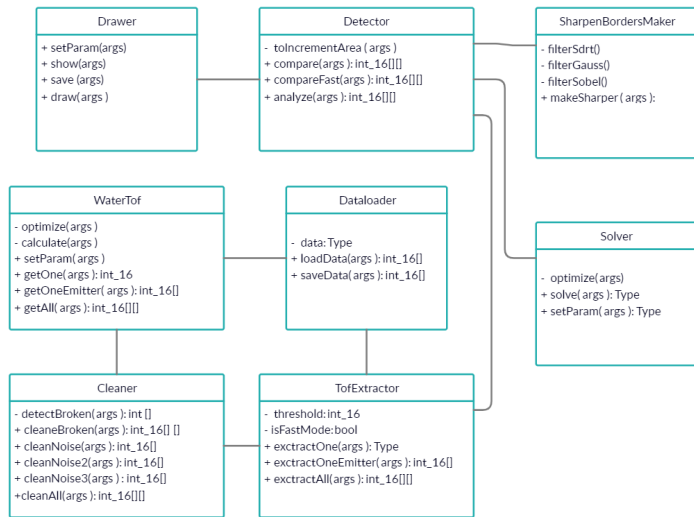
Также эксперименты проводились для двух объектов в позиции В и D (Рис. f), но для объектов разных размеров. Пример объектов представлен на Рис. g.

Требования к входным данным



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

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



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).

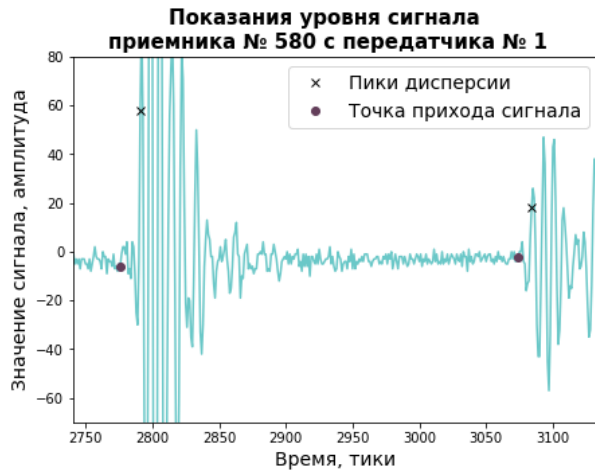
Плотность областей связана с распространением звука в них, поэтому далее эти понятия будут взаимозаменяемы. Рассмотрим эти компоненты подробнее.

Время прибытия (Time-of-flight, TOF)

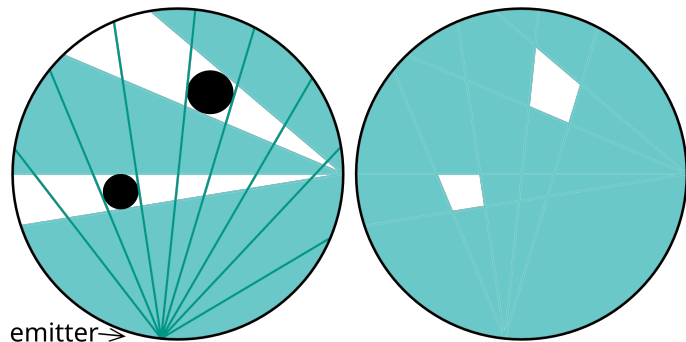
Методы:

- 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).



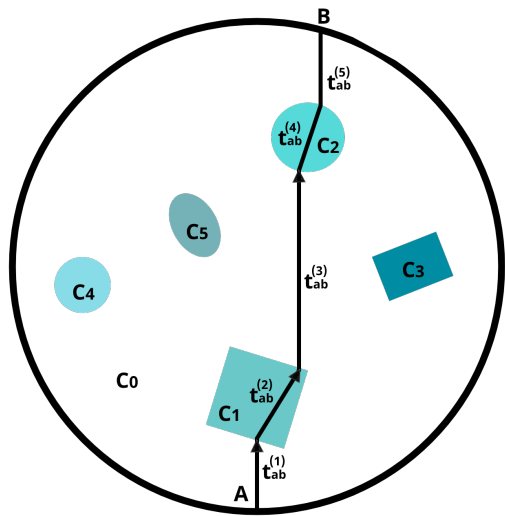
Результат работы этого компонента представлен на рисунке. Фиолетовыми точками обозначены времена приходов сигналов, эти TOF всех сигналов хорошо обнаружены и очень близки к результатам, которые указали эксперты.



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 A в датчик B , которая проходит за время t_{ab} .

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} .

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 .

Компонент «Определение плотности» (2): Трассировка луча

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

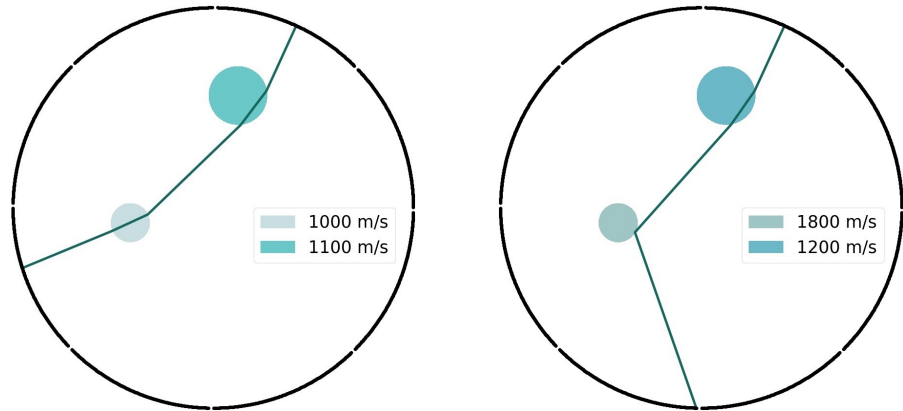
$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{r}}{dt} = c\mathbf{n} \\ \frac{d\mathbf{b}}{dt} = -\frac{c_0 \nabla c}{c} \end{cases}, \quad (2)$$

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, c – значение распределения скорости распространения звука.

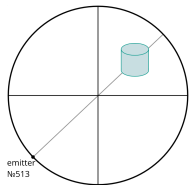
Решаем методом Рунге-Кутты 4ого порядка

¹Jovanović I. Inverse problems in acoustic tomography: theory and applications : Diss. – 2008.

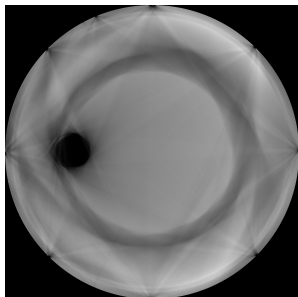
Для решения этой задачи требовалось реализовать трассировку луча. Это было реализовано с помощью решения системы уравнения, представленной на слайде, методом Рунге-Кутты 4ого порядка.



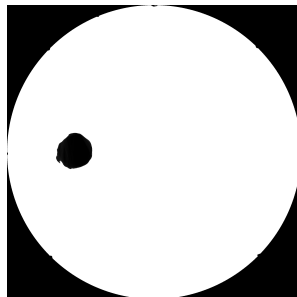
Пример работы компоненты на этапе трассировки лучей при разных скоростях звука в объектах на тестовых данных приведен на слайде. Перебором плотностей и перетрассировкой лучей ищется оптимальные скорости звука.



(а) Эксперимент 2В: позиция объекта

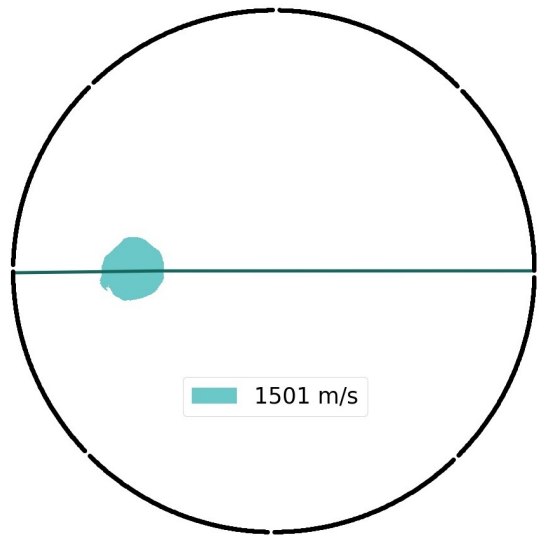


(b) Детекция без фильтрации



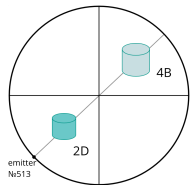
(с) Детекция с фильтрацией

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 b) и с).

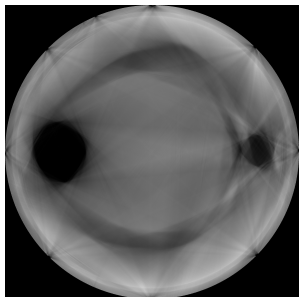


Для этого же эксперимента была найдена скорость звука в объекте. Этой скорости соответствует следующий путь из определенного сенсора-излучателя. Хочется подчеркнуть, что преломление имеется, но не столь заметно, так как плотности воды и объекта близки.

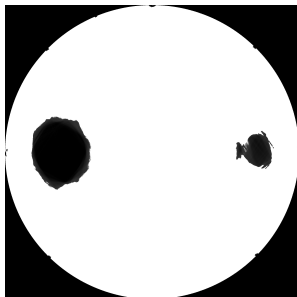
Апробация прототипа системы: эксперимент 4В-2D (1)



(а) Эксперимент 4В-2D: позиции объектов

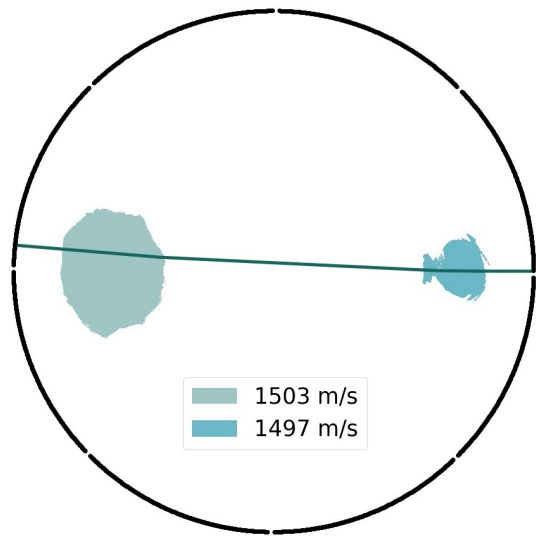


(b) Детекция без фильтрации



(с) 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 b) и с).



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

- 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.