

Санкт-Петербургский государственный университет

Математическое обеспечение и администрирование информационных систем

Гонта Ксения Алексеевна

Технология восстановления особых областей на основе данных акустической томографии

Магистерская диссертация

Научный руководитель:
д. ф.-м. н., профессор кафедры системного программирования СПбГУ Граничин О. Н.

Рецензент:
к. ф.-м. н., старший научный сотрудник ИПМаш РАН Иванский Ю. В.

Санкт-Петербург
2019

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Software and Administration of Information Systems Software Engineering

Kseniia Gonta

Technology of recovery of specific areas based
on acoustic tomography data

Graduation Thesis

Scientific supervisor:
professor Granichin O. N.

Reviewer:
candidate Ivanskiy Y. V.

Saint-Petersburg
2019

Оглавление

Введение	5
1. Обзор	9
1.1. Устройство аппарата	9
1.2. Хранение данных	10
1.3. Хранение кода	11
1.4. Нахождение TOF	11
1.4.1. Определение TOF вручную	12
1.4.2. Сравнение с эталонным сигналом	13
1.4.3. Вычисление TOF по пороговому значению	13
1.4.4. Информационный критерий Акаике	14
1.5. Построение карты плотностей	15
1.5.1. Решение систем линейных уравнений	15
1.5.2. Рандомизированный алгоритм	16
1.5.3. BFGS метод	17
1.6. Среда исполнения и визуализации процесса восстано- вления особых областей	17
1.6.1. Jupiter Notebook	18
1.6.2. DSM-платформа для диаграммных языков	18
2. Алгоритм распознавания особых областей	20
2.1. Нахождение TOF	27
2.2. Построение карты препятствий	29
2.3. Построение карты плотностей	30
2.3.1. При падении луча под произвольным углом	30
2.3.2. При падении луча под прямым углом	32
3. Описание прототипа системы	33
3.1. Архитектура и реализация	33
3.2. Апробация	37
Заключение	41

Введение

Акустическая томография — это метод получения послойного изображения внутренней структуры объекта посредством просвечивания объекта акустическими волнами в различных направлениях. По полученным проекциям проводится восстановление структуры объекта. Выделяют отражательную и трансмиссионную акустическую томографию. В случае отражательной томографии излучающий и принимающий датчик располагаются по одну сторону от объекта и для восстановления структуры используются эхо-сигналы, отраженные от различных областей объекта. В случае трансмиссионной томографии исследуемый объект находится между испускающим и принимающим датчиками. При этом используются сигналы, прошедшие через объект или рядом с ним. Кроме того, эти два метода могут комбинироваться для достижения лучшего результата.

При помощи акустической томографии может быть восстановлена карта плотностей, температур, скоростей звука в исследуемой области, то есть любых параметров, влекущих изменение акустических волн, распространяющихся в среде. Современная техника позволяет работать с волнами с большим диапазоне частот. Возможно использование волн, имеющих частоту как в несколько десятков герц, так и в несколько гигагерц. Благодаря этому акустическая томография активно используется в различных областях. Так, например, этот метод применяется для исследования внутренних органов, кровеносных сосудов, земной коры и трубопроводов. Кроме того, этот метод используется для определения солености, температуры и плотности Мирового океана, ведутся исследования возможности определения температуры органов.

В работе рассматривается применение трансмиссионно-отражательной томографии для построения карты плотностей. В качестве экспериментальных данных использовались данные с ультразвукового томографа для диагностики рака молочной железы.

На сегодняшний день рак молочной железы является ведущей онкопатологией в мире по заболеваемости и смертности среди женского

населения. Смертность от рака молочной железы может быть уменьшена посредством диагностики заболевания на ранних стадиях и назначения соответствующего лечения. Распространенным диагностическим методом молочной железы является рентгеновская маммография. Одним из недостатков данного подхода является необходимость сжатия молочной железы, которая ведет к значительному дискомфорту у пациенток. Помимо этого, при исследовании молочных желез у молодых женщин, имеющих более плотные ткани, рентгеновский метод является более травматичным вследствие ионизирующего излучения, накладывающего нагрузку на организм. Такие диагностические методы как рентгеновская компьютерная томография и магнитно-резонансная томография имеют высокую точность, однако радиационное воздействие, которому подвергается организм пациента во время исследования, является потенциально опасным. Ультразвуковые исследования в свою очередь широко используются для обследования различных внутренних органов и на это есть несколько причин. Во-первых, ультразвуковая томография значительно дешевле других видов томографии. Во-вторых, этот метод является безопасным для пациента.

Применимость аппарата ультразвуковой томографии для поиска патологий в молочных железах обусловлена тем, что среднее значение плотности различных тканей в груди различается. Это влечет за собой различие во времени прохождения ультразвукового сигнала в зависимости от плотности ткани. Различие ожидаемого времени прохождения сигнала с фактическим может дать информацию об изменении плотности в среде. В таблице 1 представлено среднее значение скорости звука в различных тканях.

Стоит отметить, что акустическая томография изначально применялась в сейсмологии для исследования земной коры. Частота исследуемых волн при этом может достигать нескольких килогерц и применяемые методы обычно неустойчивы. Аппарат, рассматриваемый в работе, работает с сигналами на частоте нескольких мегагерц, а положение и количество датчиков всегда фиксировано. Это даёт возможность разработки и применения инновационного алгоритма восстановления

особых областей с высокой точностью.

Таблица 1: Среднее значение скорости звука в различных тканях

Ткань	Среднее значение скорости звука (м/с)
Жир	1478
Молочная железа	1510
Доброкачественная опухоль	1513
Злокачественная опухоль	1548
Среднее значение жира и молочной железы в пременопаузе	1468
Среднее значение жира и молочной железы в постменопаузе	1510
Паренхима молочной железы	1487
Киста молочной железы	1568
Фиброаденома молочной железы	1584

Вследствие повышения спроса на УЗИ аппарата, с каждым годом разрабатывается все больше модификаций подобных аппаратов. Растет количество датчиков, увеличивается частота дискретизации, а значит и разрешающая способность аппаратов. Все это ведет влечет за собой появление новых проблем, а именно увеличение объема данных, полученных во время исследования, а значит и рост времени обработки данных. Однако в задачах выявления патологий полученные данные имеют разреженную структуры, а значит весь объем данных обладает свойством избыточности. Благодаря этому свойству объем данных можно значительно сократить, не потеряв при этом качество восстановленного изображения.

Постановка задачи

Целью работы является разработка прототипа системы восстановления особых областей на основе данных акустической томографии. Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- Разработать архитектуру решения
- Реализовать систему восстановления особых областей
- Провести эксперименты

1. Обзор

1.1. Устройство аппарата

Типовой аппарат для ультразвуковой диагностики рака молочной железы представляет собой цилиндр, в который помещается женская грудь. Вдоль оси цилиндра движется кольцо, с расположенными на нем УЗ-датчиками, равноудаленными друг от друга (рисунок 1). Датчики способны как принимать, так и излучать сигнал. В кольце присутствуют 2048 активных датчиков, а так же 8 вставок по 8 пустых датчиков, которые не излучают и не принимают сигнал. Такие пустые вставки присутствуют через каждые 256 элементов. Все датчики равноудалены друг от друга.

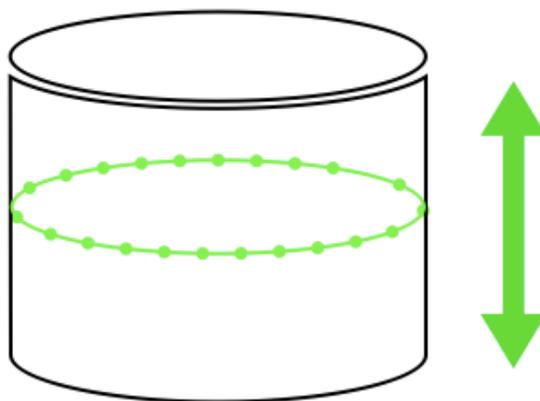


Рис. 1: Схематичное устройство аппарата

Для получения изображения одного слоя кольцо датчиков устанавливается на определенном уровне. Один датчик испускают сигнал, а все остальные принимают сигнал на протяжении 3750 тактов. Такая процедура повторяется для каждого датчика в кольце. Данные с принимающих датчиков представляют собой показания в датчике в дискретные моменты времени. Таким образом, для одного слоя используется $2048^2 * 3750$ данных. В дальнейшем все изображения, полученные

на разных срезах, можно использовать для построения 3D модели. Общий размер данных для всего исследования составляет $2048^2 * 3750 * K$ данных, где K — это количество слоев. K выбирается в зависимости от размера объекта таким образом, чтобы покрыть весь объект. Устройство аппарата позволяет работать как со сквозными так и с отраженными сигналами.

1.2. Хранение данных

В эксперименте, с которым велась работа, данные одного слоя занимают порядка 32 Гб и разбиты на 4 файла. Одним из распространенных способов хранения данных является создание ftp-сервера и загрузкой данных на него. FTP (File Transfer Protocol) — это протокол для передачи данных по сети. FTP имеет клиент-серверную архитектуру. Доступ к FTP серверу можно организовать несколькими способами:

- Анонимно
- Авторизованно

При подключении в анонимном режиме для получения доступа к серверу клиенту будет достаточно передать в качестве имени пользователя «anonymous» или «ftp», а в качестве пароля указать адрес электронной почты. В случае настройки авторизованного доступа к серверу клиент должен иметь учетное имя и пароль. FTP сервер имеет различные параметры для настройки. Так, например, пользователю можно разрешить не только скачивать файлы с сервера, но и загружать свои. Более того, для каждого пользователя возможно настроить свой домашний каталог, выше которого они не смогут подняться. Для подключения к FTP серверу можно использовать веб-браузер или файловые менеджеры, например Finder. В случае использования браузера при нажатии на файл начнется его автоматическое скачивание. Главным недостатком FTP сервера является его небезопасность, так как он изначально не разрабатывался как защищенный протокол. В следствии этого он имеет достаточное количество уязвимостей.

1.3. Хранение кода

Для хранения кода обычно используются различные системы контроля версий. Наиболее распространенной распределенной системой управления версиями является Git. Подобная система позволяет хранить всю историю изменения кодовой базы и при необходимости возвращаться к предыдущим версиям. Кроме того, очевидным плюсом системы является то, что в ней присутствуют так называемые "ветки", в которых хранятся разные версии кода. При необходимости, можно иметь одну базовую ветку со стабильной версией кодовой базы, а всю новую функциональность разрабатывать в отдельных ветках и только после проверки их работоспособности вносить эти изменения в стабильную ветку. В случае работы над кодом нескольких человек может быть использован git-сервер, который дает возможность удаленного доступа к репозиторию. Существуют сервисы, которые предоставляют возможность создания и хранения таких репозиторий на их серверах. В качестве примера можно привести сервисы GitHub и BitBucket. Основным недостатком подхода с использованием сторонних сервисов является то, что код хранится на серверах сторонних компаний. Кроме того, в случае использования GitHub создание частных репозиторий для более чем трех соавторов потребует дополнительной платы. В связи с этим, распространенной практикой является поднятие собственного git-сервера на своих серверах.

1.4. Нахождение ТОФ

Аналоговый сигнал, поступающий на принимающий уз-датчик состоит, вообще говоря, из непрерывного во времени бесконечного множества точек, являющимися значениями амплитуды в определенный момент времени. Однако, в процессе измерений возможно выделить лишь конечный ряд значений в дискретные моменты времени. То есть происходит квантование по времени. Обычно значения считываются через равные промежутки времени. В общем случае, конечно, отсчеты могут идти неравномерно, но это усложняет анализ сигналов и поэтому в

большинстве случаев не применяется на практике.

Построив график по дискретным значениям, считанным с датчика, можно получить график, близкий к исходному аналоговое сигналу. Для дальнейшей работы по восстановлению изображения важно определить точное время прихода сигнала, то есть первый момент, в который он пришел.

На рисунке 2 представлен типовой график значений, принимаемых уз-датчиком. Красная точка обозначает фактическое время прихода сигнала. На рисунке 3 — изображен его приближенный вариант.

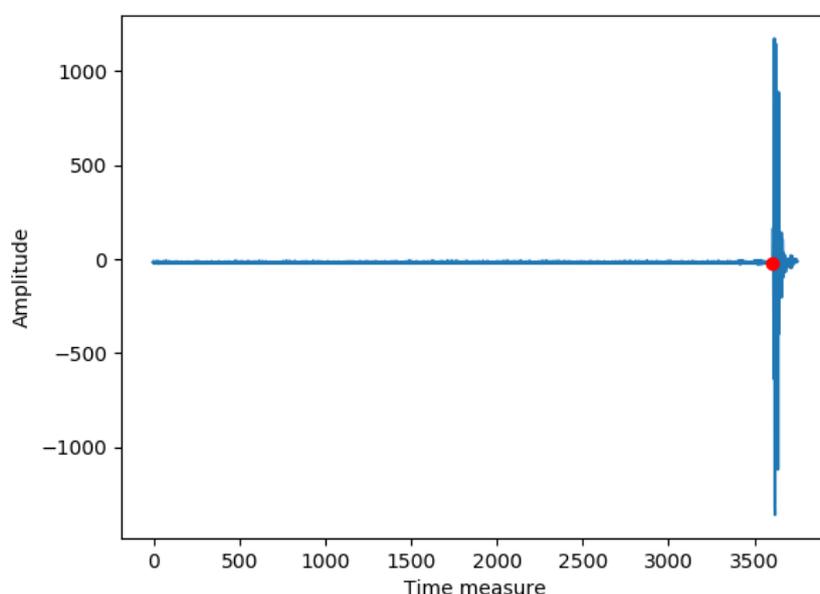


Рис. 2: Типовой график значений на уз-датчике

Существует несколько различных способов определения ТОФ, рассмотрим подробно наиболее известные из них.

1.4.1. Определение ТОФ вручную

В этом методе предлагается, что эксперты самостоятельно выбирают время прихода сигнала, основываясь на графиках, построенных по информации с датчиков. Ручное определение ТОФ не применимо в рассматриваемой задаче, так как при росте количества датчиков в кольце

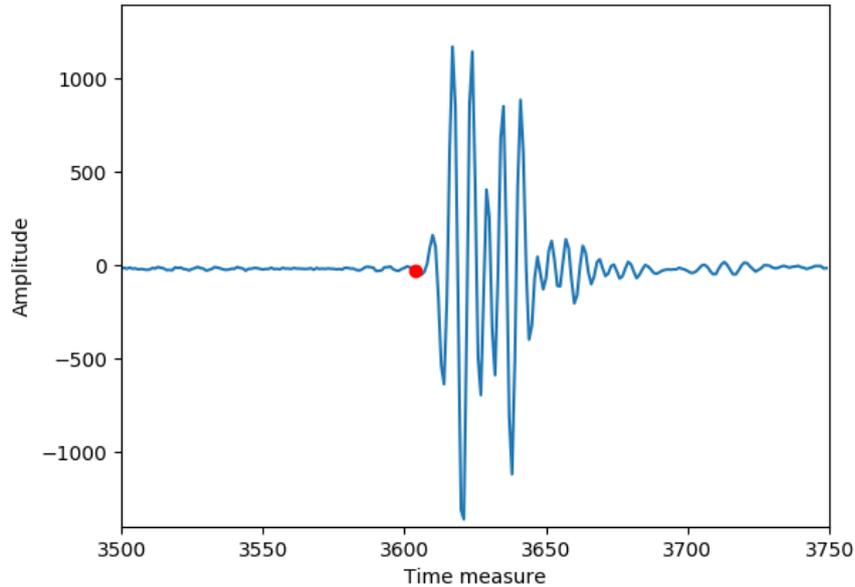


Рис. 3: Типовой график значений на уз-датчике (приблизенно)

и необходимых срезов, количество графиков, которые нужно проанализировать экспертам, значительно возрастает. Тем не менее, единичные вычисления ручным способом полезны в дальнейшем для оценки качества работы автоматических алгоритмов.

1.4.2. Сравнение с эталонным сигналом

При сравнении сигнала с эталонным предполагается, что перед началом исследования известна эталонная форма волны. Задается мера схожести сигналов и временем прихода считается тот момент, в который был достигнут максимум этой меры [5].

1.4.3. Вычисление ТОФ по пороговому значению

В этом подходе заранее выбирается пороговое значение шума. Далее просматриваются все показания датчика и момент, в котором было превышено пороговое значение, считается временем прихода сигнала. Этот подход хорошо работает в том случае, когда шум данных сильно меньше сигнала и сигнал хорошо различим визуально. В качестве

порогового значения может быть взято значение максимальной амплитуды, присутствующее в данных с датчика. При применении данного метода необходимо учитывать, что он позволяет определять лишь относительное время прихода сигнала, а не абсолютное, так как максимальная амплитуда достигается не в первый момент прихода сигнала. Так, например на рисунке 4 синим цветом обозначено время прихода максимальной амплитуды, а красным – время прихода сигнала.

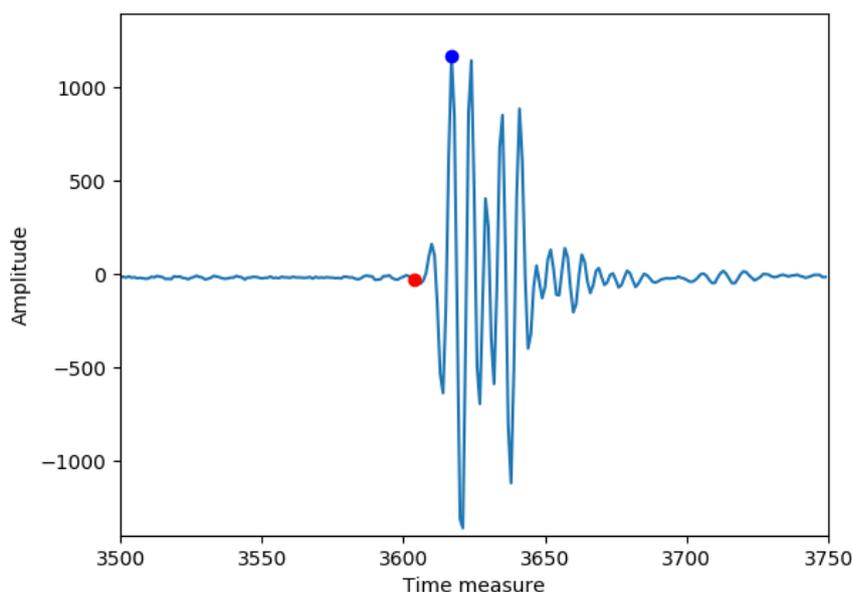


Рис. 4: Время прихода максимальной амплитуды (красным) и ТОФ (синим)

1.4.4. Информационный критерий Акаике

Метод информационного критерия Акаике для поиска времени прихода акустических сигналов основывается на предположении, что показания датчиков в пределах некоторого окна могут быть разделены на два промежутка времени: до прихода сигнал и после [6]. На входе методу подается временное окно, в пределах которого будет проводиться поиск ТОФ. В пределах этого окна для каждого показания k , при $k = 1, \dots, N$, где N – количество показаний в окне, производится расчет

AIC по следующей формуле:

$$AIC(k) = k * \log(\text{var}(S(1, k))) + (N - k - 1) * \log(\text{var}(S(k + 1, N))) \quad (1)$$

$S(1, k)$ и $S(k+1, N)$ -- это сегменты, полученные разбиением точкой k . Функция $\text{var}()$ имеет следующий вид:

$$\text{var}(S(i, j)) = \delta_{j-1}^2 = 1/(j - 1) * \sum_{l=i}^j (S(l, l) - \bar{S})^2, i \leq j; i, j = 1..N, \quad (2)$$

\bar{S} – среднее значение $S(i, j)$ – сигнала на промежутке от i до j . Точка минимума AIC выбирается в качестве искомого TOF.

1.5. Построение карты плотностей

Построенная карта плотностей должна отображать расположение объектов в исследуемой области, а кроме того указывать их среднюю плотность. Различные плотности могут быть раскрашены разными цветами, чтобы при просмотре сразу было понятно распределение плотностей.

1.5.1. Решение систем линейных уравнений

В решении подобных задач довольно распространен метод решения систем линейных уравнений. Для полного восстановления карты плотностей должны быть вычислены параметры исследуемой среды. Время прохождения УЗ сигнала может быть выражено при помощи уравнения $Y = A * X$, где X – вектор, равный скорости сигнала в пикселе. Вектор X строится по изображению слоя.

$$A_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если сигнал между } i\text{-ой парой датчиков проходит} \\ & \text{через пиксель } j, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Для начала работы необходимо вычислить координаты всех дат-

чиков. После этого для каждого датчика и парных с ним других 10 датчиков строится уравнение прямой. На следующем шаге, используя уравнение прямой и перебирая одну из координат пикселя, вычисляются его возможные вторые координаты таким образом, что прямая будет пересекать пиксель.

Вычислив значение матрицы A и вектора Y , можно вычислить $X1$ при помощи метода наименьших квадратов.

$$X1 = (A^T * A)^{-1} * A^T * Y. \quad (3)$$

Построение изображения большого изображения при помощи такого метода требует большого объема вычислительных ресурсов и времени работы.

1.5.2. Рандомизированный алгоритм

В работе [10] было предложено использовать технику "Опознация со сжатием" для решения подобного рода задач. В работе было предложено несколько способов проектирования матрицы измерений, а так же предложен алгоритм реконструкции сигналы, которые нужны для использования метода "Опознаение со сжатием". Ниже представлены предложенные способы проектирования матрицы измерений:

1. Базовый способ: матрица равновероятно заполняется 3 различными числами. Для этого способа необходимы все данные с датчиков.
2. Способ равновероятного отсева данных: значения части случайных столбцов обнуляется.
3. Способ с отсевом проекций: фиксируются датчики и все значения в столбцах, в которых этот датчик был принимающим, обнуляются.
4. Способ точечного выбора данных: в каждой строке остается один ненулевой коэффициент, а все ненулевые коэффициенты равны между собой.

Реконструкция производилась методом сопряженных градиентов.

Метод показал отличные результаты при моделировании на мало-масштабной модели и позволил сократить используемый объем данных с аппарата до 68%. Однако при увеличении количества датчиков работоспособность алгоритма заметно ухудшается [1].

1.5.3. BFGS метод

В настоящее время активно применяется метод BFGS. BFGS – это итерационный метод численной оптимизации, который относится к классу квазиньютоновских методов. Его отличие от ньютоновских методов выражается в том, что нет необходимости вычислять частные производные второго порядка, так как гессиан функции не вычисляется напрямую. Вычисления производятся приближенно. Назначение алгоритма заключается в том, чтобы находить локальный максимум или минимум нелинейного функционала без ограничений.

1.6. Среда исполнения и визуализации процесса восстановления особых областей

В ходе работы частой задачей стояла построение различного рода графиков для проверки гипотез. Необходимо было найти средство удобной визуализации построенных графиков для их последующего анализа. Важно отметить, что в основном особый интерес представляли определенные виды графиков такие, как график максимальных амплитуд или времени их прихода. Набор таких функций постепенно дополнялся и запускался на различных экспериментальных данных. Так как общий объем экспериментальных данных превышал 500Гб, хотелось уметь запускать вычисление и визуализацию графиков непосредственно на сервере для того, чтобы избежать копирования информации.

Помимо анализа имеющихся данных необходимо было сравнивать различные результаты работы алгоритма. Процесс восстановления слоя состоит из нескольких этапов: подсчет времени прихода сигнала, вычисление карты препятствий, вычисление карты плотностей. В работе рас-

сматривались различные реализации каждого из этапов при том, чтоб вид входных и выходных параметров не зависит от реализации этапа. Необходимо было найти удобную систему, которая позволила бы:

- Выбрать, какую из реализаций использовать для конкретного этапа
- Выбрать, для какого эксперимента необходимо провести восстановление
- Отобразить результат восстановления особых областей

1.6.1. Jupiter Notebook

Для визуализации программ, написанных на языке Python широко используется приложение Jupiter Notebook. Jupiter Notebook – это веб-приложение с открытым исходным кодом, которое позволяет хранить в одном файле программный код, комментарии, графики, формулы и изображения. Формат файлов `.ipynb` позволяет исполнять код программы и выводить его результаты непосредственно в одном файле с исходным кодом, что заметно облегчает анализ полученных результатов. Кроме того, отдельным блокам файла можно задавать ограничение на входные и выходные параметры блоков, а так же вызывать из них функции, хранящиеся в других `.py` файлах.

1.6.2. DSM-платформа для диаграммных языков

Диаграммный исполнитель, представленный в работе, является веб-решением, позволяющим решать следующие проблемы:

- Строить диаграмму исполнения программы из конечного набора функций GUI-интерфейсе
- Визуализировать процесс исполнения диаграммы
- Отображать результат исполнения диаграммы

Помимо этого, очевидным преимуществом системы является возможность задания в графическом интерфейсе параметров функций.

2. Алгоритм распознавания особых областей

Процесс восстановления структуры объекта производится послойно, для этого кольцо устанавливается на разных уровнях для получения срезов объекта. На каждом уровне первый датчик испускает сигнал, все остальные датчики, включая первый, принимают его в течении 3750 тактов. Процедура повторяется для каждого испускающего датчика. Схематичное представление кольца с датчиками показано на рисунке 5. Возле датчика №512 расположен объект, положение и среднюю плотность которого необходимо восстановить.

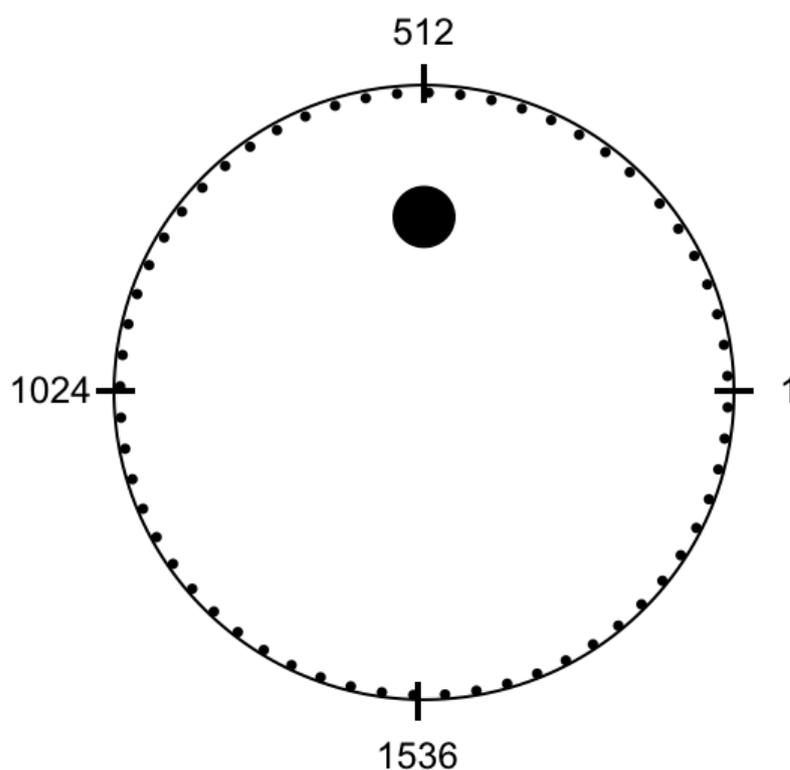


Рис. 5: Схематичное представление кольца датчиков и объекта

В исследовании использовались данные, полученные с описанного аппарата. В качестве объекта выступал шар, который помещали в аппарат. Эксперименты различались между собой расположением шара, а так же его размером. Типовые расположения представлены на рисунках 6 – 10. Диаметр шара варьировался от 1 до 5 см. Во всех экс-

периментах принимающие датчики включались только на такте №80 и после этого слушали в течение 3750 тактов. Для удобства в дальнейшем такт №80 будет считаться первым, если не оговорено иное. Помимо этого, рассматривались эксперименты, где не было объекта, а была только вода.

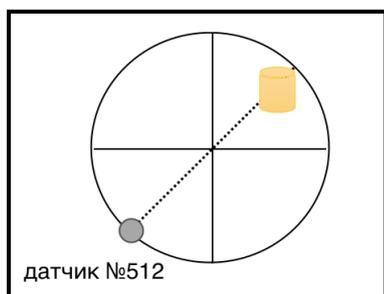


Рис. 6: Позиция А

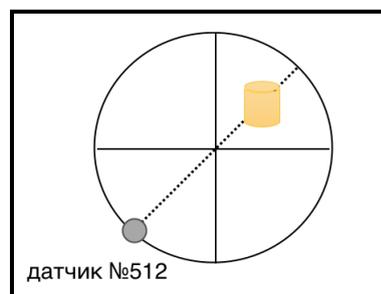


Рис. 7: Позиция В

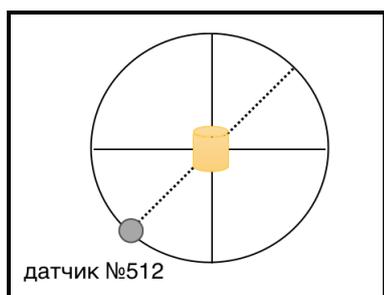


Рис. 8: Позиция С

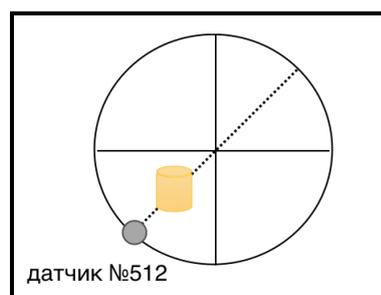


Рис. 9: Позиция D

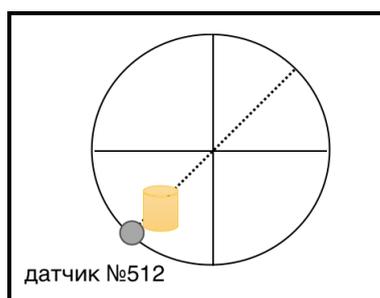


Рис. 10: Позиция Е

На графике 11 представлен типовой график показаний принимающего датчика. Как можно заметить, измеряемые значения до прихода сигнала не являются константными и незначительно меняются. В связи

с этим возникают дополнительные сложности в определении времени прихода сигнала.

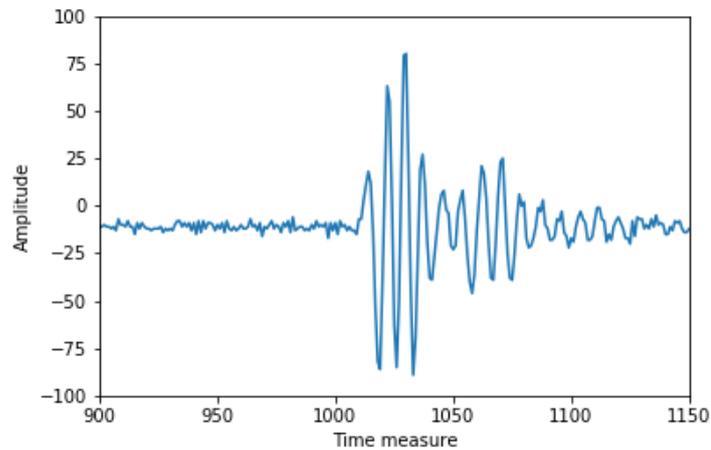


Рис. 11: Типовой график значений на одном датчике

Из графика 11 видно, что время прихода максимальной амплитуды находится позже, чем время прихода сигнала, следовательно не может использоваться напрямую в качестве значения ТОФ. Тем не менее, графики, построенные на основе значений максимальных амплитуд, а также времени их прихода может показывать относительные характеристики сигналов на разных датчиках.

В том случае, когда на пути у сигнала присутствует объект, часть лучей преломляется в объекте и проходит его насквозь, часть лучей отражается от объекта, а еще часть, преломившись на входе в объект, отражаются от другой его стенки. В этом случае могут быть датчики, на которых будут зарегистрированы все три типа сигналов. Необходимо отметить, что при описанном строении аппарата отраженный сигнал всегда приходит после прямого сигнала. Для более точного восстановления карты препятствий и плотностей необходимо уметь обнаруживать как прямые сигналы, так и отраженные.

Для дальнейшей работы были выдвинуты и проверены на экспериментальных данных следующие предположения:

- Амплитуда сигнала зависит от угла распространения сигнала. В

случае отсутствия объекта в противоположный датчик приходит сигнал с большей амплитудой, чем в близлежащий.

- Скорость распространения сигнала не зависит от угла распространения.
- Отраженный сигнал (если присутствует) приходит после прямого сигнала при описанном строении аппарата.
- При прохождении через объект изменяется амплитуда сигнала.

Рассмотрим график значений максимальных амплитуд на рисунке 12. Так как сам объект находится возле датчика №513, при испускании сигнала из первого датчика только лучи, идущие в датчики, близкие к датчику №513, пройдут через объект. На графике явно прослеживаются 3 пика: самый большой по значению амплитуды сигнал приходит в противоположный от испускающего датчик, справа и слева от противоположного видны два пика с меньшей амплитудой.

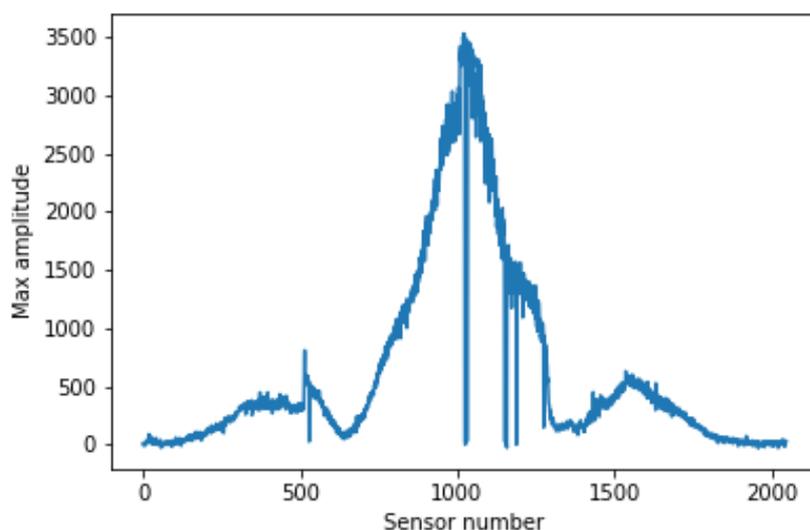


Рис. 12: График значений максмальных амплитуд при испускании сигнала из датчика №1

На графике видны несколько точек, в которых значения максимальных амплитуд равны нулю, хотя соседние с ними значения имеют большие показания амплитуд. Подобные явления означают, что датчик по

какой-то причине не снимал показания в этом эксперименте, возможно, потому что был неисправен. Подобных измерений сравнительно мало и они не влияют на общее восстановление изображения, поэтому ими можно пренебречь.

Рассмотрим теперь график значений максимальных амплитуд при испускании сигнала из датчика №513. На рисунке 13 представлен такой график, сдвинутый на 513 значений влево для того, чтобы нумерация датчиков начиналась от датчика №513, что позволит сравнить его с графиком на рисунке 12.

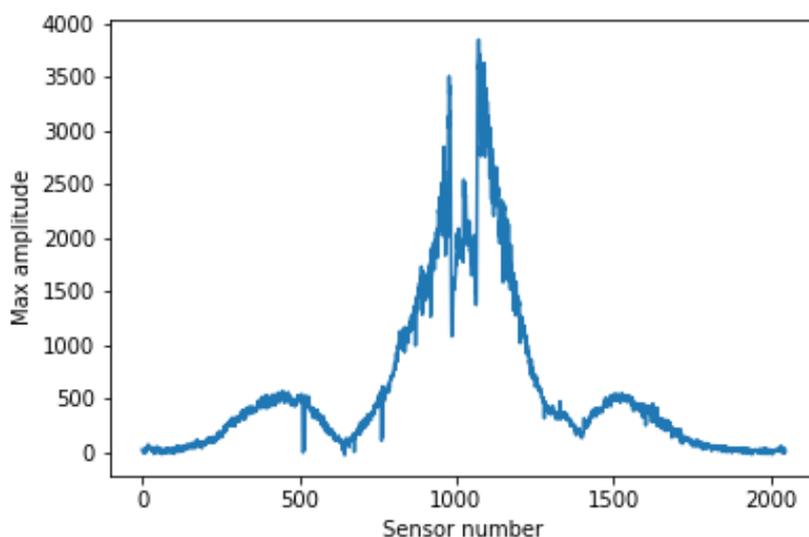


Рис. 13: График значений максимальных амплитуд при испускании сигнала из датчика №513, сдвинутый на 513 значений влево

Сравнение двух графиков иллюстрирует, что при прохождении сигнала через объект его амплитуда уменьшается. Из графика 13 видно, что значение максимальной амплитуды достигается теперь не в противоположном от испускающего датчике, но два небольших пика по краям сохранились. Необходимо отметить, что хотя в датчиках, расположенных напротив испускающего, теперь не достигается абсолютный максимум амплитуды, однако там повторяется форма пика и присутствует локальный максимум значения амплитуды. Таким образом, возможно определить максимальную амплитуду из всех сигналов, прошедших

через объект.

На рисунке 14 представлен график, показывающий номер такта, когда в датчиках достигалась максимальная амплитуда. Легко заметить, что график представляет собой параболу. Через каждые 256 датчиков на графике можно увидеть небольшие скачки, это обусловлено наличием 8 пустых датчиков через каждые 256 датчиков.

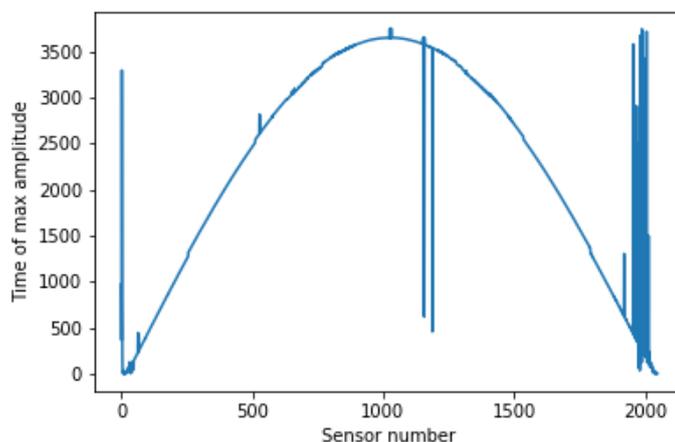


Рис. 14: График тактов прихода максимальных амплитуд при испускании сигнала из датчика №1

На рисунке 15 представлен аналогичный график времени прихода максимальных амплитуд для датчиков при испускании сигнала из датчика №513, график так же сдвинут на 513 значений влево для удобства сравнения.

Представленный график так же имеет форму параболы и на первый взгляд мало отличается от предыдущего. Различия в графиках становятся заметны при приближении области датчиков, расположенных на противоположной стороне от испускающих. На рисунке 16 представлена увеличенная версия графиков времени прихода максимальных амплитуд. Синий график соответствует испусканию сигнала из датчика №1, оранжевый – из датчика №513.

Из графика на рисунке 16 видно, что сигнал, прошедший через объект, пришел быстрее. Таким образом на основании сравнения ожидаемого и фактического времени прихода сигнала можно делать вывод,

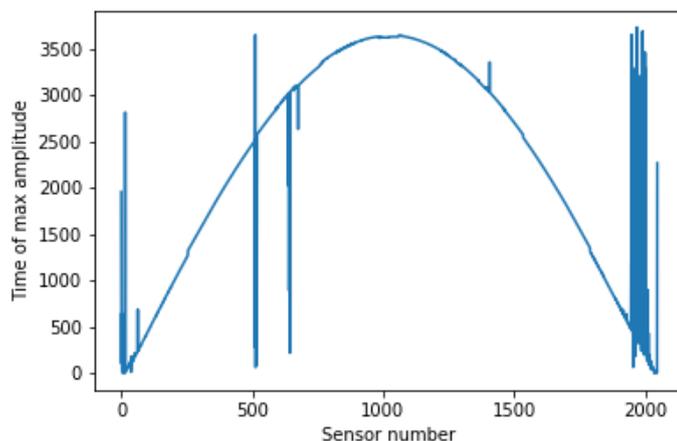


Рис. 15: График тактов прихода максимальных амплитуд при испускании сигнала из датчика №513, сдвинутый на 513 тактов

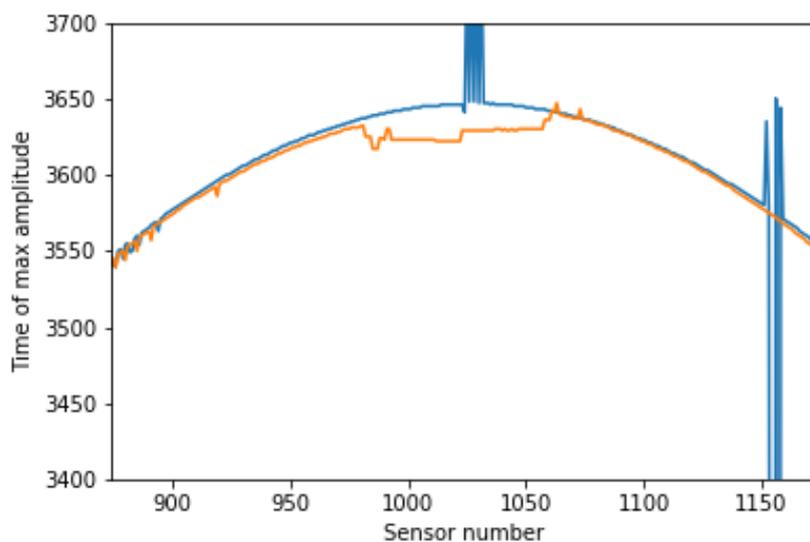


Рис. 16: График тактов прихода максимальных амплитуд при испускании сигнала из датчика №1 (синий график) и датчика №513 (оранжевый)

прошел ли сигнал через объект другой плотности.

2.1. Нахождение ТОФ

Для вычисления времени прихода сигнала было решено использовать метод Акаике, так как при правильно указанном окне он позволяет точно находить необходимое значение. Основной проблемой метода является выбор ширины окна и позиции его начала.

При анализе графиков было решено, что оптимальная ширина окна равняется 120 тактам, так как в большинстве случаев сигнал имеет ровно такую продолжительность. В работе [8] подробно представлен алгоритм работы. Из графика на рисунке 17 видно, что в качестве центра окна для метода Акаике может быть использовано время прихода максимальной амплитуды, так как оно расположено близко к истинному времени прихода сигнала. Однако, у этого метода существуют определенные ограничения.

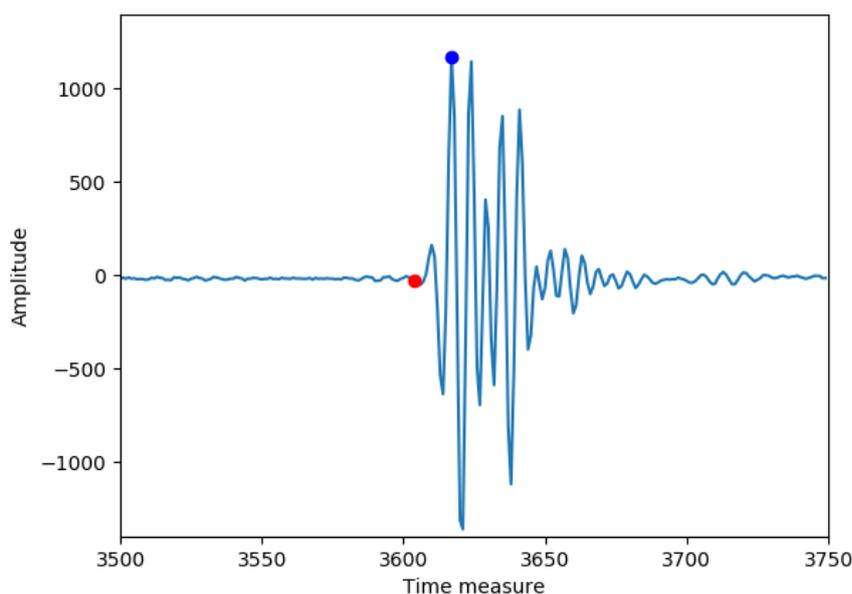


Рис. 17: Время прихода максимальной амплитуды (красным) и ТОФ (синим)

Трудность заключается в том, что при достаточно большом размере объекта отраженный сигнал может иметь большую амплитуду, чем прямой сигнал. Подобная ситуация представлена на рисунке 18. В та-

ком случае при позиционировании центра окна в точке прихода максимальной амплитуды вместо прямого сигнала будет найден отраженный сигнал. Помимо этого, для задачи восстановления плотности объекта необходима информация не только о времени прихода прямого сигнала, но и обо всех отраженных сигналах, если они есть.

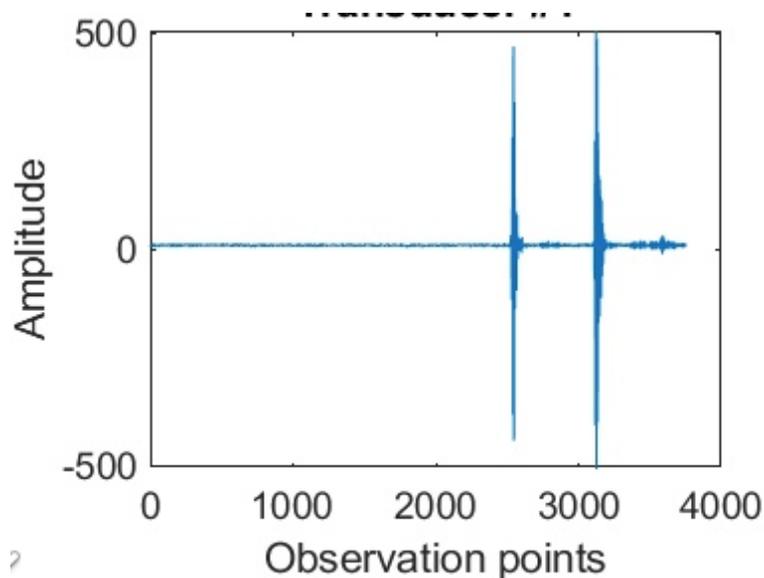


Рис. 18: График значений на одном из датчиков при объекте диаметром 5см

Другим способом установки окна является выбор в качестве центра окна точки ожидаемого времени прихода сигнала. Как видно из графика на рисунке 16, ожидаемое время прихода хоть и отличается от фактического, но разница не превышает половины ширины окна, а значит точка времени прихода сигнала попадет в окно, которые будет рассматриваться в методе Акаике. Этот способ, однако, обладает тем же недостатком, что и предыдущий – он позволяет найти только прямой сигнал, а отраженные сигналы будут потеряны.

Альтернативным методом выбора временного окна является подсчет дисперсии в различных интервалах значений датчика. В этом случае повышение значения дисперсии будет свидетельствовать о начале нового сигнала, а понижение – об окончании. Описанный метод будет способен обнаружить все имеющиеся на графике сигналы. Основной проблемой метода является длительное время, необходимое на все рас-

четы, однако существуют модификации алгоритма, которые позволяют существенно сократить время вычисления.

2.2. Построение карты препятствий

Как уже говорилось ранее, скорость распространения сигнала зависит от физических свойств среды. Так, например, зная ожидаемое время прихода от одного датчика к другому и сравнив его с фактическим временем прихода сигнала, можно сделать вывод, был ли на пути прохождения сигнала объект другой плотности [3], [2]. Именно это соображение легло в основу алгоритма восстановления карты препятствий.

Необходимо рассмотреть все пары испускающих и принимающих датчиков и проверить, соответствует ли время прихода сигнала ожидаемому. Если нет, то все точки, лежащие на этой прямой, потенциально могут относиться к объекту другой плотности. После рассмотрения всех пар датчиков значения в пикселях будут тем больше, чем больше вероятность наличия объекта в этой области. Далее необходимо задать порог значение в пикселе выше которого будет означать точное наличие объекта в этом пикселе.

Полный алгоритм восстановления карты препятствия выглядит следующим образом:

1. Задать массив значений пикселя восстановленного изображения, заполнить его нулями
2. Выбрать испускающий датчик, который еще не рассматривался
3. Для всех принимающих датчиков сравнить ожидаемое время прихода сигнала и фактическое
4. В случае, если время различается более чем на заранее заданную константу, увеличить значение пикселей, лежащих на прямой между испускающим и принимаемым датчиком с помощью алгоритма Брезентхема
5. Повторить шаги 2–4 для всех испускающих датчиков

6. Во всех пикселях провести отсечение по заранее определенному порогу

Работа алгоритма была подробнее представлена на конференции СПИСОК [11].

Описанный выше алгоритм обладает существенным недостатком: уровень закрашенности пикселей возле испускающего датчика был заметно выше, чем возле принимающих. Это объясняется тем, что чем дальше сигнал отошел от объекта, тем сильнее расходятся его лучи, а на начальном этапе они перекрывают друг друга. Для решения этой проблемы была предложена модификация алгоритма. Для этого потребовалось завести дополнительный массив для хранения информации. Основной задачей было не инкрементировать значение пикселя, если оно уже было инкрементировано при рассмотрении того же самого испускающего датчика. Таким образом, если фактическое и ожидаемое время прихода между датчиками различается, то значения всех пикселей на прямой проверяются в массиве. Если значение в этом пикселе уже инкрементировалось на этом этапе, то ничего не происходит. Иначе, значение пикселя инкрементируется.

2.3. Построение карты плотностей

2.3.1. При падении луча под произвольным углом

На рисунке 19 вектора (\vec{AN}, \vec{NR}) показывают траекторию отраженного луча, а вектора $(\vec{AN}, \vec{NM}, \vec{MB})$ – преломленного луча.

Для нахождения плотности объекта необходимо выполнить следующие шаги:

- Необходимо вычислить точку, в которой луч отразился от объекта. Для этого перебираются все закрашенные точки объекта из карты препятствий. Зная среднюю скорость распространения сигнала в среде, а так же длину отрезков AN и NR, выбирается та точка, для которой фактическое время прихода сигнала ближе всего к ожидаемому.

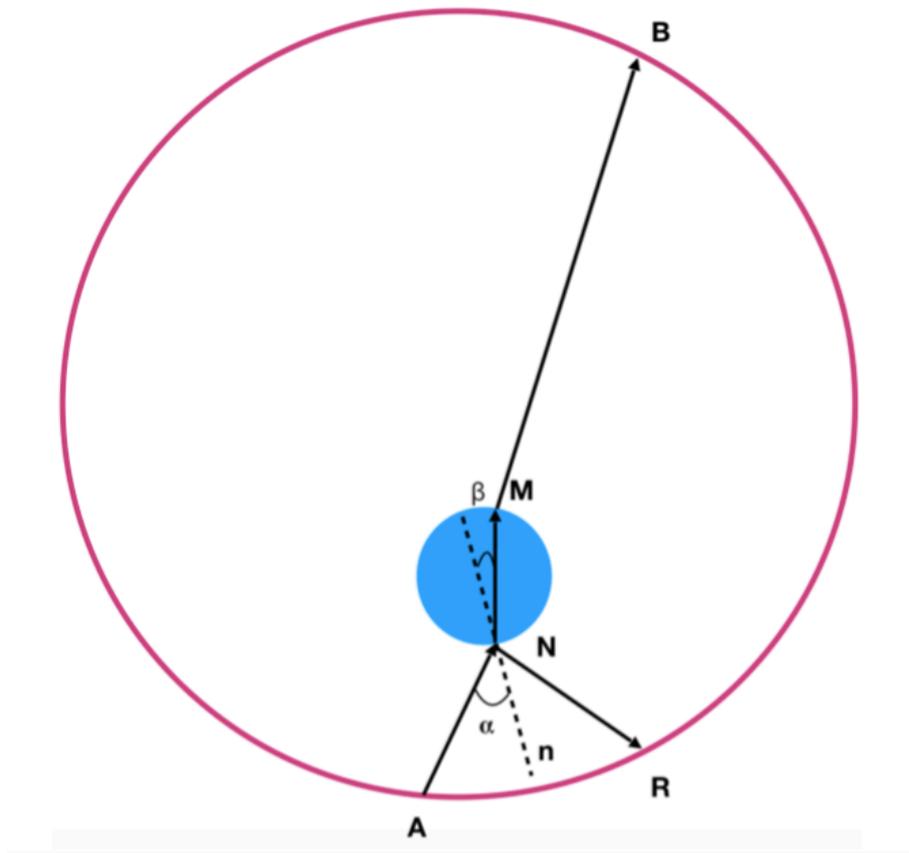


Рис. 19: Траектория отраженного и преломленного сигнала

- Затем необходимо произвести перебор возможной плотности объекта.

Согласно закону Снеллиуса:

$$C * \sin\beta = C_{water} * \sin\alpha \quad (4)$$

где C - скорость звука в особой области, C_{water} - скорость звука в воде.

Равенство (4) даёт возможность вычислить угол β , по которому в дальнейшем строится вектор \vec{NM} . В результате этих действий будет получена вторая точка преломления M .

- Координаты точки B вычисляются на основании знания о расположении датчиков в кольце, это точка соответствует датчику, принимающему прямой сигнал. В качестве плотности будет вы-

брано то число, для которого выражение

$$\left| \frac{(\|\vec{AN}\| + \|\vec{MB}\|)}{C_{water}} + \frac{\|\vec{NM}\|}{C} - tof[a, b] \right|, \quad (5)$$

имеет минимальное значение. $tof[a, b]$ – время прохождения сигнала от датчика А до датчика В.

Подробное описание алгоритма представлено в работах [9], [11], [7]. Среднее значение плотности находится посредством усреднения значений, посчитанных с разных датчиков.

2.3.2. При падении луча под прямым углом

На рисунке 20 схематично представлено падения луча на объект под прямым углом. В этом случае угол отражения и угол преломления равны нулю, следовательно отраженный сигнал придет обратно в испускающий датчик, а прямой сигнал придет в прямо противоположный датчик. Диаметр кольца всегда постоянный и равен 22см, длина отрезка NM может быть найдена из построенной ранее карты препятствий. Зная скорость распространения сигнала на участках AN и MB и время прихода сигнала из точки А в точку В можно найти скорость распространения сигнала на участке NM. Посчитав такие плотности из разных позиций и усреднив полученные значения можно получить среднюю скорость распространения сигнала внутри объекта. По результатам над работой по описанным выше алгоритмам распознавания особых областей подана совместная статья к публикации [4].

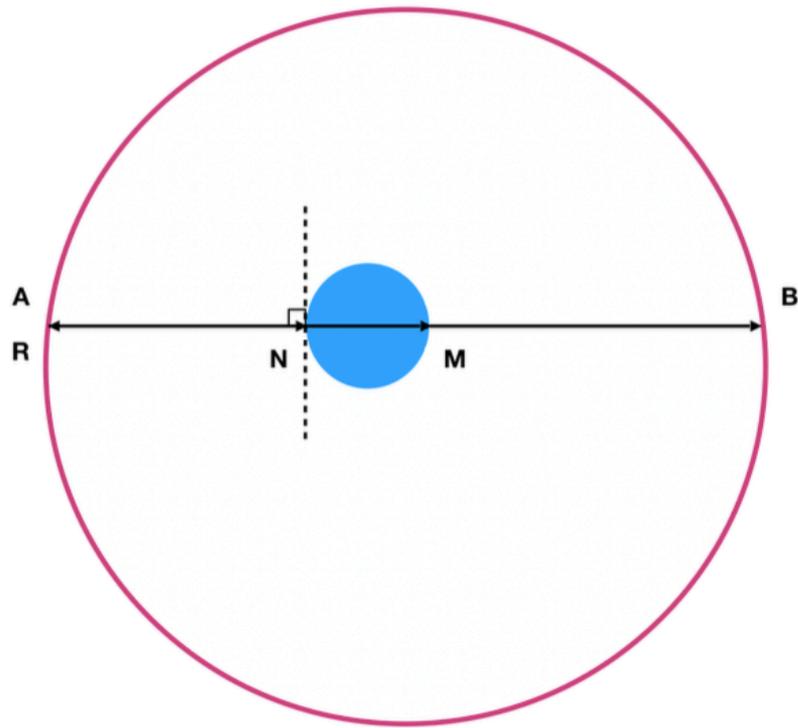


Рис. 20: Схематичное изображение падения луча под прямым углом

3. Описание прототипа системы

3.1. Архитектура и реализация

Архитектура прототипа системы представлена на рисунке 21.

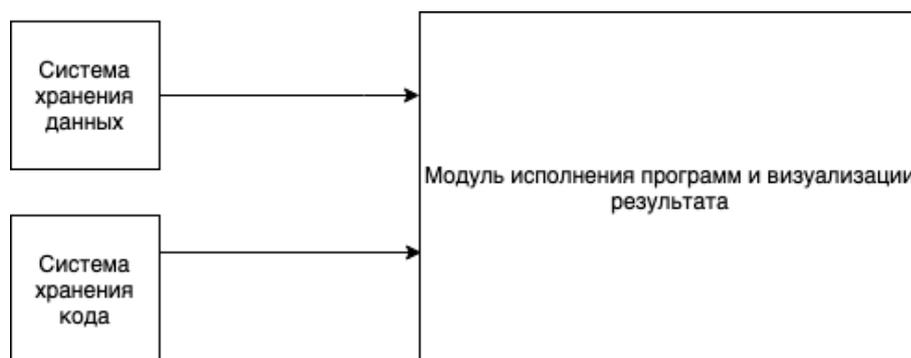


Рис. 21: Архитектура прототипа системы

Для реализации компоненты хранения данных был сконфигурирован FTP сервер. Туда были помещены данные экспериментов. Данные

одного эксперимента занимают 32Гб и разбиты по 4 файлам. Каждый эксперимент хранится в отдельной папке.

К серверу обеспечен не анонимный доступ, для подключения необходимо ввести логин и пароль пользователя. Помимо этого доступ обеспечен таким образом, что пользователи не могут подняться по каталогу выше той папки, к которой у них есть доступ, то есть папки с экспериментами.

Для хранения кода было решено настроить собственный git-сервер. Для подобной установки существуют специальные Docker-контейнеры. Docker – это программное обеспечение, которое позволяет автоматизировать процесс развертывания и управления приложениями. В таком контейнере находится приложение и все необходимое для него окружение и зависимости, кроме того он может быть перенесен практически на любую Linux-систему. Существуют соответствующие контейнеры для поднятия собственного git-сервера.

Для работы был выбран GitLab CE Docker image. Этот контейнер автоматически перезапускается после каждого запуска системы. В соответствии с изначальными настройками git-сервер будет доступен только на локальной машине, однако настройки можно поменять при помощи флага `-publish` в команде `sudo docker run` таким образом, чтоб сервер был доступен извне. Доступ возможен через протокол HTTP, HTTPS и SSH, порты для подключения 80, 443 и 22 соответственно. Возможно так же настроить дополнительно другие номера портов.

В качестве средства исполнения и визуализации построения процесса особых областей было решено использовать DSM-платформу для диаграммных языков. На рисунках 22, 22 показан пример работы платформы.

На рисунке 22 в панели ExecutionPanel отображается процесс выполнения построенной диаграммы. После выполнения каждого из этапов можно посмотреть его результат, нажав на знак карандаша. Из рисунка видно, что идет процесс восстановления изображения, в окне Output показан процент выполненных действий так, что можно следить за прогрессом выполнения. На рисунке 23 показан результат работы блока по

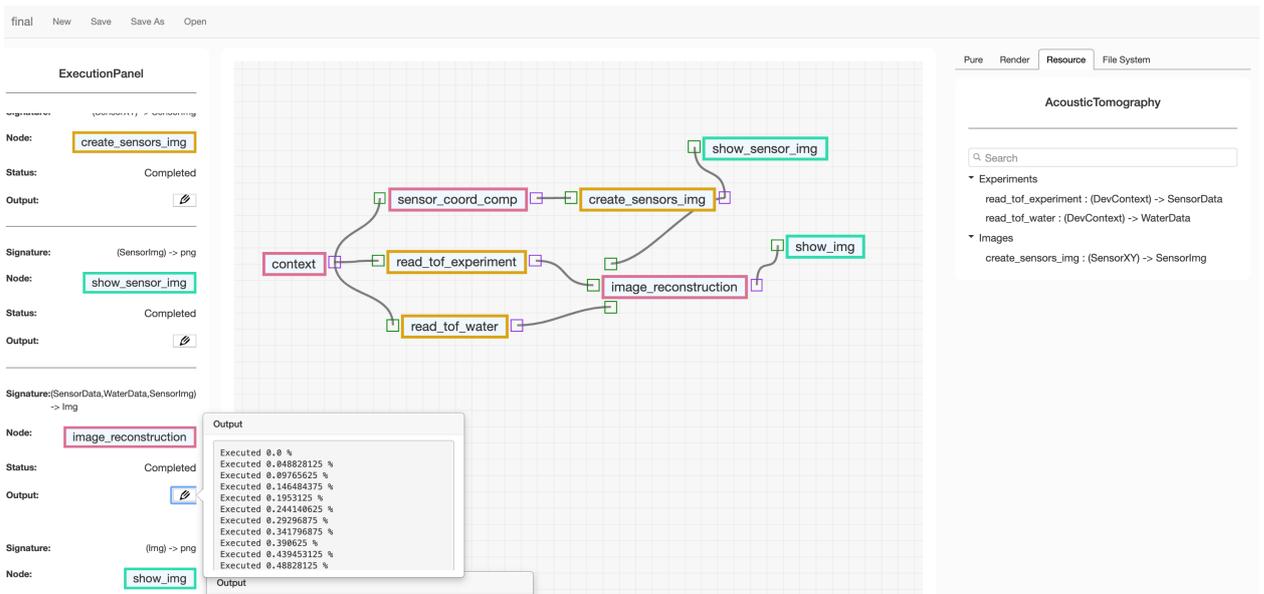


Рис. 22: Пример исполнения программы при помощи DSM-платформы
восстановлению карты препятствий.

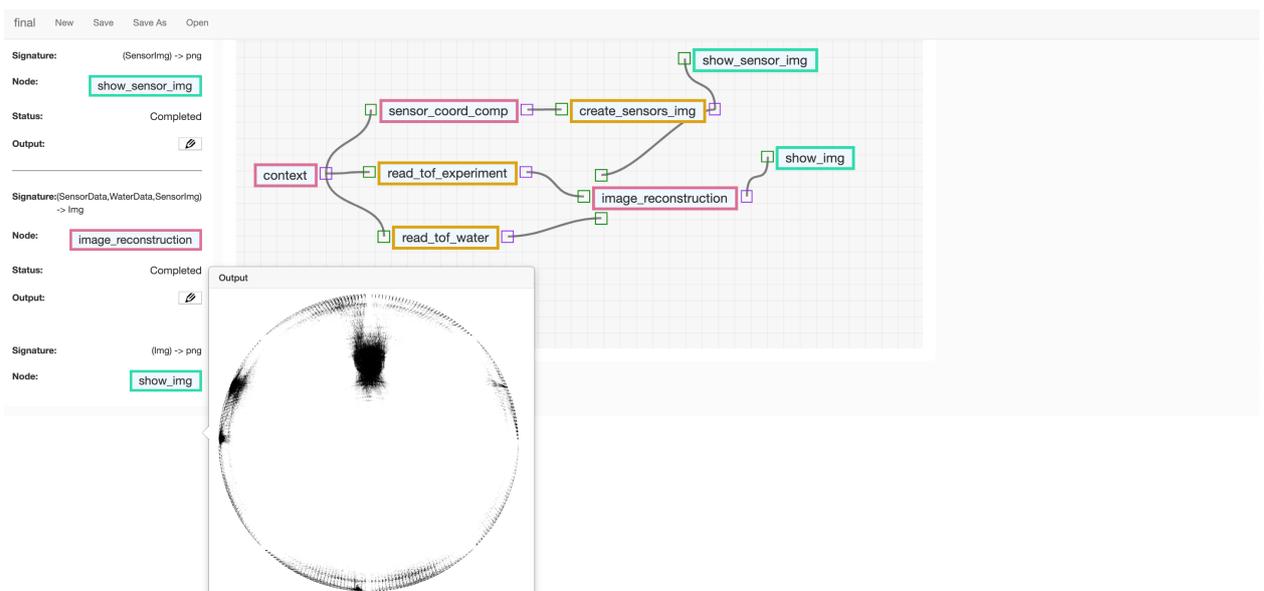


Рис. 23: Визуализация результата восстановления особых областей

На рисунке представлена диаграмма взаимодействия компонент программы.

Компонента вычисления эталонных TOF служит для подсчета ожидаемого времени прохождения сигнала между всеми парами датчиков. Эти значения могут быть вычислены несколькими способами:

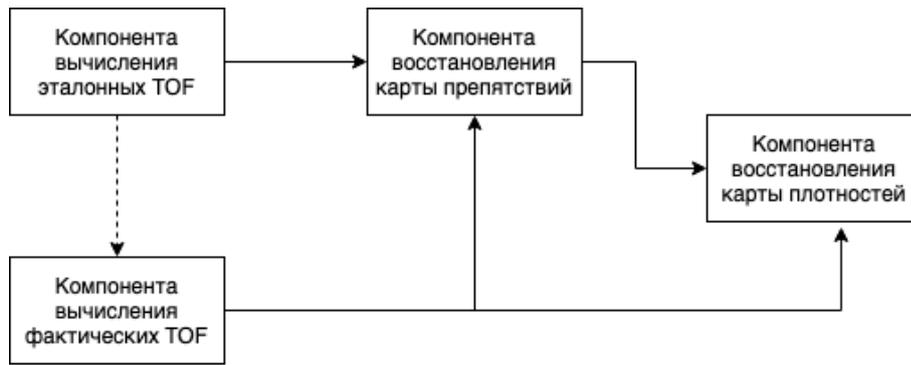


Рис. 24: Визуализация результата восстановления особых областей

- На основе данных эксперимента, в котором объект отсутствует
- На основе знания о скорости распространения звука в среде и расстоянии между датчиками

Компонента вычисления фактических TOF требуется для того, чтобы найти фактическое время прихода сигнала в датчики в тех экспериментах, где присутствует объект. В этой компоненте для вычисления TOF используется метод Акаике, в качестве центра окна могут быть взяты как эталонные значения TOF, так и время прихода максимальной амплитуды сигнала.

Компонента восстановления карты препятствий использует знание об эталонном и фактическом времени прихода сигнала. При поочередном сравнении этих значений производится закрашка тех областей, в которых значения различаются более чем на какое-то заданное значение. Эти области потенциально могут содержать объект. После рассмотрения всех пар датчиков каждый пиксель будет иметь различный уровень закрашенности, что будет соответствовать вероятности нахождения объекта в этом пикселе. После этого происходит отсечение по порогу закрашенности пикселей.

Компонента восстановления карты плотностей на данный момент работает в полуавтоматическом режиме так как опирается на знание о перпендикулярном падении луча. Зная время прихода сигнала, границы объекта и скорость распространения звука в воде происходит вычисление скорости звука в объекте. Значения, полученные с нескольких

датчиков, усредняются для получения итогового результата.

3.2. Апробация

На рисунке 25 представлен пример восстановления карты препятствий, проведенный на $1/8$ части данных одного эксперимента, то есть излучал сигнал только каждый восьмой датчик, а принимали сигнал все датчики. Время прихода сигнала было найдено при помощи метода Акаике с позиционированием центра окна в точке максимальной амплитуды сигнала. Видно, что положение объекта определено правильно и форма объекта достаточно соответствует истинной.

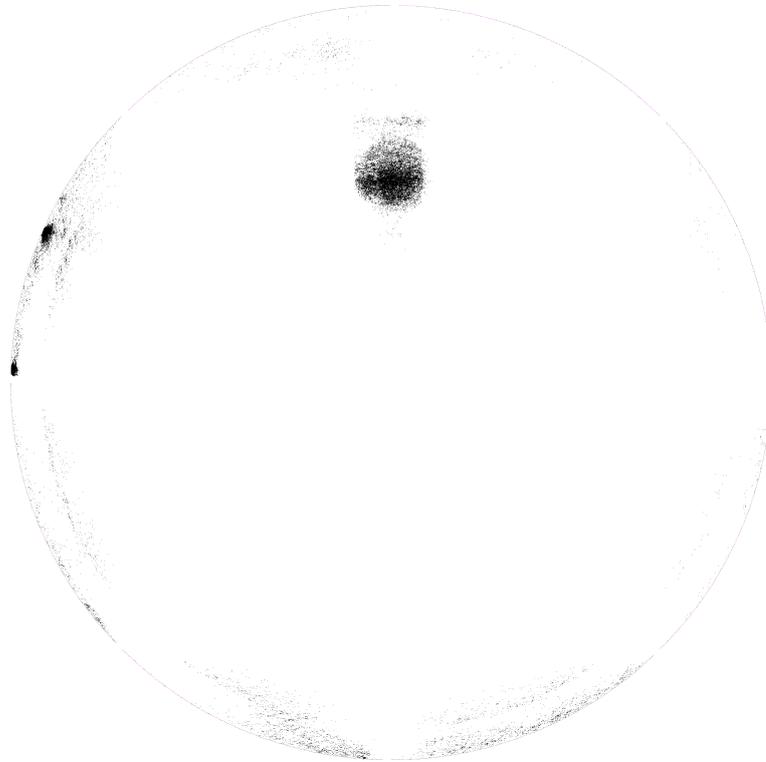


Рис. 25: Пример изображения, восстановленного по $1/8$ части исходных данных

Ниже приведен результат работы компоненты восстановления скоростей для 4 экспериментов, где объекты имеют различный размер и расположение.

1. Объект имеет диаметр 5см. Расположение объекта соответствует рисунку 26.

Результаты вычислений представлены в таблице 2.

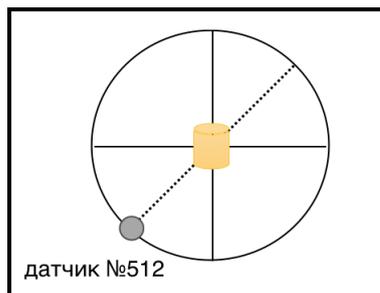


Рис. 26: Позиция С

Таблица 2: Рассчитанное значение скорости звука в объекте

Испускающий датчик	Принимающий датчик	Скорость звука в объекте
15	1039	1609.33264
33	1057	1607.26334
1000	2024	1609.33264
1700	676	1609.33264

2. Объект имеет диаметр 5см. Расположение объекта соответствует рисунку 28.

Результаты вычислений представлены в таблице 3.

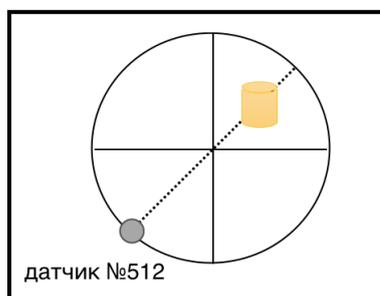


Рис. 27: Позиция В

3. Объект имеет диаметр 2см. Расположение объекта соответствует рисунку 28. Результаты вычислений представлены в таблице 4.

Таблица 3: Рассчитанное значение скорости звука в объекте

Испускающий датчик	Принимающий датчик	Скорость звука в объекте
513	1537	1632.451629
510	1534	1607.26334
511	1535	1611.407274

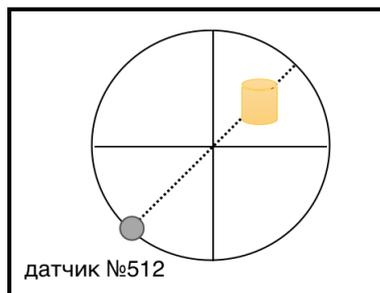


Рис. 28: Позиция В

Таблица 4: Рассчитанное значение скорости звука в объекте

Испускающий датчик	Принимающий датчик	Скорость звука в объекте
511	1535	1685.3745091
514	1538	1630.4172361
513	1537	1619.8530905

4. Объект имеет диаметр 2см. Расположение объекта соответствует рисунку 29. Результаты вычислений представлены в таблице 5.

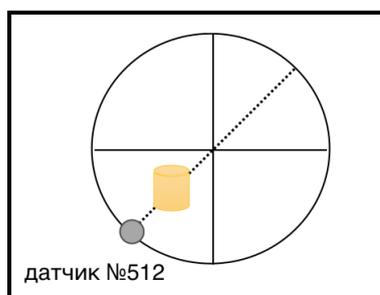


Рис. 29: Позиция В

Таблица 5: Рассчитанное значение скорости звука в объекте

Испускающий датчик	Принимающий датчик	Скорость звука в объекте
1537	513	1619.8530905
1538	514	1614.622189
1535	511	1651.9643655

Как видно из полученных значений, значение плотности меняется, но несущественно. Среди полученных значений присутствуют выбросы как, например, в эксперименте 2В, когда испускал датчик №511, а принимал датчик №1535. Такие случаи обусловлены искажением в вычислении времени прихода сигнала. Так как такие выбросы встречаются редко, это не повлияет на нахождение средней плотности объекта.

Заключение

В рамках работы были проанализированы экспериментальные данные и проверены их свойства. Была разработана архитектура системы восстановления особых областей и реализован ее прототип. Была проведена апробация системы для восстановления карты препятствий и скоростей.

Список литературы

- [1] Erofeeva Victoria, Granichin Oleg, Senin Ivan. Modifying the physical process of ultrasound tomography scanning through compressive sensing // *Cybernetics and Physics*. — 2018. — Vol. 7, no. 2. — P. 66–71.
- [2] Frequency domain ultrasound waveform tomography: breast imaging using a ring transducer / GY Sandhu, Cuiping Li, O Roy et al. // *Physics in Medicine & Biology*. — 2015. — Vol. 60, no. 14. — P. 5381.
- [3] In vivo breast sound-speed imaging with ultrasound tomography / Cuiping Li, Nebojsa Duric, Peter Littrup, Lianjie Huang // *Ultrasound in medicine & biology*. — 2009. — Vol. 35, no. 10. — P. 1615–1628.
- [4] Victoria Erofeeva Oleg Granichin Anna Leonova Vasilisa Galyamina Kseniya Gonta Vikentiy Pankov Munira Tursunova Mingyue Ding Ming Yuchi Mingyue Ding Ming Yuchi. DETECTION OF SPECIFIC AREAS WITH ULTRASOUND TOMOGRAPHY.— *PHYSCON 2019*, submitted, 2019. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25987086>.
- [5] Zhang Haijiang, Thurber Clifford, Rowe Charlotte. Automatic P-wave arrival detection and picking with multiscale wavelet analysis for single-component recordings // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2003. — Vol. 93, no. 5. — P. 1904–1912.
- [6] An improved automatic time-of-flight picker for medical ultrasound tomography / Cuiping Li, Lianjie Huang, Nebojsa Duric et al. // *Ultrasonics*. — 2009. — Vol. 49, no. 1. — P. 61–72.
- [7] А.В. Леонова. Нахождение точки прибытия акустического сигнала с максимальной амплитудой, прошедшего через неоднородную среду. — Конференция СПИСОК-2019, подана к публикации, 2019.

- [8] Галямина В.С. Вычисление времени прихода («Time Of Flight») акустических сигналов. — Конференция СПИСОК-2019, подана к публикации, 2019.
- [9] Панков В.Д. Определение угла отражения и точки выхода луча из объекта по изображению и заданных плотностях среды и объекта. — Конференция СПИСОК-2019, подана к публикации, 2019.
- [10] Сенин И.И. Рандомизированный алгоритм при обработке данных ультразвуковых исследований. — Стохастическая оптимизация в информатике, 2016. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25987086>.
- [11] Турсунова М.Б. Рандомизированный алгоритм при обработке данных ультразвуковых исследований. — Конференция СПИСОК-2019, подана к публикации, 2019.