

Санкт-Петербургский государственный университет

Кафедра системного программирования

Галямина Василиса Сергеевна

Вычисление времени прихода («Time Of Flight») акустических сигналов

Курсовая работа

Научный руководитель:
д. ф.-м. н., профессор Граничин О. Н.

Санкт-Петербург
2019

Оглавление

Введение	3
1. Постановка задачи	4
2. Обзор	5
2.1. Работа УЗИ-аппарата	5
2.2. Способы определения времени прихода сигнала	6
2.2.1. Определение момента прихода сигнала вручную .	6
2.2.2. Установление пороговых значений	6
2.2.3. Сравнение сигнала с эталонной волной	6
2.2.4. Информационный критерий Акаике	8
3. Описание реализации	9
3.1. Обработка данных	9
3.2. Выбор временного окна	9
4. Результаты экспериментов	11
Заключение	13
Список литературы	14

Введение

Работа посвящена исследованию способов определения времени прихода («Time Of Flight») акустических сигналов, в частности, ультразвуковых сигналов.

Ультразвуковое исследование является одним из наиболее распространённых методов медицинской визуализации. Оно широко используется при обследовании различных внутренних органов, плода у беременных женщин. В частности, УЗИ находит применение в диагностике рака молочной железы. Преимуществами ультразвуковых исследований являются доступность оборудования, безопасность для пациента, возможность получения изображения в режиме реального времени.

Вычисление времени прихода ультразвуковых сигналов в медицине необходимо для восстановления изображений тканей и дальнейшей диагностики заболеваний с их помощью.

В ходе работы использовались данные, полученные с помощью УЗИ-аппарата для диагностики рака молочной железы. Было проведено исследование существующих способов вычисления времени прихода сигналов, оценка их применимости, выбор из них оптимального способа и его программная реализация. Контроль качества нахождения времени прихода сигналов осуществлялся с помощью имеющихся данных показаний датчиков.

1. Постановка задачи

Целями работы являются:

- Провести исследование предметной области и обзор существующих способов определения времени прихода сигнала
- Разработать алгоритм обработки данных УЗИ-датчиков и вычисления времени прихода сигнала
- Провести эксперименты и замеры
- Оценить применимость разработанного алгоритма в реальных условиях

2. Обзор

2.1. Работа УЗИ-аппарата

Современные разработки аппаратов для диагностики рака молочной железы представляют собой кольцо из N равноудалённых друг от друга элементов (УЗИ-датчиков, принимающих и испускающих сигналы), где N может быть от сотни до нескольких тысяч [2] [3] [4]. Изображение получается путём перемещения этого кольца в вертикальном направлении. Результатом такого сканирования являются поперечные «срезы» тканей, из которых формируется 3D образ. Когда один элемент испускает сигнал, все другие элементы принимают сигналы, так что на восстановление одного «среза» приходится N^2 сигналов.

Процесс исследования проходит следующим образом: каждый из датчиков по очереди испускает сигнал, все датчики на протяжении фиксированного времени принимают сигнал. Данные, с помощью которых вычисляется время прихода сигнала на конкретный датчик, представляют собой показания на этом датчике в дискретные моменты времени.

Данные, с которыми производилась работа, были получены с помощью УЗИ-аппарата для диагностики рака молочной железы, в котором количество датчиков $N = 2048$, а показания на принимающих датчиках фиксируются на протяжении 3750 тактов с частотой 25 МГц.

В ультразвуковой томографии используются различные техники визуализации: reflection imaging (изображение, построенное с использованием отражённого сигнала), sound speed imaging (с использованием сквозного сигнала), attenuation imaging (с использованием затухания сигнала), а также их комбинации. Время прихода сигналов (сквозных и отражённых) используется для восстановления изображений.

В уплотнениях скорость распространения сигнала выше, чем в окружающей ткани, поэтому сигнал через такую область пройдёт быстрее, чем через однородную (без уплотнения). На основании таких «отклонений» во времени прихода сигналов в дальнейшем реализуется восста-

новление изображения.

2.2. Способы определения времени прихода сигнала

2.2.1. Определение момента прихода сигнала вручную

Для реализации такого метода экспертам необходимо просмотреть количество графиков, отражающих уровень сигнала на датчиках, равное $N^2 \cdot M$, где N – количество датчиков, M – количество горизонтальных срезов, и на каждом из них вручную определить время прихода сигнала. Даже при небольшом (около сотни) количестве датчиков этот метод является слишком затратным по времени и человеческим ресурсам. Тем не менее, сравнение с определенными таким образом временами прихода сигналов может быть полезно для дальнейшей оценки качества автоматических методов.

2.2.2. Установление пороговых значений

Точкой прихода сигнала при таком подходе считается момент, когда уровень сигнала был выше заранее заданного порога, обычно зависящего от уровня шума. Этот вариант плохо подходит, когда данные имеют низкое соотношение сигнал-шум (Signal-to-Noise Ratio), то есть уровень шума и сигнала соизмеримы [7]. Из-за специфики данных, обусловленных геометрией устройства (кольцо) от этого подхода также было принято решение отказаться, так как уровень сигнала отличается для различных пар источник-приёмник. Для датчиков, находящихся близко к источнику, уровень сигнала примерно в сотню раз ниже, чем для диаметрально противоположных от источника, что объясняется физикой распространения сигнала (Рис. 1).

2.2.3. Сравнение сигнала с эталонной волной

Этот метод предполагает, что сигнал достаточно похож на некоторый эталон, известный заранее; производится сравнение исследуемого сигнала с эталонным. Также заранее выбирается мера схожести сигнала

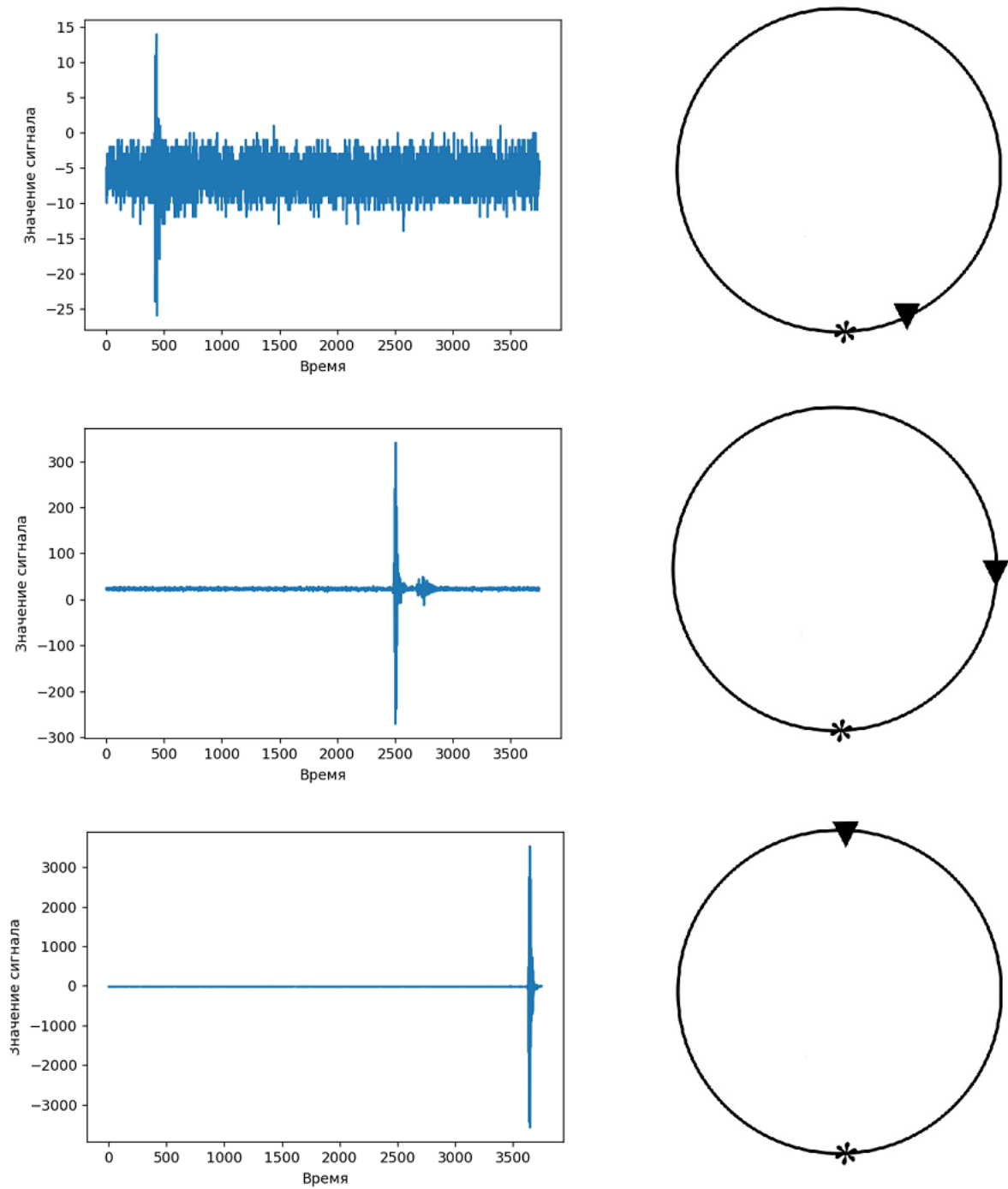


Рис. 1: Уровень сигнала в зависимости от взаимного расположения источника и приёмника; * – испускающий датчик, ▼ – принимающий датчик.

лов; время прихода сигнала определяется как точка, в которой достигается максимум этой меры [7].

Так как для различных пар датчиков и различных сред сигналы

отличаются, этот метод также не выглядит применимым для задачи.

2.2.4. Информационный критерий Акаике

Использование Информационного критерия Акаике (Akaike Information Criterion, AIC) в задаче определения времени прихода акустических сигналов основано на предположении, что волна в пределах некоторого временного окна может быть разделена на два сегмента – до прихода сигнала и после. Этот способ был выбран в качестве оптимального, и дальнейшая работа была связана с его программной реализацией.

Модифицированная формула для подсчёта AIC была предложена в работе [6] и применяется для сигналов различной природы, в том числе и ультразвуковых [5] [1].

В пределах выбранного временного окна для каждого дискретного момента времени – точки $k = 1, \dots, N$ – Информационный критерий Акаике подсчитывается по формуле:

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

$S(1, k)$ (для точек от 1 до k) и $S(k + 1, N)$ (для точек от $k + 1$ до N) – два сегмента в выбранном временном окне, на которые это окно разбивает точка k , а функция $\text{var}(\cdot)$ имеет вид:

$$\text{var}(S(i, j)) = \sigma_{j-1}^2 = \frac{1}{j-i} \sum_{l=i}^j (S(l, l) - \bar{S})^2, \quad i \leq j; \quad i, j = 1, \dots, N,$$

\bar{S} – среднее значение $S(i, j)$ – сигнала на промежутке от i до j .

Точка минимума AIC выбирается в качестве искомого TOF.

3. Описание реализации

3.1. Обработка данных

Обработка данных, полученных с помощью ультразвукового устройства, включает в себя этапы:

1. Считывание данных для пары источник-приёмник
2. Поиск временного окна, содержащего истинную точку прихода сигнала
3. Вычисление Информационного критерия Акаике в пределах выбранного окна
4. Выбор в качестве момента прихода сигнала точки минимума АИС

Результатом работы программы являются подсчитанные времена прихода сигналов для пар источник-приёмник.

Реализация написана на языке программирования Python с использованием библиотек `numpy` и `scipy`. Для визуализации полученных результатов использовалась библиотека `matplotlib`.

3.2. Выбор временного окна

Временное окно, в пределах которого подсчитывается Информационный критерий Акаике, должно включать в себя момент прихода сигнала.

Во время работы рассматривались различные варианты выбора окна:

1. Окрестность точки, в которой уровень сигнала на датчике впервые достиг $2/3$ от максимального
2. Исходя из взаимного расположения испускающего и принимающего датчиков и скорости звука в среде, достаточно похожей на исследуемую (например, в воде, так как скорость звука в воде достаточно близка к скорости звука в грудной ткани) [7]

3. С помощью дисперсии сигнала на небольших интервалах

Вариант 1 использовался в начале работы как самый простой. Минусом этого подхода является то, что при наличии более сильного, чем прямой сигнал, отражённого сигнала, ТОФ будет определён некорректно.

Вариант 2 использовался в дальнейшем как более точный для определения ТОФ прямого сигнала. Этот подход требует заранее просчитанных времён прихода сигнала в среде без препятствий, что вызывает дополнительные затруднения.

Также первые два варианта не подходят, если интерес представляют не только прямые сигналы, но и отражённые.

Вариант 3 был предложен для обнаружения всех сигналов (так как для дальнейшей работы с данными УЗИ-исследований необходимы были как времена прихода прямых сигналов, так и отражённых, при их наличии) и заключается в следующем:

- Выбирается ширина интервала (T , на практике использовалось значение $T = 60$ тактов)
- Подсчитываются дисперсии для всех интервалов $[x, x + T/2]$ в пределах всего промежутка, отображающего уровень сигнала
- Находятся пики полученных значений дисперсии, они используются в качестве центров временных окон для вычисления АИС и поиска ТОФ

4. Результаты экспериментов

Пример вычисления времени прихода сигналов с использованием пиков дисперсии в качестве центров временных окон представлен на Рис. 2.

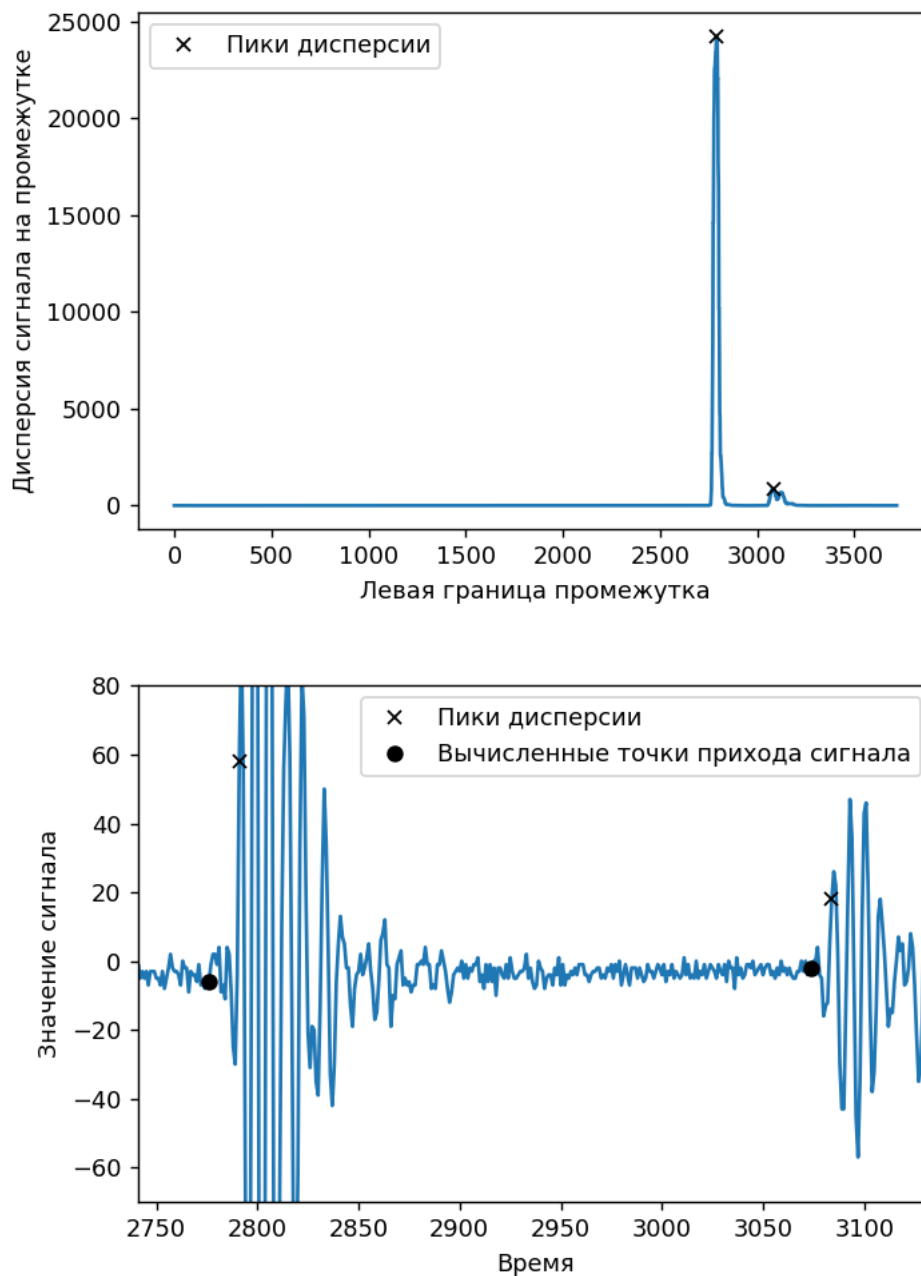


Рис. 2: TOF, полученные с помощью пиков дисперсии.

Таблица 1: Замеры времени работы различных частей программы по вычислению ТОФ для одной пары испускающий-принимающий датчик для процессора Intel Core i7, 2600 MHz.

Считывание данных:	15.6 ms \pm 349 μs
Подсчёт дисперсии:	66.5 ms \pm 1.3 ms
Поиск пиков дисперсии:	125 μs \pm 5.9 μs
Подсчёт АИС в пределах окна:	1.99 ms \pm 86.9 μs
Поиск ТОФ:	18.6 μs \pm 113 ns

Таблица 1 показывает время работы программы. Общее время вычисления ТОФ для пары источник-приёмник составляет около 85 ms. Таким образом, для устройства с $N = 100$ датчиками, весь процесс займёт около 14 минут.

Хотя выбранный подход позволяет отследить все пришедшие сигналы, как прямые, так и отражённые, возможности его применения ограничены из-за длительности вычислений. Дальнейшее развитие возможно с применением распараллеливания и более производительного оборудования.

Заключение

В рамках работы было проделано:

- Исследование предметной области и существующих способов вычисления времени прихода ультразвуковых сигналов
- Сравнение различных вариантов выбора временного окна
- Программная реализация алгоритма вычисления времени прихода сигналов
- Проведение экспериментов на данных
- Замеры времени работы программы

Список литературы

- [1] Espinosa Luis, Vacca Jan, Prieto Flavio et al. Accuracy on the Time-of-Flight Estimation for Ultrasonic Waves Applied to Non-Destructive Evaluation of Standing Trees: A Comparative Experimental Study. — 2018. — Access mode: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01769820> (online; accessed: 2019-05-13).
- [2] Detection of breast cancer with ultrasound tomography: First results with the Computed Ultrasound Risk Evaluation (CURE) prototype / Nebojsa Duric, Peter Littrup, Lou Poulo et al. // Medical Physics. — 2007. — February. — Vol. 34 (2). — P. 773–785.
- [3] Development of ultrasound tomography for breast imaging: Technical assessment / Nebojsa Duric, Peter Littrup, Alex Babkin et al. // Medical Physics. — 2005. — May. — Vol. 32 (5). — P. 1375–1386.
- [4] Quan Youli, Huang Lianjie. Sound-speed tomography using first-arrival transmission ultrasound for a ring array // Medical Imaging 2007: Ultrasonic Imaging and Signal Processing, Proc. of SPIE. — 2007. — Vol. 6513.
- [5] St-Onge Andy. Akaike Information Criterion Applied to Detecting First Arrival Times on Microseismic Data // Recovery – 2011 CSPG CSEG CWLS Convention. — 2011.
- [6] 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. — October. — Vol. 93, No. 5. — P. 1904–1912.
- [7] An improved automatic time-of-flight picker for medical ultrasound tomography / Cuiping Li, Lianjie Huang, Nebojsa Duric et al. // Ultrasonics. — 2009. — January. — Vol. 49 (1). — P. 61–72.