

Нахождение точки прибытия акустического сигнала с максимальной амплитудой, прошедшего через неоднородную среду

Леонова А.В., кафедра системного программирования СПбГУ,
annia.leonova@gmail.com

Трофимов С.А., кафедра теории упругости СПбГУ,
steve.trofimov@gmail.com

Руководитель: Граничин О.Н., д.ф.-м.н. профессор кафедры
системного программирования СПбГУ o.granichin@spbu.ru

Аннотация

В работе рассматривается задача нахождения плотности особых областей при реконструкции изображения акустической томографии. Для решения этой задачи требуется найти точку прибытия акустического сигнала с максимальной амплитудой, прошедшего через неоднородную среду.

Введение

Задача рассматривается в рамках медицинского приложения обнаружения рака молочной железы. В настоящее время стандартом в диагностике рака молочной железы является маммография, но использование ультразвуковой томографии неуклонно растет. Причинами этого являются несколько существенных факторов. Прежде всего, ультразвуковое исследование абсолютно неинвазивно и безопасно для пациента. Во-вторых, доля женщин с гетерогенной (неоднородной) или чрезвычайно плотной грудью варьируется от 32,5% до 45,7% , и вероятность ошибки традиционных методов скрининга молочной железы в таких случаях высока [1].

Ультразвуковая томография использует различные методы визуализации: изображение восстанавливается с использованием отраженного сигнала, с использованием сквозного сигнала (визуализация скорости звука), с использованием затухания сигнала и их комбинаций. В этой работе рассматриваются сквозные и отраженные сигналы. Время прихода ультразвукового сигнала (сквозное и отраженное) через интересующую область используется при восстановлении изображения и нахождении плотности особых областей. В плотной ткани скорость распространения сигнала выше, чем в окружающей ткани. Следовательно, сигнал проходит через такую область быстрее, чем через однородную (без особых областей плотной ткани). На основе таких

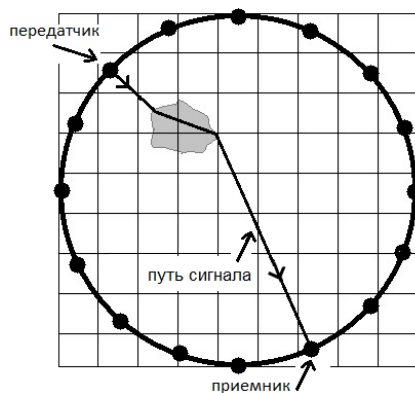


Рис. 1: Схема аппарата: круговой трандюсер с N сенсорами

«отклонений» во времени прихода сигналов позже выполняется реконструкция изображения и нахождение плотности особых областей.

Общий вид томографического процесса может быть представлен следующей последовательностью действий: излучение сигнала, сбор наблюдений с датчиков, извлечение времени поступления сигнала, восстановление изображения. Первый этап выполняется на физическом устройстве. Устройство представляет собой кольцевой преобразователь с элементами N (излучающие датчики) (Рис. 1). Каждый элемент представляет собой ультразвуковой излучатель и приемник. Изображение получается путем перемещения этого кольца в вертикальном направлении. Результатом такой процедуры сканирования являются поперечные «срезы» тканей, из которых формируется трехмерное изображение. Когда один элемент испускает сигнал, все остальные элементы получают сигналы, таким образом, восстановление одного «среза» учитывает N^2 сигналов. То есть каждый из датчиков в свою очередь излучает сигнал, и все датчики получают его сигнал в течение фиксированного времени. На третьем этапе показания на конкретном датчике в отдельные моменты времени используются для расчета времени поступления сигнала (Time Of Flight, TOF) на датчик. Затем TOF используются для восстановления изображения на четвертой стадии. На четвертом этапе решается обратная задача восстановления изображения. Цель обратной задачи — оценить распределение скоростей, которое соответствует траекториям кратчайшего прохождения сигнала в интересующей области. Исследуемая область дискретизируется с помощью наложения сетки.

Существуют решения рассматриваемой обратной задачи в классическом

смысле — решение нелинейной системы [2, 3]. Но такие подходы вычислительно сложны и не дают удовлетворительных результатов. В этой статье мы продолжаем изучение нашего предыдущего исследования [4].

Вычисление плотности особых областей

После обнаружения особых областей форма и местоположение объекта стали известны. Обнаружение особых областей остается за рамки этой статьи. Следующая задача – найти плотность этого объекта. Плотность отдельных областей связана со скоростью звука в них. В дальнейшем мы будем искать именно скорость распространения в них.

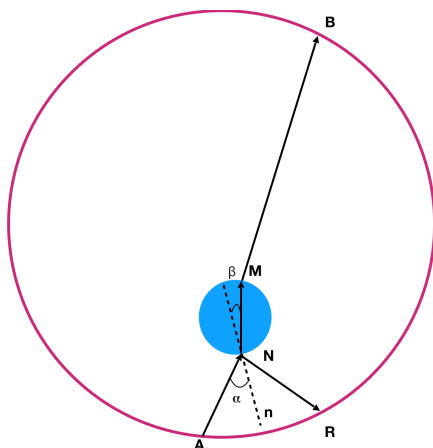


Рис. 2: Траектория отраженного и преломленного сигнала

С помощью закона Снеллиуса о преломлении волны на границе двух сред мы хотим найти скорость звука в конкретной области, обозначенной синим кружком на рис. 2. Алгоритм нахождения скорости определяется для взаимосвязанных точек A, R, B . Точка A соответствует датчику-излучателю. Точки B и R соответствуют точкам прибытия сигнала (преломленного и отраженного) на приемники. С этими точками углы α, β и скорость звука в интересующей области определяются путем полного перебора. Алгоритм нахождения плотности включает в себя следующие этапы:

1. Поиск точки N по всем точкам объекта (закрашенные пиксели, соответствующие форме и местоположению объекта, на восстановленном

изображении-шаблоне). Точка N из них берется та, для которой значение $\|\vec{AN}\| + \|\vec{NR}\|$ ближе к значению произведения плотности жидкости, помещаемой в аппарат, на TOF для отраженного сигнала между датчиками, соответствующими точкам A и R .

2. Полный перебор плотностей (скоростей звука) в объекте в определенном диапазоне.
3. Из закона Снеллиуса следует, что:

$$C * \sin\beta = C_{water} * \sin\alpha \quad (1)$$

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

Из равенства (2) вычисляется угол β , по нему строится вектор \vec{NM} , и, следовательно, вычисляется вторая точка преломления M .

4. Точка B известна (это координата датчика, принимающего сквозной сигнал). Из всех плотностей, по которым осуществлялся перебор, за плотность берется та, для которой значение

$$\left| \frac{(\|\vec{AN}\| + \|\vec{MB}\|)}{C_{water}} + \frac{\|\vec{NM}\|}{C} - \text{tof}[a, b] \right|, \quad (2)$$

где $\text{tof}[a, b]$ значение времени прохождения сквозного сигнала между датчиками, соответствующими точкам A и B , минимально.

5. Усреднение значения плотности при разных испускающих датчиках.

Поиск точки прихода сигнала

Чтобы реализовать вышеописанный алгоритм для нахождения скорости, нужно найти взаимосвязанные точки A , B , R .

Предположение 1 Между точками A , B , R есть взаимосвязь.

Предположение 2 Точка прихода сквозного сигнала B (отраженного сигнала R) имеет максимальную амплитуду среди соседних приемников.

Рассмотрим эксперимент, в котором отсутствуют особые области, то есть эксперимент проводился в однородной среде (рис. 3).

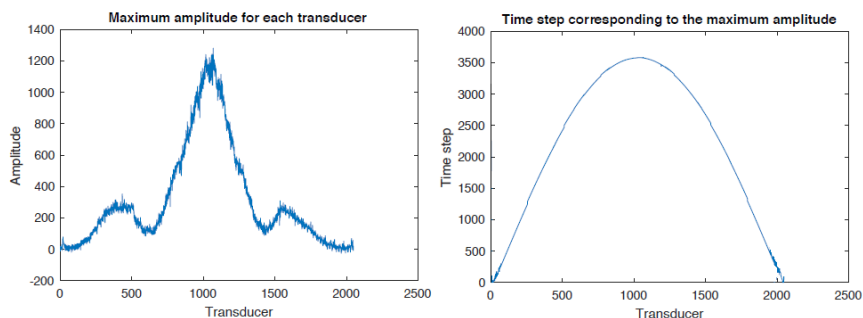


Рис. 3: Справа: зависимость сигнала TOF от номера датчика, принимающего сигнал. Слева: значения максимальных амплитуд этих принятых сигналов.

На правом рисунке показан график зависимости сигнала TOF от номера датчика, принимающего сигнал. А на левом графике показаны значения максимальной амплитуды этих принимаемых сигналов. Из графиков видно, что амплитуды распределены относительно максимальной амплитуды, то есть распределены относительно диаметрально противоположной точки от точки излучения сигнала.

Рассмотрим эксперимент в неоднородной среде, представленной на рис. 4. В области исследования есть объект, обозначенный синим кружком. Датчик № 513 излучает сигнал.

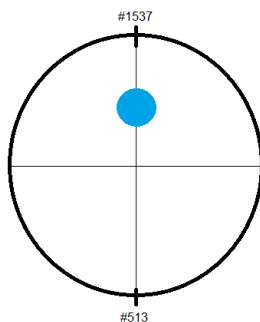


Рис. 4: Эксперимент с синей особой областью. Излучает сигнал датчик с номером 513

Затем проведем эксперимент с особой областью. Графики эксперимента приведены на рис. 5. Графики изменились: мы получили просадку по времени прибытия сигнала после того, как сигнал пересек две среды. Также то же самое соответствует графику максимальных амплитуд. Но можно увидеть,

что наш локальный максимум сохраняется.

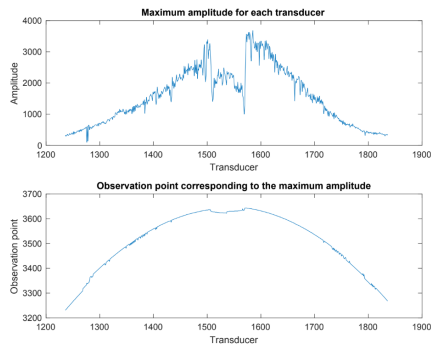


Рис. 5: Справа: зависимость TOF сигнала от номера датчика, принимающего сигнал. Слева: значения максимальных амплитуд этих принятых сигналов.

Таким образом, мы предлагаем алгоритм нахождения точек A , B , R . Сравните эталонный график TOF эксперимента в воде с графиком TOF эксперимента с объектом и найдите коридор, как показано на рис. 6. Затем найдите локальный максимум в этом коридоре, как показано на рис. 6 на графике амплитуд.

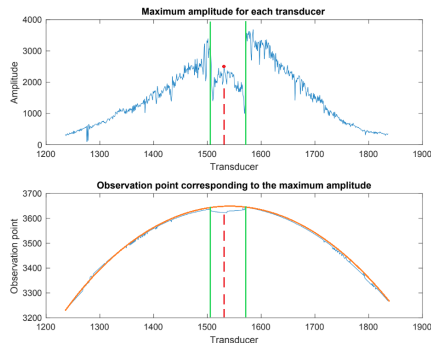


Рис. 6: Справа: Зависимость TOF сигнала от номера датчика, принимающего сигнал. Слева: значения максимальных амплитуд этих принятых сигналов. (Без объекта и с объектом)

Заключение

В этой статье предлагается обнаружение точек прибытия акустического сигнала с максимальной амплитудой, прошедшего через неоднородную область. Этот алгоритм требуется для нахождения плотности особой областей при помощи ультразвуковой томографии. Для серии экспериментов с реальными данными акустической томографии расчеты проводились с использованием описанных алгоритмов.

Литература

- [1] Kolb T. M., Lichy J., Newhouse J. H. Comparison of the performance of screening mammography, physical examination, and breast US and evaluation of factors that influence them: an analysis of 27,825 patient evaluations // Radiology. — 2002. — Vol. 225. No. 1. P. 165–175.
- [2] Li C. et al. In vivo breast sound-speed imaging with ultrasound tomography // Ultrasound in medicine & biology. — 2009. — Vol. 35. No. 10. P. 1615–1628.
- [3] Hormati A. et al. Robust ultrasound travel-time tomography using the bent ray model // Medical Imaging 2010: Ultrasonic Imaging, Tomography, and Therapy. International Society for Optics and Photonics. — 2010. — Vol. 7629.
- [4] Erofeeva V., Granichin O., Senin I. Modifying the physical process of ultrasound tomography scanning through compressive sensing // Cybernetics and Physics. — 2018. — Vol. 7. No. 2. P. 66–71.