

ЧАСТЬ 1

ВВЕДЕНИЕ В ПРАКТИЧЕСКУЮ УЛЬТРАСОНОГРАФИЮ

В первой части пособия сосредоточена базовая информация по физике ультразвука, особенностям работы в различных режимах (2D, M-mode, режим доплера), а также изложены особенности оптимизации изображения. Описаны основные артефакты, возникающие при работе с ультразвуком.

Проценко Д.Н., Логвинов Ю.И.,
Лыхин В.Н., Мендибаев М.С., Филявин Р.Э., Ющенко Г.В.

ГЛАВА 1.1

ФИЗИКА УЛЬТРАЗВУКА

В отличие от световых волн, которые могут распространяться через вакуум, звуковые волны распространяются только через физическую среду. Эта среда может состоять из любого вещества, например воздуха, воды, металла или ткани и жидкости в организме человека. Звуковые волны возникают, когда источник звука генерирует механические колебания в частицах среды. Эти колебания продолжают распространяться в среде со скоростью звука, образуя звуковую волну.

Знакомый пример – человеческая речь. Люди говорят, приводя в движение свои голосовые связки. Когда голосовые связки вибрируют, они создают колебания в окружающем воздухе, и эти колебания распространяются в виде звуковой волны. Если звуковые волны сталкиваются с новой средой, некоторые звуковые волны будут отражаться, в то время как другие передадут механическую энергию (давление) новой среде, которая также может начать вибрировать.

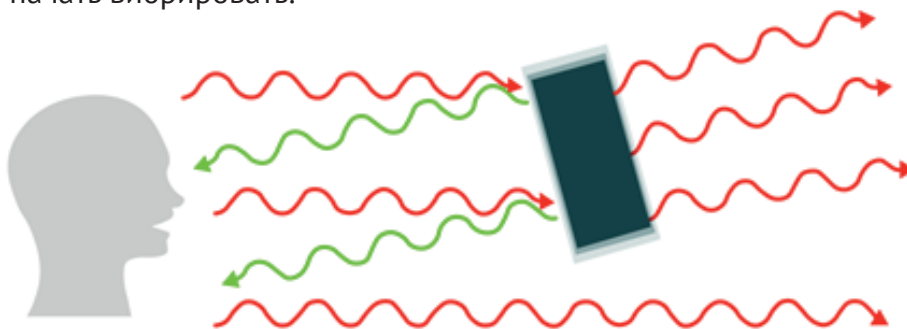


Рис. 1.1

Принципы образования, распространения и отражения звуковых волн. Красные волны отражают вибрацию голосовых связок. Отраженные волны обозначены зеленым цветом. Звуковые волны сталкиваются с объектом, после чего объект отражает некоторые волны и сам начинает вибрировать. Вибрирующий объект генерирует новые звуковые волны.

Хотя звуковые волны перемещаются во времени и пространстве, частицы среды не перемещаются вместе со звуковой волной. Частицы просто колеблются и передают колебания соседним частицам в среде.

Математически звуковые волны можно описать синусоидой. Эта кривая характеризуется следующими переменными: длиной волны, амплитудой, частотой, скоростью и направлением. Основные математические принципы просты и важны для понимания.

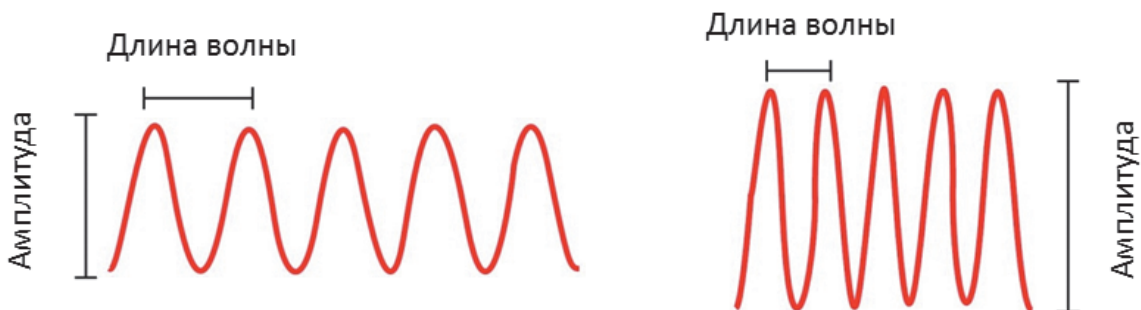
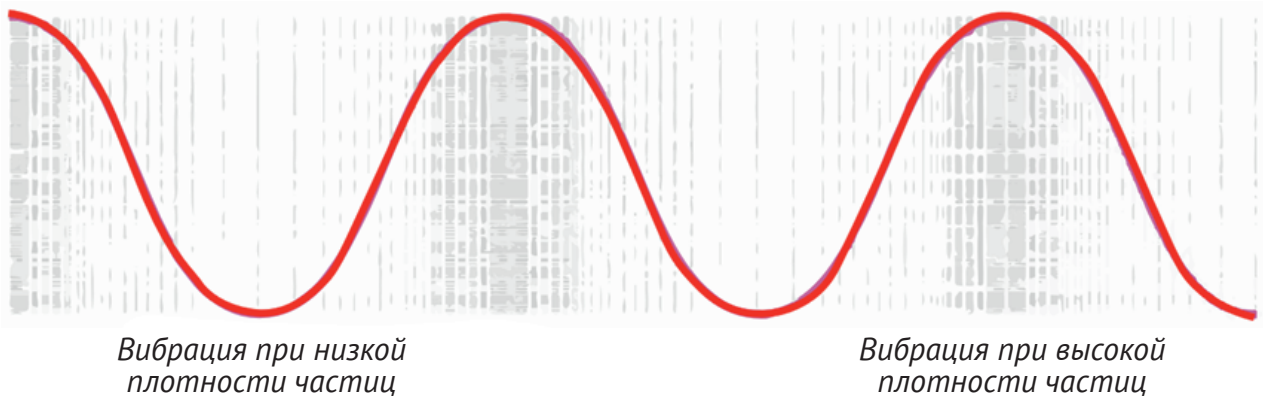


Рис. 1.2

Эта звуковая волна имеет более высокую амплитуду и более высокую частоту, чем звуковая волна слева

Пики и минимумы синусоиды соответствуют максимальному и минимальному давлению по отношению к среде.



Длина волны

Рис. 1.3

Длина волны определяется как расстояние между двумя точками (вдоль звуковой волны) с одинаковой амплитудой (то есть давлением). Легко измерить расстояние между двумя максимальными или двумя минимальными пиками. Однако расстояние между двумя точками можно измерить при условии, что между ними нет разницы давлений. На рис. 1.2 длина волны измеряется как расстояние между двумя пиками.

Длина звуковых волн человеческой речи составляет от 17 мм до 17 м. Длина волны указывается в метрах (м) и обозначается буквой λ (лямбда). Обратите внимание, что в этой книге используется Международная система единиц. Сюда входят базовые единицы: метр (длина), килограмм (масса), секунда (время), ампер (электрический ток) и кельвин (температура).

Амплитуда

Амплитуда описывает силу звуковых волн, которая соответствует высоте синусоиды (см. рис. 1.2). Высокая амплитуда означает громкий звук, и наоборот. На рис. 1.2 показаны две звуковые волны разной амплитуды. Обратите внимание, что амплитуда на самом деле описывает разницу давлений между самой высокой и самой низкой плотностью частиц вдоль звуковой волны (рис. 1.3). Громкий звук характеризуется большими перепадами давления вдоль звуковой волны, в то время как низкий звук имеет небольшие перепады давления вдоль звуковой волны. Амплитуда указывается в децибелах (дБ).

Частота

Частота – это количество волновых циклов в секунду. Единицей измерения частоты является герц (Гц), обозначается буквой f . На рис. 1.2 две звуковые волны имеют разные амплитуды и разные частоты. Если бы правая звуковая волна на рис. 1.2 была записана в течение секунды, то частота была бы 5 Гц (так как 5 волновых циклов наблюдаются за 1 с). Если звуковая волна имеет частоту 1000 Гц, то каждую секунду проходит 1000 волновых циклов.

Восприятие звука и ультразвук

Человеческое ухо может воспринимать звуковые волны с частотами от 20 до 20 000 Гц (20 000 Гц также можно записать как 20 кГц). Звуковые волны с частотой выше 20 000 Гц (20 кГц) не воспринимаются человеческим ухом, и они называются ультразвуковыми. Следовательно, человеческое ухо не слышит ультразвук.

Следует отметить, что диапазон слышимого звука имеет большую вариативность. Подавляющее большинство людей не слышит звук с частотой выше 15 кГц. Однако более молодые люди могут слышать очень высокие частоты (иногда 20 кГц), особенно если амплитуда велика. Ультразвук, используемый для клинической диагностики, например эхокардиографии, имеет частоту от 2 до 10 млн Гц (2–10 МГц), что намного превосходит воспринимаемый людьми звук.

Скорость звука

Скорость описывает, насколько быстро звуковые волны распространяются в среде. Эта скорость зависит от плотности среды. Звуковые волны распространяются быстрее в средах с высокой плотностью. Чем выше плотность, тем выше скорость. Скорость звука в воздушной среде примерно 300 м/с. В теле человека скорость звука достигает 1540 м/с (тело человека в основном состоит из воды). Скорость обозначают буквой c и измеряют в метрах в секунду (м/с).

Направление звуковых волн

Описание направления звуковых волн в среде.

Математические уравнения

Существует простая математическая связь между скоростью (c), длиной волны (λ) и частотой (f):

$$c = f \times \lambda.$$

Согласно формуле, скорость звуковой волны является произведением частоты и длины волны. Используя формулу, мы можем рассчитать длину волны (λ) для ультразвука с частотой 3 млн Гц (3 МГц), которая используется в УЗ-диагностике:

$$\lambda = 1540 / 3\,000\,000 = 0,000\,513\text{ м} = 0,513\text{ мм}.$$

Таким образом, длина волны ультразвука очень мала, что желательно для УЗИ, поскольку позволяет детально визуализировать небольшие структуры (то есть разрешение становится высоким).

Ультразвуковой датчик и пьезоэлектрические кристаллы

УЗ-датчик генерирует УЗ-волны. Датчик удерживается одной рукой, а его положение и угол регулируются для передачи УЗ-волн через структуры, которые необходимо визуализировать.

Датчик быстро излучает УЗ-волны. Эти волны проходят через ткани и жидкости. Некоторые звуковые волны отражаются обратно на датчик. Анализируя отраженные звуковые волны, ультразвуковой аппарат создает изображение тканей. Таким образом, принцип ультразвуковой визуализации прост: звуковые волны направляются в ткань, а отраженные волны используются для создания изображения ткани.



Рис. 1.4

УЗ-волны генерируются керамическими кристаллами, проявляющими пьезоэлектрические свойства (например, пьезоэлектрическими кристаллами). Тысячи пьезоэлектрических кристаллов прикреплены к передней части преобразователя (см. рис. 1.5). Кристаллы подключаются к УЗ-аппарату через электроды.

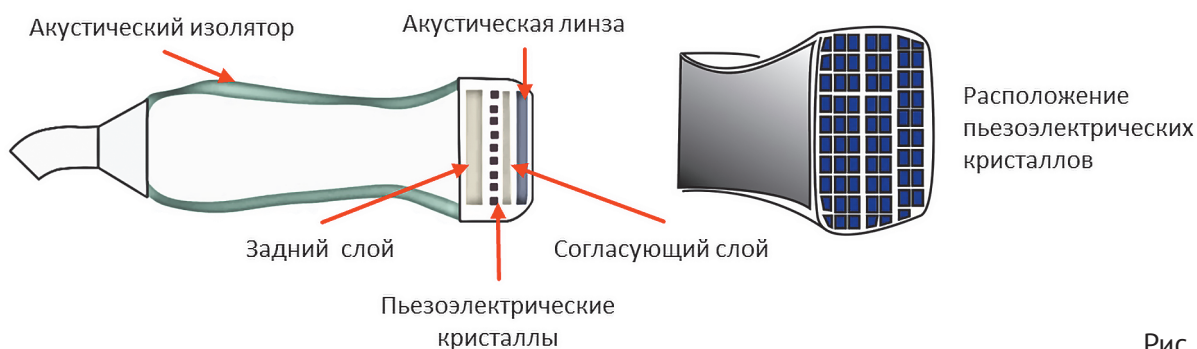
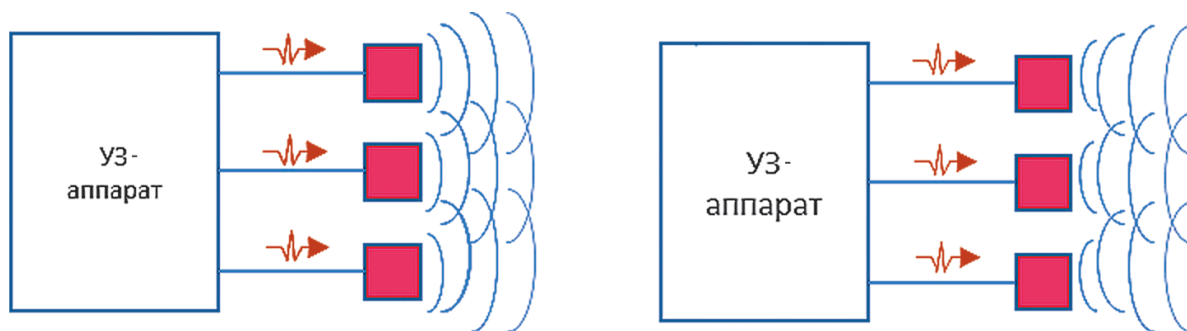


Рис. 1.5

Пьезоэлектрические кристаллы обладают уникальными электромеханическими свойствами. Когда электрический ток подается на пьезоэлектрический кристалл, он начинает вибрировать, и эти колебания генерируют звуковые волны с частотами от 1,5 до 8 МГц (то есть ультразвук). Таким образом, пьезоэлектрические кристаллы могут преобразовывать электрические токи в УЗ-волны. Кристаллы также могут делать противоположное; когда на кристаллы попадают отраженные УЗ-волны, они начинают вибрировать, и эти механические колебания преобразуются в электрический ток, который отправляется обратно в УЗ-аппарат, где электрический сигнал интерпретируется и преобразуется в изображение.



Воздействие электрического тока на кристалл приводит к вибрации и генерирует УЗ-волны

Отраженные УЗ-волны сталкиваются с кристаллами, это вызывает их вибрацию, что приводит к возникновению электрического тока, который анализируется УЗ-аппаратом

Рис. 1.6

Ультразвуковой преобразователь состоит из нескольких компонентов. Преобразователь содержит акустическую изоляцию, которая гарантирует, что никакие другие звуковые волны не влияют на датчик. Кристаллы прикрыты задним слоем, который подавляет колебания кристаллов, позволяя передавать звуковые волны более короткими импульсами, что улучшает разрешение.

Перед кристаллами находится согласующий слой, который уменьшает разницу в импедансе между кристаллами и исследуемой тканью. Без этого слоя разница в импедансе становится большой, что приводит к отражению слишком большого количества звуковых волн (в результате чего меньше звуковых волн проникает в ткани). В передней части преобразователя находится акустическая линза. Это твердая резина, которая фокусирует УЗ-волны, что приводит к меньшему рассеиванию волн и, таким образом, увеличивает разрешение изображения.

Из датчика УЗ-волны посылаются импульсами. Каждый импульс состоит из нескольких звуковых волн, излучаемых в течение 1–2 мс. Эти звуковые волны проходят через кожу, грудную клетку, перикард, миокард и т.д. При переходе между каждой средой (ткань, кровь и т.д.) значительная часть всех звуковых волн будет отражаться обратно к датчику. Когда отраженный звук попадает на пьезоэлектрические кристаллы, они начинают вибрировать и генерировать электрические токи, которые передаются на УЗ-аппарат для анализа.

Отраженные звуковые волны будут иметь ту же скорость, что и излучаемые волны, но амплитуда, частота и угол падения могут отличаться от излучаемых звуковых волн. УЗ-аппарат использует вариации амплитуды, частоты и времени отраженных звуковых волн для создания изображения среды (ткани).

Технические аспекты ультразвукового изображения

Формирование ультразвукового изображения

Ультразвуковой датчик генерирует короткие импульсы УЗ-волн. Отраженные УЗ-волны анализируются аппаратом во время коротких пауз между импульсами. Таким образом аппарат УЗИ анализирует («слушает») отраженные звуковые волны сразу после того, как генерирует звуковые волны.

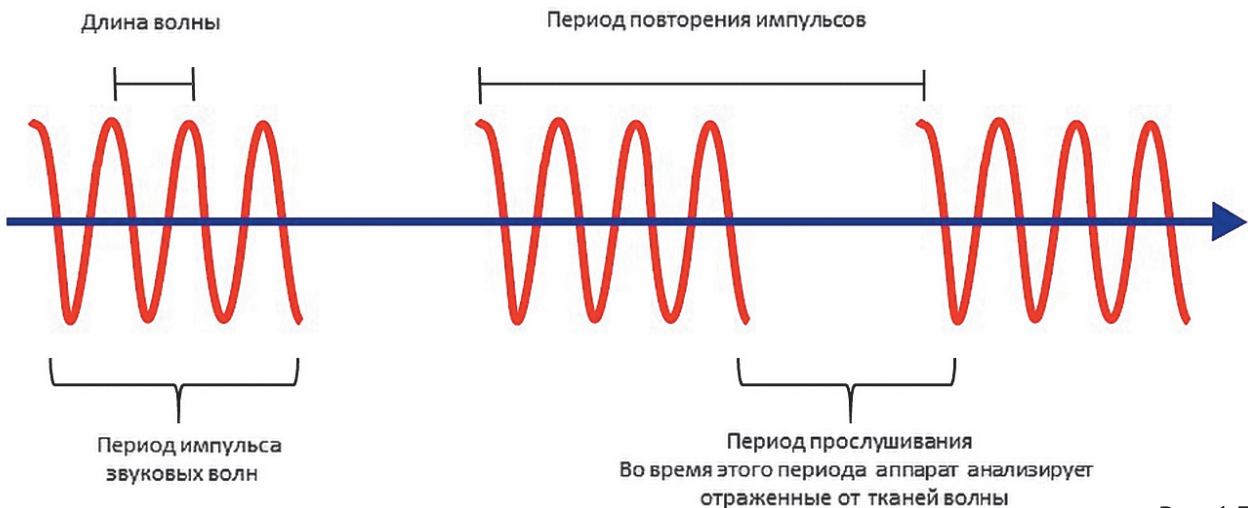


Рис. 1.7

Для создания подходящего изображения в реальном времени аппарат УЗИ должен преодолеть следующие технические препятствия.

1. Ультразвуковой аппарат должен определять, какие звуковые волны отражаются и откуда.

Поскольку звуковые волны излучаются импульсами, а скорость в ткани постоянна (1540 м/с), аппарат может вычислить, где звуковые волны были отражены (то есть аппарат может вычислить точку отражения). Это делается путем анализа времени, которое требуется звуку, чтобы вернуться к преобразователю, и, таким образом, вычислить расстояние до структуры, которая отразила волну. Структуры, расположенные ближе к датчику, будут рано отражать звуковые волны, и, следовательно, временной интервал будет коротким. Структуры, расположенные далеко от датчика, будут позже отражать звуковые волны, и для достижения датчика потребуется больше времени.

2. Ультразвуковые волны, отраженные от одной и той же структуры, могут достигать разных кристаллов в разные промежутки времени.

Для решения этой проблемы существует встроенная функция, называемая динамической фокусировкой, которая вычисляет, какие УЗ-волны исходят из одной и той же точки отражения.

3. Отраженные ультразвуковые волны имеют измененные свойства (например, измененную амплитуду).

Это используется для придания отраженным звуковым волнам в зависимости от их амплитуды различных нюансов на УЗ-изображении. Ткани на УЗ-изображении отображены разными оттенками одного цвета (обычно серого). Это возможно, потому что колебания в пьезоэлектрических кристаллах и, следовательно, электрический ток, который они посылают обратно в машину, изменяются в зависимости от амплитуды отраженного звука. Чем сильнее отражения, тем выше амплитуда и белее цвет ткани на УЗ-изображении.

4. Движущиеся структуры (миокард, ток крови в сосуде) изменяют характеристики ультразвуковых волн (например, частоту).

Это фактически используется для расчета направления и скорости движения тканей и жидкости.

Все структуры в среде могут отражать УЗ-волны. Однако максимальные отражения происходят на границе двух сред. Следовательно, при переходе крови к миокарду многие звуковые волны будут отражаться, и это приведет к четко обозначенной пограничной зоне между кровью и миокардом на эхокардиограмме. УЗ-волны также будут отражаться, когда проходят через миокард, но в меньшей степени, поэтому миокард не так отчетливо выделяется на УЗ-изображении.

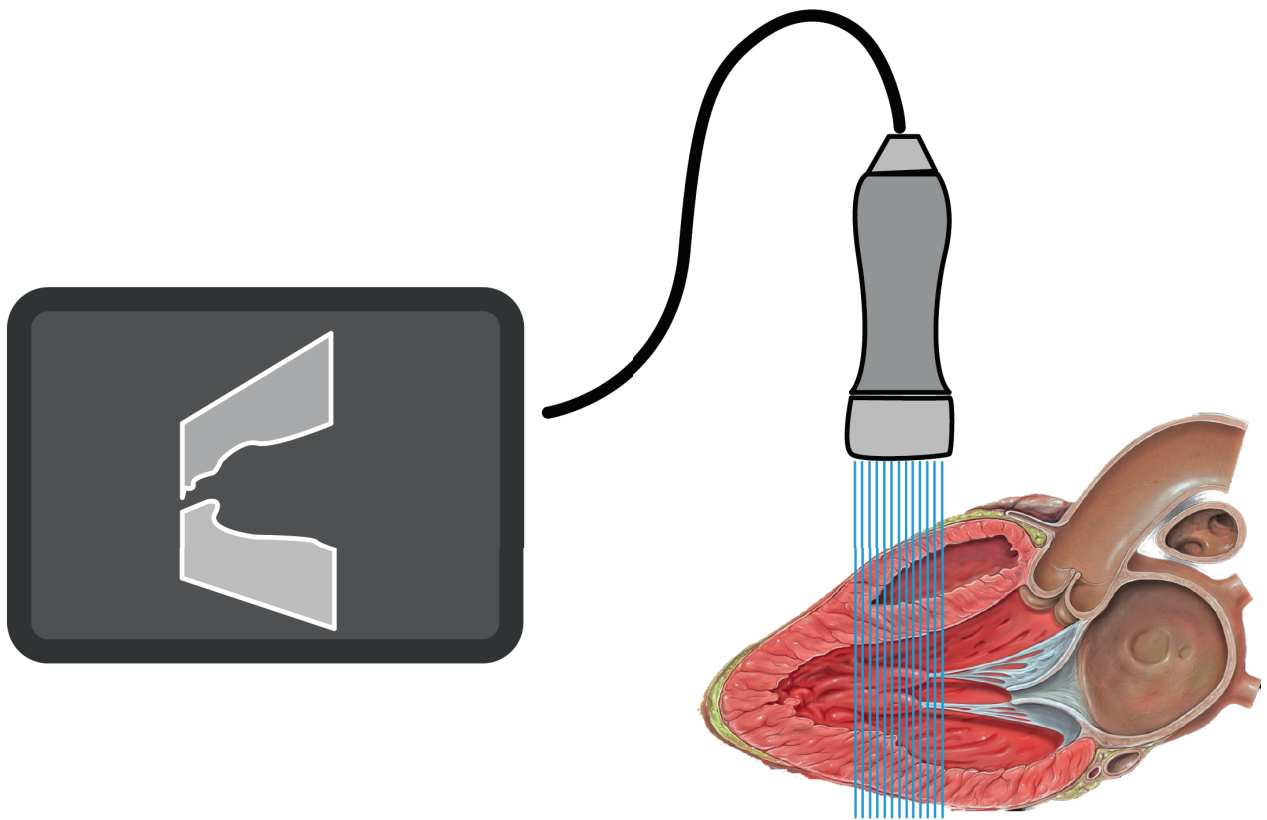


Рис. 1.8

УЗ-волны в основном отражаются на границе раздела сред (тканей, жидкостей и т.д.) разной плотности. Чем больше разница плотности, тем больше отражаются УЗ-волны. Это объясняет, почему границы тканей на УЗ-изображении выглядят как более яркие структуры.