МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АППАРАТОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА ПО КЛИНИЧЕСКОЙ ИНЖЕНЕРИИ

Гуломов Шухрат Абдумухтарович
Андижанский государственный
медицинский институт, г. Андижан, Узбекистан
https://doi.org/10.5281/zenodo.23568696

Аннотация. Аппараты ультразвукового исследования (УЗИ) являются самым распространённым видом диагностической визуализации, и инженеры по клинической инженерии должны знать их устройство, настройку и обслуживание. В статье представлена программная модель работы аппарата УЗИ, реализованная в виртуальном лабораторном комплексе по клинической инженерии Андижанского государственного медицинского института. Модель воспроизводит основные блоки аппарата: генератор импульсов, пьезоэлектрический датчик, приёмный тракт с временной регулировкой усиления, аналого-цифровое преобразование, обработку сигнала и формирование изображения в B-режиме. Расчёт эхосигналов основан на акустическом импедансе тканей, коэффициенте отражения и затухании ультразвука. Студенты изменяют частоту датчика и параметры усиления, наблюдают изменение глубины проникновения и разрешающей способности и выявляют смоделированные неисправности. Модель обеспечивает безопасное и многократное обучение без использования реального аппарата.

Ключевые слова: ультразвуковое исследование, аппарат УЗИ, моделирование, виртуальная лаборатория, клиническая инженерия, акустический импеданс, B-режим.

1. Введение

Ультразвуковая диагностика широко применяется в медицине благодаря безопасности, отсутствию ионизирующего излучения, работе в реальном времени и относительно низкой стоимости [1, 2]. Аппараты УЗИ имеются почти в каждом лечебном учреждении, поэтому их техническое обслуживание и контроль качества входят в основные задачи специалиста по клинической инженерии.

Для подготовки таких специалистов необходимы практические занятия, однако аппараты УЗИ в клиниках заняты обследованием пациентов, а намеренное создание неисправностей в работающем аппарате недопустимо. Программные симуляторы ультразвука позволяют изучать формирование изображения без реального оборудования [3, 4].

В Андижанском государственном медицинском институте создан виртуальный лабораторный комплекс по клинической инженерии, включающий сервер, рабочие места студентов, большие демонстрационные мониторы и рабочее место инженера-электронщика [5]. Цель работы — разработать модель работы аппарата УЗИ для этого комплекса и показать её применение для изучения принципов ультразвуковой визуализации и неисправностей аппарата.

2. Материалы и методы

Физические основы. Датчик излучает короткий ультразвуковой импульс и принимает эхосигналы, отражённые от границ тканей. Глубина отражающей границы определяется по времени возврата эха:

$$d = \frac{c \cdot t}{2}, \qquad c = 1540 \text{ м/с}$$

Доля отражённой энергии на границе двух сред с акустическими импедансами Z1 и Z2 (Z = ρc) равна:

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right)^2$$

При распространении ультразвук затухает; для мягких тканей принято среднее значение 0,5 дБ/(см·МГц) [1, 2]. Поэтому с ростом частоты разрешение улучшается, а глубина проникновения уменьшается.

Входные параметры модели. Использованы средние справочные значения акустического импеданса [1, 6] (табл. 1).

Таблица 1. Акустический импеданс сред

Среда	Z, МРэл
Воздух	0,0004
Жир	1,38
Кровь	1,61
Печень	1,65
Мышца	1,70
Кость	7,8

Глубина проникновения рассчитывалась при динамическом диапазоне приёмника 60 дБ с учётом пути импульса туда и обратно; осевое разрешение принималось равным длине волны (импульс из двух периодов).

Реализация. Модель размещена на головном компьютере (сервере) виртуального лабораторного комплекса и открывается на шести рабочих местах студентов. Преподаватель задаёт задание и вводит неисправности, результаты выводятся на большие мониторы для совместного разбора.

3. Результаты

Модель представляет аппарат УЗИ как замкнутую цепь блоков, управляемых с панели оператора (рис. 1). Каждый блок можно открыть для просмотра его параметров, и любой из них преподаватель может перевести в состояние неисправности.

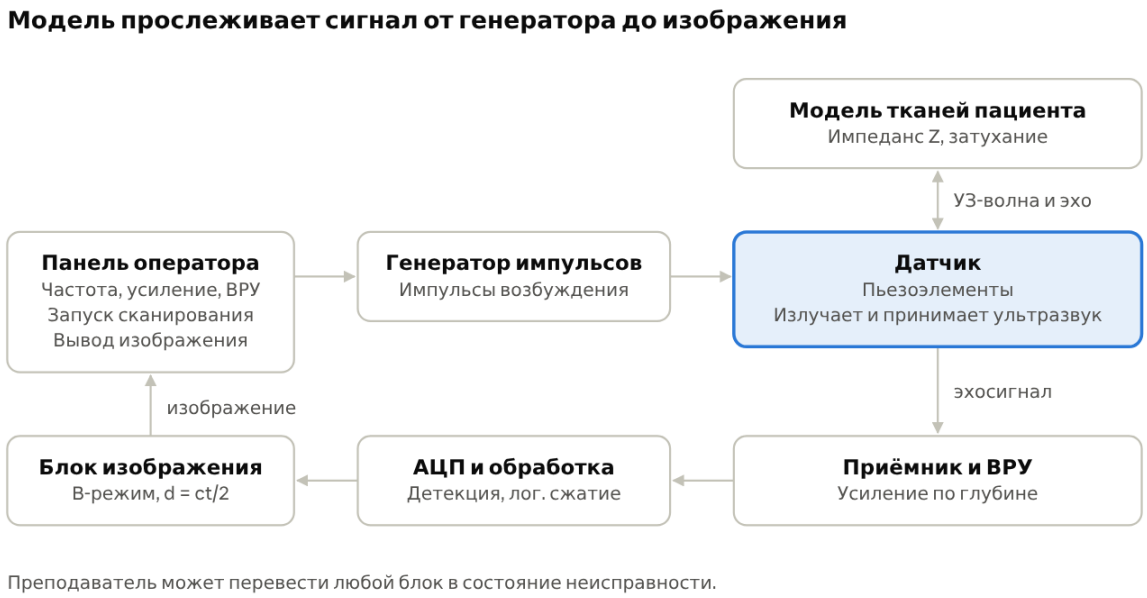

Рис. 1. Блок-схема модели аппарата УЗИ.

Отражение на границах тканей. Рассчитанные коэффициенты отражения приведены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты отражения на границах тканей

Граница	R, %	Результат на изображении
Мышца — воздух	99,9	Полное отражение, за границей ничего не видно; нужен контактный гель
Мышца — кость	41,2	Яркая граница и акустическая тень за ней
Жир — мышца	1,08	Хорошо видимая граница
Печень — жир	0,79	Видимая граница
Кровь — печень	0,02	Слабое эхо, сосуды выглядят тёмными

Выбор частоты датчика. Модель показывает обратную зависимость между глубиной проникновения и разрешением (табл. 3).

Таблица 3. Влияние частоты датчика

Частота, МГц	Глубина проникновения, см	Осевое разрешение, мм	Типичное применение
2,0	30	0,77	Глубокие органы, крупные пациенты
3,5	17	0,44	Брюшная полость
5,0	12	0,31	Брюшная полость у детей, сердце
7,5	8	0,21	Щитовидная железа, молочная железа
10,0	6	0,15	Поверхностные структуры, сосуды

Моделируемые неисправности. Студент должен определить неисправный блок по изображению и параметрам (табл. 4).

Таблица 4. Моделируемые неисправности

Неисправный блок	Неисправность	Признак на изображении
Датчик	Отказ части пьезоэлементов	Тёмные вертикальные полосы
Датчик	Повреждение кабеля	Прерывистое изображение, шум
Генератор импульсов	Низкое напряжение	Слабое изображение по всей глубине
Приёмник, ВРУ	Неверная кривая усиления	Слишком тёмные или яркие участки на определённой глубине
АЦП, обработка	Ошибка оцифровки	Помехи, «снег» на изображении
Блок формирования изображения	Неверная скорость звука	Искажение размеров и глубины

Работа с моделью проходит в порядке, принятом в виртуальном комплексе: сервер передаёт модель и задание на рабочие места, студенты выбирают частоту и усиление, анализируют изображение, ищут введённую неисправность и отправляют результаты на проверку.

4. Обсуждение

Модель позволяет изучать аппарат УЗИ без реального оборудования и без занятия клинического аппарата. Студенты наглядно видят, почему для глубоких органов выбирают низкочастотный датчик, а для поверхностных структур — высокочастотный, и почему между датчиком и кожей необходим контактный гель. Простые формулы обеспечивают быстрые расчёты одновременно на шести рабочих местах.

Главная ценность модели для клинической инженерии — моделирование неисправностей. Каждая неисправность связана с характерным признаком на изображении, что формирует навыки диагностики, необходимые при сервисном обслуживании. Повреждение датчика и кабеля относится к наиболее частым поломкам аппаратов УЗИ, поэтому этим блокам уделено особое внимание.

Модель имеет ограничения. В ней не учтены доплеровские режимы, рассеяние на мелких структурах (спекл), нелинейные эффекты и тканевая гармоника. Значения импеданса и затухания приняты средними. В дальнейшем планируется добавить доплеровский режим, моделирование спекла и сравнение с изображениями, полученными на реальном аппарате и фантоме на рабочем месте инженера.

5. Заключение

Разработана модель работы аппарата УЗИ для виртуального лабораторного комплекса по клинической инженерии. Модель воспроизводит основные блоки аппарата, рассчитывает отражение на границах тканей, глубину проникновения и разрешение, а также моделирует неисправности каждого блока. Полученные результаты соответствуют известным закономерностям ультразвуковой диагностики. Модель может применяться при обучении студентов по клинической инженерии принципам работы, контролю качества и техническому обслуживанию аппаратов УЗИ.

Список литературы

1. Hoskins P.R., Martin K., Thrush A. Diagnostic Ultrasound: Physics and Equipment. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2019.
2. Szabo T.L. Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out. 2nd ed. Oxford: Academic Press; 2014.
3. Jensen J.A. Field: a program for simulating ultrasound systems. Medical & Biological Engineering & Computing. 1996;34(Suppl. 1):351–353.
4. Jensen J.A., Svendsen N.B. Calculation of pressure fields from arbitrarily shaped, apodized, and excited ultrasound transducers. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 1992;39(2):262–267.
5. Bushberg J.T., Seibert J.A., Leidholdt E.M., Boone J.M. The Essential Physics of Medical Imaging. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2012.
6. Кобулова, М. А. (2024). Информационные технологии в медицинском образовании-как фактор повышения качества обучения. AndMI Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyalari, 1(1), 434-437.
7. Тешабоева, З. Т., & Кобулова, М. А. (2024). Совершенствование методов привлечения студентов к науке и исследованиям в ВУЗах. Science and innovation, 3(Special Issue 15), 442-444.
8. Кобулова Мохинабону Авазбековна (2024). ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АДАПТИВНЫХ ОНЛАЙН ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМАХ. Universum: психология и образование, (10 (124)), 14-16.
9. O’rmonovna X. X. MODERN TEACHING REQUIREMENTS OF THE SUBJECT “INFORMATION TECHNOLOGY IN MEDICINE” //ОБРАЗОВАНИЕ НАУКА И ИННОВАЦИОННЫЕ ИДЕИ В МИРЕ. – 2025. – Т. 82. – №. 2. – С. 98-102.
10. O’rmonovna X. X. TEACHING METHODOLOGY OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES BASED ON A CREATIVE APPROACH //ОБРАЗОВАНИЕ НАУКА И ИННОВАЦИОННЫЕ ИДЕИ В МИРЕ. – 2025. – Т. 82. – №. 2. – С. 71-76.