

УДК 534.29

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ЧЕРЕЗ СТРУКТУРЫ С РАЗЛИЧНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ

П.В. КАМЛАЧ, А.В. БУДНИК, В.М. БОНДАРИК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 26 марта 2008

Рассмотрены особенности распространения ультразвуковой волны в средах с различной акустической добротностью. Определены коэффициенты отражения и прохождения ультразвуковой волны для сред с различными акустическими импедансами. Построена и реализована в среде MatLab модель прохождения ультразвука через многослойные структуры. Проведена проверка построенной математической модели.

Ключевые слова: моделирование, ультразвук, интенсивность, акустическая добротность.

Введение

В настоящее время использование ультразвука (УЗ) получило широкое распространение в технике и медицине [1]. Постоянно ведется разработка новых и оптимизация уже существующих методов акустического воздействия, что требует проведения большого числа экспериментов. Однако в связи с высокой стоимостью материалов и оборудования, а также особенностями исследуемых объектов при проведении экспериментов возникает множество трудностей. В ряде случаев выполнить натурные исследования в лабораторных условиях практически невозможно.

Данную проблему можно решить с помощью современных методов компьютерного моделирования, которые при минимальных затратах времени и материальных средств позволяют изучать и исследовать различные процессы и явления. Применение моделирования воздействия активизирующими факторами на среды позволяет существенно сократить трудоемкость и одновременно повысить информативность результатов исследований, а также получить визуальное представление о процессах и явлениях, увидеть и изучить которые практически невозможно даже с помощью уникальных приборов.

Благодаря таким качествам среды *MatLab*, как интегрированная разработка алгоритмов, возможность генерации кода и большое количество функций анализа данных, реализация разработанных математических моделей в данной среде значительно упрощается и ускоряется. С помощью *MatLab* можно проверять идеи, просчитывать допуски и генерировать решения, удовлетворяющие самым требовательным запросам [2].

Большинство объектов в технике и медицине, например, электронные приборы, органы человека и т.п., можно представить в виде модели многослойных структур с различной акустической добротностью. Оценивая изменение параметров акустических волн при прохождении через такие структуры можно судить о свойствах этих структур [3].

Целью данной работы являются разработка математической модели прохождения ультразвуковой волны через структуры с различной акустической добротностью, разработка в среде *MatLab* программного комплекса для моделирования и верификация построенной модели.

Распространение ультразвука в среде

Распространение УЗ — это процесс перемещения в пространстве и во времени возмущений, имеющих место в волне. Среда, в которой распространяется звук, вступает во взаимодействие с проходящей через него энергией и часть ее поглощает. Преобладающая часть поглощенной энергии преобразуется в тепло, меньшая часть вызывает в передающем веществе структурные изменения. Поглощение зависит от частоты и акустической добротности УЗ колебаний. Величину поглощения можно характеризовать коэффициентом поглощения, который показывает, как изменяется интенсивность звука в облучаемой среде.

В процессе распространения плоских акустических волн в среде интенсивность звука I уменьшается по мере удаления от источника излучения согласно формуле [1]

$$I = I_0 e^{-2\alpha x}, \quad (1)$$

где I_0 — начальная интенсивность, x — расстояние от источника, α — коэффициент поглощения УЗ в среде.

При распространении УЗ в средах наблюдаются также такие явления, как их рассеяние, преломление и отражение. Если в среде имеются неоднородности, то происходит рассеяние УЗ, которое может существенно изменить простую картину его распространения и, в конечном счете, также вызвать затухание волны в первоначальном направлении распространения [4].

Таким образом, характер распространения УЗ определяется инерционными и упругими свойствами среды, а также действующими в ней механизмами потерь. Плотность и сжимаемость среды определяют скорость звука, пространственные изменения которой приводят к рефракции акустических волн. Пространственные флуктуации либо плотности, либо сжимаемости (совместно эти величины определяют удельный акустический импеданс), либо поглощения звука вызывают рассеяние или отражение волн. Затухание, т.е. полная потеря акустической энергии в среде, определяется суммарным действием рефракции, отражения, рассеяния и поглощения звука.

Затухание УЗ за счет действия любого из указанных выше механизмов потерь приводит к появлению в уравнении дополнительного постоянного множителя, приведенного к единичной длине пути. В результате для плоской волны, распространяющейся вдоль оси x , можно записать

$$I(x, t) = I e^{-\alpha x} e^{i\omega(t - x/c)}, \quad (2)$$

где t — время от начала процесса распространения волны, ω — циклическая частота акустических колебаний, c — скорость звука.

В реальных ситуациях редко приходится иметь дело с идеальными плоскими волнами, поэтому помимо указанных механизмов потерь почти всегда имеют место дополнительные потери интенсивности УЗ, связанные с перераспределением энергии в дифракционном поле источника. Потери акустической энергии, обусловленные дифракцией и называемые дифракционными потерями, могут приводить к погрешности результатов измерения затухания или рассеяния в среде. Кроме того, связанные с дифракцией изменения фазовых соотношений также приводят к погрешности при измерениях скорости УЗ. При обработке экспериментальных данных необходимо учитывать влияние этих погрешностей на результаты измерений, вводя так называемые дифракционные поправки.

При моделировании прохождения УЗ через двухслойные структуры (рис. 1) с различной акустической добротностью необходимо учитывать скорости распространения ультразвука в средах, удельные волновые сопротивления, углы падения, отражения и преломления УЗ волны.

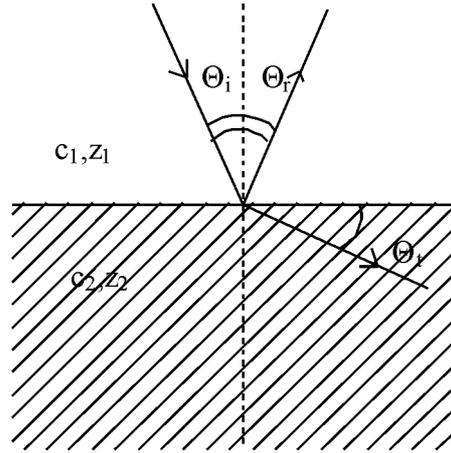


Рис. 1. Схема падения луча на плоскую поверхность: c_1, c_2 — скорости распространения ультразвука в средах; Z_1, Z_2 — удельные волновые сопротивления; $\Theta_i, \Theta_r, \Theta_t$ — углы падения, отражения и преломления УЗ волны

Учитывая эти параметры давления для падающей, проходящей и отраженной вдоль оси волны равны [5]:

$$P_1 = \rho_1 c_1 v_1, \quad P_2 = \rho_2 c_2 v_2, \quad P_3 = -\rho_1 c_1 v_3, \quad (3)$$

где ρ_1, ρ_2 — плотности сред, c_1, c_2 — скорости распространения УЗ в средах, v_1, v_2, v_3 — скорости падающей, проходящей и отраженной волн соответственно.

С учетом того, что удельные волновые сопротивления сред равны:

$$Z_1 = \rho_1 c_1; \quad Z_2 = \rho_2 c_2, \quad (4)$$

можно записать

$$\left. \begin{aligned} P_1 + P_3 &= P_2 \\ \frac{(P_1 - P_3)}{Z_1} &= \frac{P_2}{Z_2} \end{aligned} \right|_{x=0}. \quad (5)$$

Коэффициенты отражения R и прохождения T по давлению для случая нормального падения плоской бегущей волны на плоскую границу раздела двух сред с импедансами Z_1, Z_2 :

$$R = \frac{P_3}{P_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (6)$$

$$T = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad (7)$$

Из (6) видно, что величина P_3/P_1 может быть как положительной, так и отрицательной в зависимости от соотношения Z_1 и Z_2 . Отражение от границы, на которой характеристический импеданс уменьшается, приведет к изменению фазы отраженного сигнала: сжатие среды выразится в виде положительного избыточного давления и наоборот. Акустическое давление в прошедшей волне, напротив, всегда будет в фазе с падающей на границу волной (7).

Соответствующие выражения для коэффициентов отражения r и прохождения t по интенсивности имеют вид:

$$r = \frac{I_3}{I_1} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2, \quad (8)$$

$$\tau = \frac{I_2}{I_1} = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}, \quad (9)$$

где I_1 , I_2 и I_3 — средние по времени интенсивности падающей, прошедшей и отраженной волн.

Для фронта плоской волны, падающей под углом Θ к плоскости раздела двух сред, справедливы следующие выражения для коэффициентов отражения и прохождения по интенсивности:

$$r_0 = \left(\frac{Z_2 \cos \Theta - Z_1 \cos \varphi}{Z_2 \cos \Theta + Z_1 \cos \varphi} \right)^2, \quad (10)$$

$$\tau_0 = \frac{4Z_2Z_1 \cos \Theta \cos \varphi}{(Z_2 \cos \Theta + Z_1 \cos \varphi)^2}. \quad (11)$$

В случае, когда фронт плоской волны нормально падает на плоскопараллельный слой среды "2", разделяющий среды "1" и "3", коэффициент прохождения энергии в среду "3" равен:

$$\tau = \frac{4Z_3Z_1}{(Z_3 + Z_1)^2 \cos^2 k + (Z_2 + Z_3Z_1/Z_2)^2 \sin^2 k}, \quad (12)$$

где $k=2\pi h/\lambda_2$; h — толщина слоя, λ_2 — длина звуковой волны в среде "2".

Можно рассмотреть это выражение в нескольких случаях, имеющих практическое значение. В частном случае $Z_1 \gg Z_2 \ll Z_3$ (тонкий слой газа на границе раздела) в знаменателе будет преобладать второй член, и коэффициент пропускания оказывается очень малым. На практике это означает, что неплотно прилегающий к озвучиваемой среде акустический датчик значительно снижает чувствительность используемого прибора.

Выражение также упрощается при $\cos k=1$ или $\sin k=1$.

В первом случае $h = n\lambda_2$, где n — целое число (или нуль), т.е. при этом

$$\tau = 4Z_1Z_3/(Z_1 + Z_3)^2, \quad (13)$$

и прохождение через такой "полуволновой" слой не зависит от его материала.

В другом случае, когда $h=(2n-1)\lambda_2/4$:

$$\tau = 4Z_3Z_1/(Z_2 + Z_1Z_3/Z_2)^2. \quad (14)$$

Отсюда, выбирая $Z_2 = \sqrt{Z_1Z_3}$, можно получить $\tau=1$, т.е. полное прохождение через "четвертьволновую пластинку", которая служит трансформатором импеданса. Это важно при оптимизации акустического контакта между твердым материалом преобразователя и жидкой средой.

Типичные значения плотности среды ρ , скорости звука c и характеристического импеданса Z для некоторых веществ перечислены в [4].

Моделирование

В среде *MatLab* по уравнениям прохождения ультразвука через структуры с различной акустической добротностью (2), (12) была создана программа "*USPropagation*" для расчета изменения интенсивности акустических колебаний при прохождении через многослойную структуру. В программе исходными данными для моделирования являются: количество анализируемых слоев, частота и интенсивность воздействующего излучения, параметры сред распространения (рис. 2). Для большей наглядности в диалоговом окне программы расположено графическое изображение моделируемой структуры, которое активизируется при нажатии на кнопку "Построить". При нажатии на кнопку "Рассчитать" производится расчет модели и визуализация полученных результатов.

При описании слоя структуры можно выбрать его толщину и тип. Возможен выбор типа слоя из заданных в программе, а также добавление других слоев с известными или исследованными параметрами отклика на акустическую волну.

Разработанная программа позволяет уточнять построенные зависимости вспомогательными надписями и изображениями. При необходимости можно увеличить построенную зависимость и сохранить в виде картинки для дальнейшего анализа.

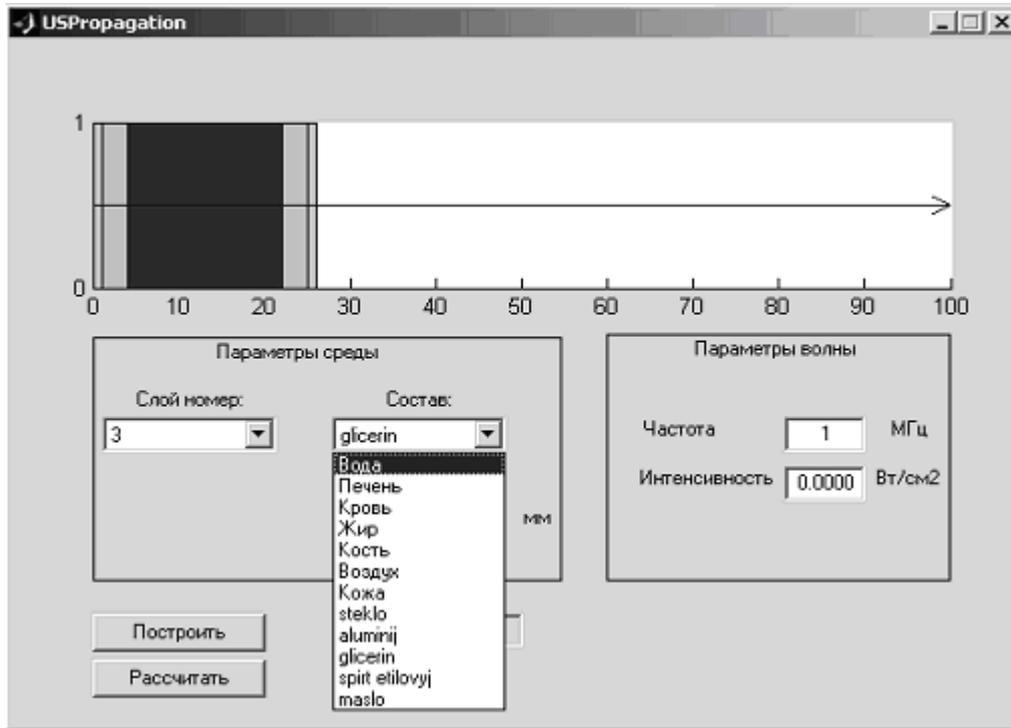


Рис. 2. Моделируемая структура в программе

Экспериментальные исследования

Для проверки модели был разработан лабораторный макет (рис. 3), состоящий из: генератора ГЗ-110, двухлучевого осциллографа С1-75, входного (1) и выходного (5) акустоэлектронных преобразователей, которые размещались на стенках кюветы (2 и 4) с жидкой средой (3), резисторов R_1 и R_2 .

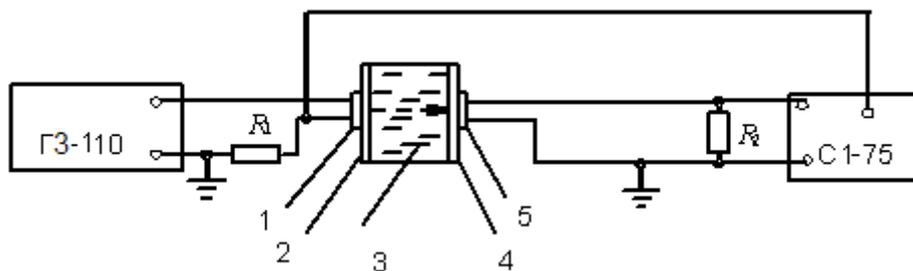


Рис. 3. Лабораторный макет для проверки программы "USPropagation"

На акустоэлектронный преобразователь 1 с генератора подавался синусоидальный сигнал частотой 1 МГц (2 МГц) и амплитудой 0,2 В. После прохождения через кювету с исследуемой жидкостью акустическая волна изменяла свои характеристики и попадала на акустоэлек-

тронный преобразователь (5). Электрический сигнал с данного преобразователя поступал на нагрузку R_n . Амплитуда прошедшего сигнала фиксировалась на осциллографе.

При моделировании прохождения ультразвука через структуры с различной акустической добротностью начальная интенсивность ультразвука, задаваемая в программе, рассчитывалась по формуле:

$$I_S = \frac{UU_R\beta}{R_1S}, \quad (15)$$

где U — напряжение на ультразвуковом преобразователе 1 (0,2 В), U_R — напряжение на резисторе R_1 ($1,5 \cdot 10^{-2}$ В), R_1 — сопротивление резистора R_1 (100 Ом), S — площадь датчика (1 см^2), β — коэффициент электромеханической связи (0,35).

Для заданных условий начальная интенсивность ультразвуковых колебаний составила $I_S = 29 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/см}^2$.

Интенсивность прошедшего звука определялась по формуле:

$$I = \frac{U_R^2}{R_2S\beta}, \quad (16)$$

где U_R — падение напряжения на нагрузке R_2 ; S — площадь датчика; β — коэффициент электромеханической связи.

В программе "USPropagation" была смоделирована кювета, которая состояла из пяти слоев: электрод (1) – стекло (2) – жидкая среда (3) – стекло (4) – электрод (5) (рис. 3, 4).

В качестве жидкой среды использовались различные вещества: вода, масло, спирт этиловый, глицерин и др.

Данные, полученные при моделировании (рис. 4), и измерения на лабораторном макете сведены в таблицу, где K — коэффициент затухания.

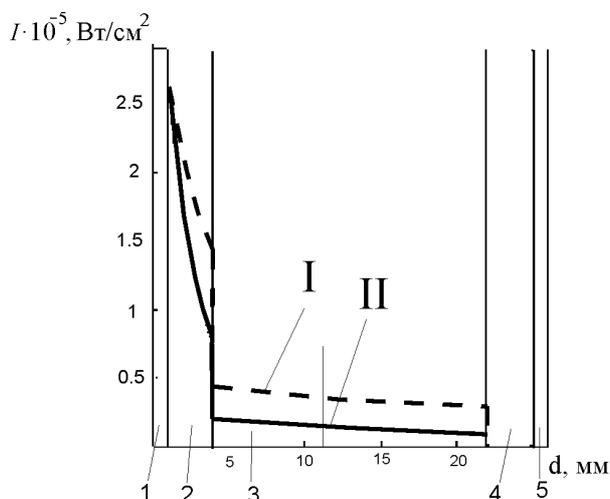


Рис. 4. Изменение интенсивности акустических колебаний при прохождении через кювету с водой на частоте: I — 1 МГц и II — 2 МГц

Результаты верификации математической модели

Вещество	Интенсивность, $I \cdot 10^{-9} \text{ Вт/см}^2$							
	$f=1 \text{ МГц}$				$f=2 \text{ МГц}$			
	измер.	модел.	откл, %	K	измер.	модел.	откл, %	K
Вода	422	430	2	69	61	66	8	475
Спирт	239	248	4	121	46	50	9	630
Масло	469	453	3	62	60	58	3	483
Глицерин	493	522	6	58	65	68	4	446

Расчетные значения интенсивностей ультразвука, прошедших сквозь исследуемую структуру, незначительно отличаются от полученных экспериментальных данных. Полученные различия можно объяснить погрешностью измерений и тем, что в используемой математической модели не учитываются неоднородности внутри исследуемых слоев.

Таким образом, разработана математическая модель прохождения ультразвука через структуры с различной акустической добротностью, учитывающая частотные и волновые свойства УЗ колебаний. Разработанная модель реализована в пакете *MatLab* как отдельное приложение. Модель позволяет по желанию пользователя настраивать параметры сред и оценивать интенсивность колебаний в любой точке любого из заданных слоев.

Разработанная модель может служить точным и удобным инструментом для анализа воздействия УЗ колебаний на различные среды. С использованием разработанной модели планируется спроектировать акустоэлектронный прибор для оценки коагулометрических параметров крови. Модель также может применяться для исследовательских целей и в качестве обучающего инструмента.

MODELLING OF PASSAGE OF THE ACOUSTIC WAVE THROUGH STRUCTURES WITH VARIOUS ACOUSTIC GOOD QUALITY

P.V. KAMLACH, A.V. BUDNIK, V.M. BONDARIK

Abstract

Features of distribution of an ultrasonic wave in environments with various acoustic good qualities are considered. Factors of reflection and passage of an ultrasonic wave for environments with various acoustic impedances are determined. The model of passage of ultrasound through multilayered structures is constructed and realized in *MatLab*. Check of the constructed mathematical model is carried out.

Литература

1. Хилл К. Применение ультразвука в медицине. Физические основы. М., 1989.
2. Виноградова И.И. // Цифровая обработка сигналов. Москва. 1999. №1. С. 54-58.
3. Бондарик В.М., Камлач П.В. // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств. Новополоцк, 2006. Т. 1. С. 267–271.
4. Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н. Основы физики и техники ультразвука. М., 1987.
5. Бондарик В.М., Ланин В.Л. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. Кишинев. 1998. № 3–4. С. 33–37.