

01.1;10.5

Математическое моделирование способа управления параметрами и местоположением фокального пятна в ультразвуковой хирургии

© Е.Г. Домбругова, Н.Н. Чернов

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия
E-mail: yhelloworld@yandex.ru

Поступило в Редакцию 30 декабря 2020 г.

В окончательной редакции 2 февраля 2022 г.

Принято к публикации 20 марта 2022 г.

Проведено исследование способов корректировки местоположения фокального пятна, формируемого антенными решетками, имеющими форму сферического сегмента с разным углом раскрытия, в слоисто-неоднородной биологической среде. Использование величины среднетолщинной скорости звука в биологических тканях в качестве расчетной для согласующего слоя позволяет получить удовлетворительные результаты корректировки местоположения фокального пятна, формируемого антенными решетками с углом раскрытия сферического сегмента θ , равным 60, 90 и 120°. Предложен алгоритм корректировки местоположения фокального пятна на основе изменения физических характеристик согласующего слоя.

Ключевые слова: среднетолщинная скорость звука, фокусированный ультразвук, фокальное пятно, согласующий слой, способ управления.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.10.52547.18676

Среда распространения мощного фокусированного ультразвука, применяемого в хирургических целях, имеет слоисто-неоднородную структуру, представленную согласующим жидкостным слоем, кожей, жировой и мышечной тканью. В табл. 1 приведены данные из литературных источников [1,2] об акустических характеристиках перечисленных слоев. При формировании фокусированного ультразвукового поля в слоисто-неоднородной биологической среде происходит изменение геометрии и местоположения фокального пятна, а также амплитуды акустического давления в фокусе. Это влияет на эффективность и безопасность применения мощного фокусированного ультразвука в медицинской хирургии. Актуальной является задача разработки способа точного наведения ультразвукового фокуса, корректировки его местоположения и параметров фокального пятна при прохождении через слоистую биологическую структуру с учетом особенностей строения тела пациента. Цель работы — оценить эффективность способа корректировки местоположения фокального пятна, основанного на изменении физических характеристик согласующего слоя, рассчитанных по среднетолщинной скорости звука в биологических тканях, для антенных решеток с углами раскрытия сферического сегмента $\theta = 60, 90$ и 120° .

В работах [3,4] исследован способ управления формированием фокального пятна на основе изменения физических параметров согласующего жидкостного слоя, заключенного в силифон. Для изменения скорости звука в согласующем слое в [3,4] предлагается использовать раствор глицерина в дистиллированной воде. По рассчитанной концентрации раствора определяются параметры плотности и коэффициента затухания ультразвуковых

волн. В [4] предложен метод расчета требуемых параметров согласующего слоя на основе вычисления среднетолщинной скорости звука c_{avt} в биологических тканях. Для этого необходимо знать толщины и скорость звука в каждом слое на пути распространения ультразвуковых волн:

$$c_{avt} = (h_2c_2 + h_3c_3 + h_4c_4)/(h_2 + h_3 + h_4),$$

где c_n — скорость звука в слое, h_n — толщина слоя, n — порядковый номер слоя (1 — согласующий жидкостный слой, 2 — кожная ткань, 3 — жировая ткань, 4 — мышечная ткань).

При выводе формулы для определения среднетолщинной скорости звука в работе [4] были использованы следующие упрощения: слои биологических тканей считались плоскими и параллельными, угол наклона акустических лучей относительно границы раздела сред не превышал 30° . Однако антенные решетки, используемые для медицинской хирургии, не ограничиваются малыми углами наклона излучателей [5,6]. Изменения в геометрии и положении фокального пятна зависят не только от структуры слоисто-неоднородной биологической среды, но и от угла раскрытия сферического сегмента антенной решетки θ . Поэтому необходимо оценить эффективность применения данного метода расчета параметров согласующего слоя для управления местоположением фокального пятна, создаваемого антенными решетками с углом $\theta > 60^\circ$.

С использованием модели, описанной в [3], было проведено математическое моделирование прохождения сфокусированного ультразвукового поля через слоистые биологические среды. Для сравнения были выбраны сочетания биологических слоев (СБС), харак-

Таблица 1. Акустические характеристики среды распространения ультразвука (по данным [1,2])

Среда распространения	Скорость звука c , m/s	Плотность среды ρ , kg/m ³	Коэффициент затухания α , m ⁻¹ (при $f = 2$ MHz)
Дистиллированная вода (при 22°C)	1489	1000	0.12
Глицерин (при 20°C)	1923	1261	2.33
Кожная ткань	1610	1250	80
Жировая ткань	1450	930	26
Мышечная ткань	1570	1070	40

Таблица 2. Сочетания толщин слоев и расчетные параметры согласующего слоя, обеспечивающие корректировку местоположения фокального пятна

Обозначение слоистой системы	Соотношение толщин слоев, mm	Параметры согласующего слоя			
		Скорость звука c_{avr} , m/s	Концентрация раствора глицерина в воде k_v^* , %	Плотность ρ^* , kg/m ³	Коэффициент затухания α^* , m ⁻¹ (при $f = 2$ MHz)
СБС 1	138–2–30–30	1513	5.7	1015	0.25
СБС 2	138–2–10–50	1552	14.6	1038	0.44
СБС 3	108–2–60–30	1493	0.9	1002	0.14
СБС 4	188–2–5–5	1527	8.8	1023	0.31

терные для различной комплекции пациентов, а также для локализации новообразования в подкожных тканях. В табл. 2 представлены соотношения толщин слоев и расчетные параметры согласующего слоя, необходимые для корректировки местоположения фокального пятна. Для расчетов слои биологической ткани принимаются плоскими и параллельными. В табл. 2 и далее условно принято буквенно-цифровое обозначение сочетаний биологических слоев: СБС 1 — нормальное телосложение, СБС 2 — атлетическое телосложение, СБС 3 — тучная комплекция, СБС 4 — подкожное новообразование. Условное обозначение соотношения толщин слоев в табл. 2 представлено последовательностью чисел (в mm): согласующего слоя от центра антенной решетки, кожной ткани, жировой ткани, мышечной ткани.

Исследованы три вида антенных решеток с радиусом поверхности 200 mm с углом раскрытия сферического сегмента $\theta = 60, 90$ и 120° (максимальным углом наклона излучателей $30, 45$ и 60° соответственно). Излучатели в форме диска, расположенные на поверхности антенных решеток произвольным образом, имели диаметр 8 mm. Для антенных решеток был обеспечен равный процент активной площади поверхности. Таким образом, с ростом угла раскрытия сферического сегмента θ антенной решетки количество излучателей увеличивалось и составляло соответственно 321, 703 и 1200 штук. Исследования акустического поля проводились в двух взаимно перпендикулярных направлениях: по оси x — вдоль направления распространения ультразвуковых волн, по оси y — через максимум распределения амплитуды акустического давления (в „точке“

фокуса). Шаг исследования по оси x составил 0.05 mm, а по оси y — 0.025 mm. Для расчетов использованы следующие параметры: частота излучения $f = 2$ MHz, шаг исследования по времени 10^{-8} s, длительность сигнала 10^{-3} s.

Расчеты акустического поля проводились для случая распространения ультразвуковых волн в однородной среде — дистиллированной воде, а также для случая распространения через сочетания биологических слоев, указанных в табл. 2. Для сравнения были выбраны следующие способы корректировки местоположения фокального пятна: с помощью согласующего слоя с акустическими характеристиками, рассчитанными по среднетолщинной скорости звука (СРТ), путем введения фазового распределения по элементам антенной решетки (ФАЗ), а также комбинацией двух указанных выше способов (КОМБ) [3,7]. Сравнение исследуемых способов корректировки проводилось по следующим характеристикам акустического поля: 1) отклонение „точки“ фокуса от геометрического фокуса антенной решетки; 2) продольные и поперечные размеры фокального пятна (по уровню 0.707 от максимального значения амплитуды акустического давления); 3) амплитуда акустического давления в „точке“ фокуса.

В табл. 3 приведены величины отклонения „точки“ фокуса Δx от геометрического фокуса антенной решетки вдоль направления распространения ультразвуковых волн и продольные размеры фокального пятна Δl . С ростом угла раскрытия сферического сегмента θ антенной решетки продольный размер фокального пятна Δl уменьшается.

Таблица 3. Отклонение Δx „точки“ фокуса от геометрического фокуса антенной решетки и продольные размеры фокального пятна Δl

Среда распространения (способ корректировки)	Угол раскрыва сферического сегмента антенной решетки					
	$\theta = 60^\circ$		$\theta = 90^\circ$		$\theta = 120^\circ$	
	$\Delta x, \text{ mm}$	$\Delta l, \text{ mm}$	$\Delta x, \text{ mm}$	$\Delta l, \text{ mm}$	$\Delta x, \text{ mm}$	$\Delta l, \text{ mm}$
Однородная среда	-0.05	4.7	0	2.2	0	1.3
СБС 1*	-1.55	4.45	-1.5	2.15	-1.75	1.8
СБС 1 (СРТ)	-0.45	4.55	-0.2	2.2	-0.25	1.5
СБС 1 (ФАЗ)	-0.35	4.45	-0.05	2.25	0	1.5
СБС 1 (КОМБ)	-0.4	4.55	-0.05	2.25	0	1.5
СБС 2*	-3.25	4.45	-3.6	2.25	-3.75	2.15
СБС 2 (СРТ)	-0.45	4.8	-0.15	2.35	-0.15	1.65
СБС 2 (ФАЗ)	-0.35	4.55	-0.15	2.3	-0.05	1.6
СБС 2 (КОМБ)	-0.4	4.8	-0.15	2.35	-0.05	1.6
СБС 3*	-0.65	4.4	-0.55	2.2	-0.65	1.65
СБС 3 (СРТ)	-0.4	4.45	-0.2	2.25	-0.3	1.65
СБС 3 (ФАЗ)	-0.3	4.45	-0.05	2.25	0	1.6
СБС 3 (КОМБ)	-0.35	4.45	-0.05	2.25	-0.05	1.6
СБС 4*	-0.7	4.35	-0.5	2.1	-0.65	1.25
СБС 4 (СРТ)	-0.4	4.65	-0.1	2.2	-0.1	1.3
СБС 4 (ФАЗ)	-0.3	4.4	-0.1	2.1	0	1.25
СБС 4 (КОМБ)	-0.35	4.65	-0.05	2.2	0	1.35

* Данные получены без корректировки.

На рисунке показаны контуры фокальных пятен по уровню 0.707 от амплитуды акустического давления в „точке“ фокуса, создаваемых антенной решеткой с углом раскрыва $\theta = 120^\circ$. Для наглядности под каждым контуром размещена его проекция на ось x и отмечен максимум амплитуды акустического давления. Из рисунка видно, что при отсутствии корректировки местоположения фокального пятна величина его смещения Δx оказывается соизмеримой с его продольным размером Δl .

Поперечные размеры фокального пятна Δh при распространении ультразвукового поля в слоисто-неоднородных биологических средах с корректировкой и без корректировки местоположения фокального пятна составляют 0.75–0.8 mm при $\theta = 60^\circ$, 0.55–0.6 mm при $\theta = 90^\circ$ и 0.45–0.55 mm при $\theta = 120^\circ$. Применение различных способов корректировки местоположения фокального пятна незначительно влияет на изменение поперечного размера фокального пятна Δh (на величину до 0.025 mm).

Для антенных решеток с $\theta = 60^\circ$ применение способа корректировки местоположения фокального пятна, основанного на изменении физических характеристик согласующего слоя (СРТ и КОМБ), по сравнению с фазовым способом (ФАЗ) дает дополнительное ослабление амплитуды акустического давления в фокусе до 5.3%. При увеличении угла раскрыва сферического сегмента θ до 120° данная разница в амплитуде акустического давления в фокусе сокращается.

Математическое моделирование показало, что применение различных способов корректировки местоположе-

ния фокального пятна дает результаты с незначительной разницей в величине смещения „точки“ фокуса, геометрии фокального пятна и амплитуде акустического давления в фокусе.

Исследованный метод расчета параметров согласующего слоя, основанный на вычислении среднетолщинной скорости распространения звука в биологических тканях, позволяет получить удовлетворительные результаты корректировки местоположения фокального пятна. Данный метод расчета применим для антенных решеток с углами раскрыва сферического сегмента $\theta = 60, 90$ и 120° . Для практического использования данного способа корректировки местоположения фокального пятна предлагается следующий алгоритм.

1. Позиционирование антенной решетки под углом 90° к объекту воздействия для определения структуры слоев биотканей эхолокационным методом.

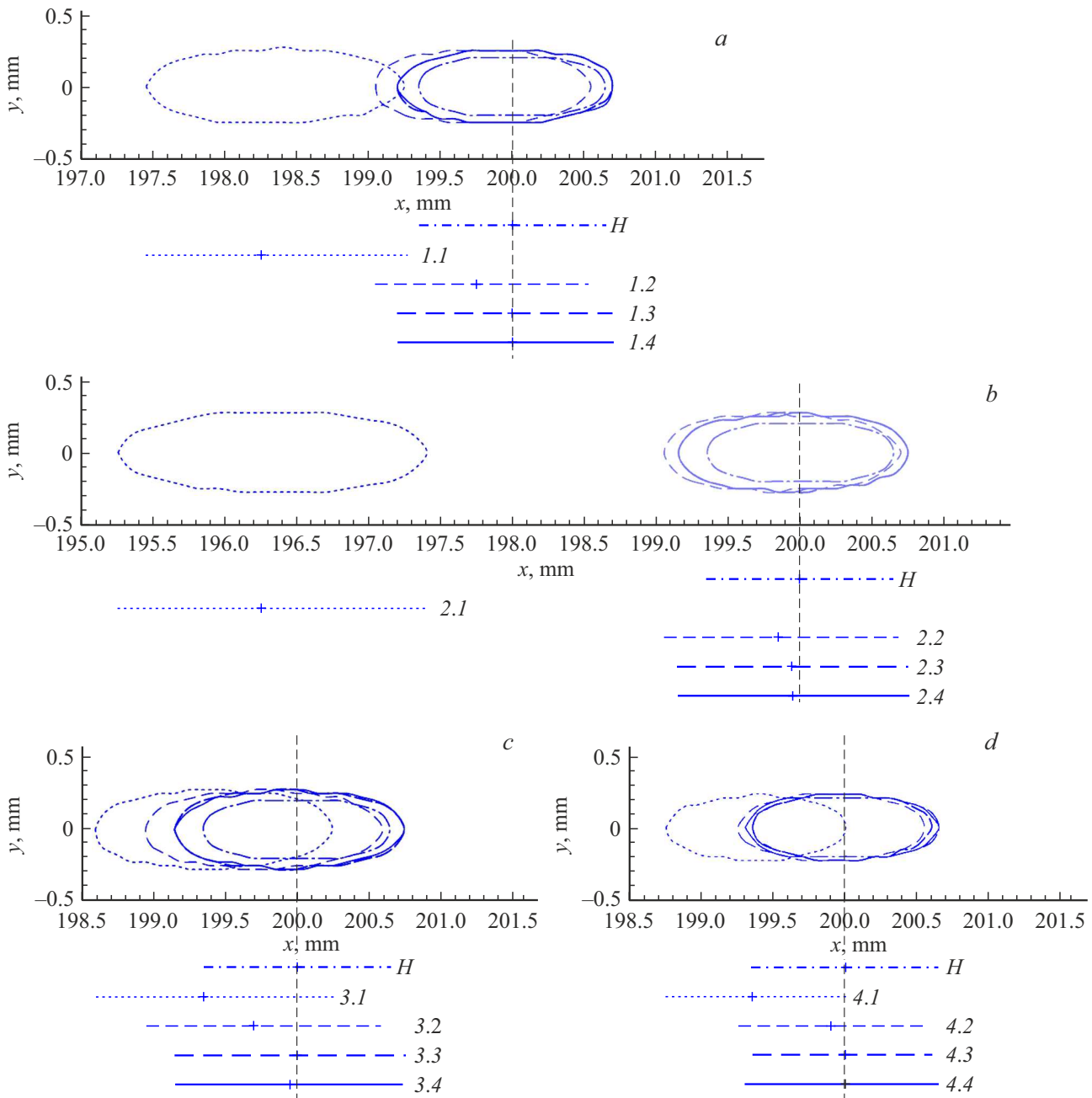
2. Оценка времени распространения ультразвуковых волн по каждому биологическому слою до области воздействия.

3. Вычисление толщины биологических слоев по известным значениям скорости и времени распространения звука в них.

4. Расчет среднетолщинной скорости звука в биологических тканях до области воздействия.

5. Расчет концентрации раствора глицерина в дистиллированной воде для согласующего слоя по полученному значению среднетолщинной скорости звука.

Использование величины среднетолщинной скорости звука в биологических тканях существенно упрощает задачу нахождения параметров согласующего слоя, обес-



Изменение формы и местоположения фокального пятна, создаваемого антенной решеткой с углом $\theta = 120^\circ$, при применении различных способов его корректировки. Контуры фокальных пятен и их проекции на ось x для каждого из сочетаний биологических слоев и способов корректировки имеют цифровое обозначение. Первая цифра соответствует порядковому номеру сочетания биологических слоев: 1 — СБС 1, 2 — СБС 2, 3 — СБС 3, 4 — СБС 4; вторая цифра — способ корректировки местоположения фокального пятна: 1 — без корректировки, 2 — СРТ, 3 — ФАЗ, 4 — КОМБ. Литерой H обозначены фокальное пятно и его проекция на ось x для однородной среды.

печивающих корректировку местоположения фокального пятна в слоисто-неоднородных биологических средах.

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.К. Кикоин, *Таблицы физических величин. Справочник* (Атомиздат, М., 1976).
- [2] В.А. Березовский, Н.Н. Колотилов, *Биофизические характеристики тканей человека. Справочник* (Наук. думка, Киев, 1990).

- [3] Е.Г. Домбругова, Н.Н. Чернов, В сб. тр. *XIV Всероссий. науч.-техн. конф. „Медицинские информационные системы“ (МИС-2016)*, под ред. В.И. Тимошенко, И.Б. Старченко, С.П. Тарасова, В.Ю. Вишневецкого (Изд-во ЮФУ, Ростов н/Д, 2016), с. 201. https://inep.sfedu.ru/wp-content/uploads/2016/06/29/sb_mis2016_end_itog.pdf
- [4] Е.Г. Домбругова, Н.Н. Чернов, *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, **7**(4), 2 (2019). DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.007
- [5] Л.Р. Гаврилов, *Изв. ЮФУ. Техн. науки*, **148** (11), 208 (2013). <http://old.izv-tn.tti.sfedu.ru/wp-content/uploads/2013/11/29.pdf>
- [6] Л.Р. Гаврилов, *Акуст. журн.*, **56**(6), 844 (2010). http://www.akzh.ru/htm/2010_6.htm
- [7] Л.Р. Гаврилов, Дж.У. Хэнд, *Акуст. журн.*, **46** (4), 456 (2000). http://www.akzh.ru/htm/2000_4.htm