

Возможности динамической фокусировки с помощью многоэлементных решеток с плотным заполнением поверхности элементами для использования в неинвазивной ультразвуковой хирургии

П. Б. Росницкий^{1,*}, Б. А. Высоканов^{2,†}, Л. Р. Гаврилов^{3,‡}, О. А. Сапожников^{1,§}, В. А. Хохлова^{1,¶}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
механико-математический факультет, кафедра высшей алгебры
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 1

³Акустический институт имени акад. Н. Н. Андреева
Россия, 117036 Москва, ул. Шверника, д. 4

(Статья поступила 01.08.2017; Подписана в печать 19.09.2017)

Новые технологии неинвазивной ультразвуковой хирургии, основанные на использовании фазированных решеток и высокоамплитудных нелинейных режимов облучения, требуют обеспечения максимально достижимых интенсивностей ультразвука в фокусе. При заданной апертуре решетки и технических ограничениях на величину интенсивности на ее элементах едва ли не единственной возможностью повышения интенсивности в области фокуса становится максимально плотное расположение элементов на поверхности решетки. В данной работе разработан прототип такой решетки с элементами в виде многоугольников равной площади, со случайным расположением элементов и плотностью заполнения 100% без учета технологического зазора между элементами.

PACS: 43.20.Bi.

УДК: 534.2

Ключевые слова: высокоинтенсивный фокусированный ультразвук, HIFU, ультразвуковая хирургия, фазированная решетка, динамическое фокусирование.

ВВЕДЕНИЕ

В современной медицине широко используются мощные ультразвуковые фазированные решетки для проведения неинвазивных, то есть без прямого хирургического вмешательства, операций по разрушению опухолей внутри тела человека. Такие решетки состоят из большого количества элементов, которые обычно располагаются на сферической оболочке. Было показано, что с помощью решеток со случайным расположением элементов может быть получено значительно более высокое качество распределения ультразвукового поля по сравнению с регулярными решетками [1].

Варьирование амплитуд и фаз на элементах решетки позволяет перемещать фокус электронным образом и создавать многофокусные конфигурации с целью увеличения облучаемого объема ткани. Кроме того, при облучении органов, закрытых ребрами, можно отключать некоторые элементы, чтобы избежать перегрева костей во время лечения. На сегодняшний день активно используются решетки с круглыми элементами, расположенными квази-случайным образом. Это позволяет расширить область электронного смещения фокуса без образования побочных максимумов поля. Однако при этом решетки получают неплотны-

ми, коэффициент заполнения излучающей поверхности решетки составляет около 40–50% [1] (рис. 1,а). Для развития новых технологий неинвазивной ультразвуковой хирургии, основанных на использовании высокоамплитудных нелинейных режимов облучения, необходимо обеспечение максимально достижимых интенсивностей ультразвука в фокусе. Очевидно, что одна из реальных возможностей повысить интенсивность ультразвука в фокусе при фиксированной апертуре и интенсивности на поверхности элементов решетки это увеличить ее излучающую поверхность путем максимально плотной упаковки элементов. Ранее предпринимались попытки некоторого увеличения плотности заполнения с использованием круглых элементов, расположенных, например, на витках многозаходных спиралей Архимеда [2] (рис. 1,б) и элементов в форме ячеек разбиения Вороного, расположенных по спирали Ферма [3] (рис. 1,в).

В данной работе предлагается прототип 512-элементной решетки со случайным расположением элементов на поверхности, которая имеет максимально возможную (100%) плотность заполнения элементами в виде многоугольников равной площади.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для абсолютно плотного заполнения решетки элементами предлагается использовать мозаику с ячейками заданной площади, представленную в работе [4], которая позволяет обойти недостатки решетки в виде ячеек разбиения Вороного, а именно, неодинаковость

*E-mail: pavrosni@yandex.ru

†E-mail: vysbor@gmail.com

‡E-mail: gavrilov@akin.ru

§E-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru

¶E-mail: vera@acs366.phys.msu.ru

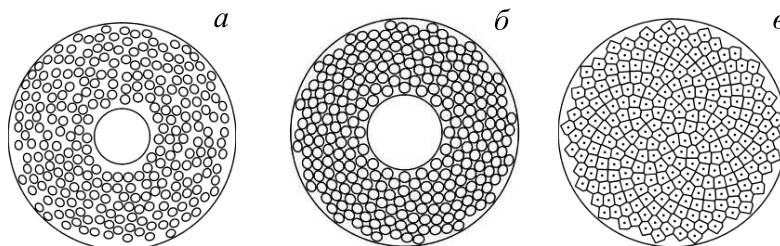


Рис. 1: Эскизы решетки: *а* — со случайным расположением круглых элементов [1], *б* — с элементами в виде 16-заходной спирали [2], *в* — с элементами в виде ячеек разбиения Вороного, расположенных по спирали Ферма [3]

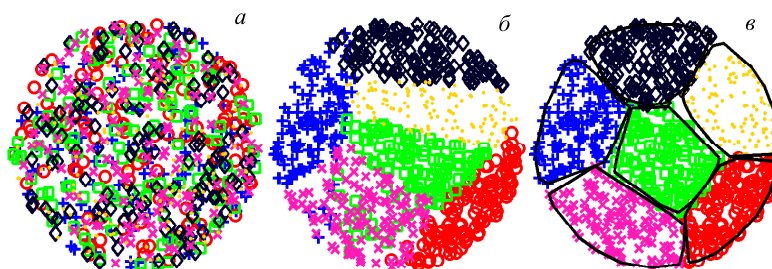


Рис. 2: Иллюстрация последовательности операций для осуществления 100% заполнения поверхности решетки элементами в виде многоугольников с одинаковой площадью. Представлены шесть совокупностей точек, обозначенных плюсами, кружками, крестиками, точками, квадратами и ромбами. *а* — полное перемешивание точек (итерация 0); *б* — начало процесса попарного разделения совокупностей точек разных классов (итерация 1); *в* — завершение процесса разделения совокупностей точек (итерация 4)

площади элементов и разреженность решетки на ее краях. Предлагаемый метод дает возможность разбить поверхность произвольной формы на выпуклые многоугольники одинаковой площади со случайным расположением. В частности, поверхность решетки в виде части сферы может быть разделена на сферические многоугольники равной площади, расположенные случайным образом.

Для иллюстрации метода рассмотрим его пошаговую реализацию при построении шестиэлементной решетки в форме сферического сегмента: 1. Сплошная поверхность решетки заменяется случайным набором большого числа точек, которые случайным образом, равномерно по телесному углу набрасываются на ее поверхность (рис. 2). Иными словами, вероятность попадания одной точки в некоторый элемент площади dS на поверхности решетки с полной площадью S определяется как dS/S и не зависит от положения элемента на сфере. 2. Весь набор точек делится на N классов, каждый из которых содержит M точек (рис. 2,а). В иллюстративном случае $N = 6$, $M = 128$, общее количество точек $NM = 768$.

На рис. 2,а точки шести разных классов отмечены различным типом маркеров: «плюс», «кружок», «крестик», «точка», «ромб» и «квадрат». Деление точек на

классы происходит случайным образом, в связи с чем «облака точек» различных классов оказываются сильно перемешанными (рис. 2,а).

3. Далее происходит итерационный процесс попарного разделения облаков точек разных классов. Наглядным образом его можно представить как «разделение» перемешанных в сосуде N порций различных несмешиваемых жидкостей, каждая из которых состоит из одинакового числа M частиц. Понятно, что конечное состояние после разделения «жидкостей» (рис. 2,в) как раз будет соответствовать разбиению объема «сосуда» на ячейки одинакового размера. Этот процесс подробно разобран в [4], здесь же мы ограничимся его техническим описанием. На каждой итерации рассматриваются все возможные пары облаков точек различных классов. Для примера возьмем облака, отмеченные на рис. 2,а маркерами «+» и «о». Обозначим радиус-векторы точек первого облака как $\mathbf{a}_i$, ($i = 1, \dots, M$), а центр масс облака $(\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 + \dots + \mathbf{a}_M)/M$, спроецированный на поверхность решетки, как $\mathbf{A}$. Аналогично для второго облака точек введем обозначения $\mathbf{b}_j$ и $\mathbf{B}$ ($j = 1, \dots, M$). Для реализации процесса разделения облаков точек рассматриваются все возможные пары точек $(\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_j)$. В том случае если точка $\mathbf{a}_i$ первого облака находится внутри второго, а точка $\mathbf{b}_j$ второго об-

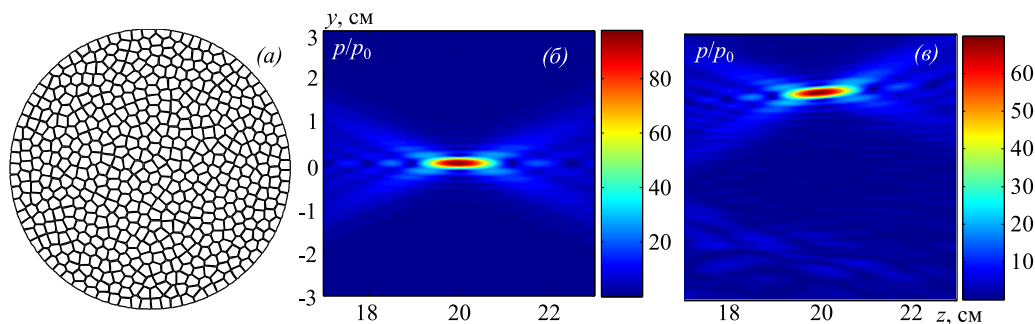


Рис. 3: *a* — Эскиз решетки из 512 элементов в виде сферических многоугольников равной площади со 100% плотностью расположения элементов (без учета технологического зазора между элементами). *б* — Двумерные распределения амплитуды звукового давления в плоскости вдоль оси решетки. Результаты нормализованы на значение давления на поверхности элемента. Слева — фокус находится в центре кривизны решетки; справа — фокус смещен электронным образом на расстояние 2 см в сторону от оси

лака — внутри первого, происходит обмен точками: $\mathbf{a}_i$ присваивается второму классу, а $\mathbf{b}_j$ — первому. В работе [4] введена функция для выявления пар точек, подлежащих обмену:

$$\chi(\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_j) = \rho(\mathbf{a}_i, \mathbf{A})^2 - \rho(\mathbf{a}_i, \mathbf{B})^2 + \rho(\mathbf{b}_j, \mathbf{B})^2 - \rho(\mathbf{b}_j, \mathbf{A})^2. \quad (1)$$

Здесь $\rho(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ — расстояние между двумя точками в сферической метрике, или, другими словами, — длина дуги главной окружности, проходящей через точки $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$.

Если $\chi(\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_j) > 0$, то обмен точками совершается, в противном случае обмена не происходит. После первой итерации облака выглядят уже гораздо менее перемешанными (рис. 2,б), однако следы диффузии все еще наблюдаются. Поэтому итерации продолжают до тех пор пока для всех точек произвольной пары облаков не будет выполнено условие $\chi(\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_j) \leq 0$. Это и означает полное разделение облаков (рис. 2,в). Важно отметить, что после разделения каждое из $N = 6$ облаков содержит одинаковое количество $M = 128$ точек, поскольку обмен точек между облаками всегда был попарным.

4. Чтобы осуществить переход от дискретного представления облаков к непрерывному, для каждого из них строится замыкающая его выпуклая оболочка (рис. 2,г). Понятно, что в случае большого числа точек дискретизации, получившиеся сферические многоугольники как раз и являются ячейками мозаики, абсолютно плотно заполняющей поверхность решетки. По построению, каждая ячейка содержит в себе одинаковое количество M точек, разбросанных случайным образом с равномерным на сфере распределением. Поэтому, согласно методу Монте-Карло, площади ячеек равны.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данной работе предложенный метод используется для создания решетки из $N = 512$ элементов. При

этом на каждый элемент приходится $M = 10240$ точек. Эскиз решетки представлен на рис. 3,а. Она состоит из многоугольников различной формы, которые заполняют всю сферическую поверхность решетки без свободного пространства, а плотность заполнения решетки элементами равна 100% (без учета технологического зазора между элементами). Заметим, что поскольку при построении мозаики происходит многопараметрический процесс рассасывания облаков, каждое из которых состоит из перемешанных случайным образом точек, расположение полученных ячеек мозаики (элементов решетки) оказывается аperiодическим (рис. 3,а). Очевидно, что в реальных решетках необходимо разделить элементы технологическими зазорами, чтобы избежать электрических контактов между ними. Расчеты показывают, что при величине зазора 0.3 мм коэффициент заполнения решетки равен 91.5%, а при 0.5 мм — 86%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена модель многоэлементной фазированной решетки со случайным расположением элементов, имеющей максимально возможную (без учета технологического зазора между элементами — 100%) плотность заполнения элементами в виде многоугольников равной площади. Решетка предназначена для неинвазивного локального разрушения биологических тканей, прежде всего в случаях, когда требуется обеспечение максимально возможной акустической мощности в фокусе решетки при фиксированной апертуре и заданном ограничении интенсивности на поверхности ее элементов. Сверхмощные режимы воздействия полезны, например, для разрушения тканей, расположенных за сильно поглощающими ультразвук препятствиями, такими как кости черепа или грудной клетки. Поверхность решетки и ее граница могут иметь произвольную форму. Решетка может включать центральное отверстие для установки диагностического ультразвуку-

кового датчика для контроля очага воздействия; при этом отверстие также может иметь произвольную форму. Непериодическое расположение излучающих элементов обеспечивает возможность электронного перемещения фокуса в пределах, не меньших чем при ис-

пользовании рандомизированных решеток с более разреженной упаковкой элементов [1, 2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 14-12-00974).

-
- [1] Gavrilov L. R., Hand J. W. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control. 2000. **47**, N 1. P. 125.
[2] Гаврилов Л. Р., Сапожников О. А., Хохлова В. А. Изв. РАН. Сер. Физ. 2015. **79**, № 10. С. 1386.
[3] Ramaekers P., Ries M., Moonen C. T. W., de Greef M. Med.

- Phys. 2017. **44**, N 3. P. 1071. Epub 2017 Feb 13.
[4] Balzer M., Schlomer T., Deussen O. ACM Trans. on Graphics (Proc. of SIGGRAPH). 2009. **28**, N 3. Art. 86.

Dynamic focusing capabilities of fully populated multielement phased arrays for non-invasive ultrasound surgery applications

P. B. Rosnitskiy^{1,a}, B. A. Vysokanov^{2,b}, L. R. Gavrilov^{3,c}, O. A. Sapozhnikov^{1,d}, V. A. Khokhlova^{1,e}

¹Department of Acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

²Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

³N. N. Andreyev Acoustics Institute. Moscow, 117036, Russia

E-mail: ^apavrosni@yandex.ru, ^bvysbor@gmail.com, ^cgavrilov@akin.ru, ^doleg@acs366.phys.msu.ru, ^evera@acs366.phys.msu.ru

New ultrasound surgery applications that are based on the use of multielement phased arrays and high-amplitude nonlinear irradiation regimes require maximum achievable ultrasound intensities at the focus. With the predetermined shape and aperture of the array and intensity at the surface of its elements, the only possibility for increasing focal intensities is a maximally dense packing of the elements at the array surface. In this paper, a prototype of such an ultrasound surgery array with random distribution of elements on its surface has been developed, having the maximum possible (100% without taking into account technological gaps between the elements) density of filling by elements in the form of equal area polygons.

PACS: 43.20.Bi

Keywords: high intensity focused ultrasound (HIFU), ultrasound surgery, phased array, dynamic focusing.

Received 01 August 2017.

Сведения об авторах

1. Росницкий Павел Борисович — аспирант; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: pavrosni@yandex.ru.
 2. Высоканов Борис Александрович — аспирант; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: vysbor@gmail.com.
 3. Гаврилов Леонид Рафаилович — доктор техн. наук, гл. науч. сотрудник; тел.: (499) 723-63-21, доб. 931, e-mail: gavrilov@akin.ru.
 4. Сапожников Олег Анатольевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru.
 5. Хохлова Вера Александровна — доктор физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: vera@acs366.phys.msu.ru.
-