

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ФОКУСА МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ РЕШЕТОК

© 2015 г. С. А. Ильин*, П. В. Юлдашев*, В. А. Хохлова*, Л. Р. Гаврилов**,
П. Б. Росницкий*, О. А. Сапожников*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы

E-mail: sergey_ilyin@acs366.phys.msu.ru

**ОАО "Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева"

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: gavrilov@akin.ru

Поступила в редакцию 19.06.2014 г.

Представлен аналитический подход для расчета и анализа качества трехмерных акустических полей многоэлементных фазированных решеток, используемых в устройствах неинвазивной ультразвуковой хирургии. При вычислении поля решетки использовалось аналитическое решение для дальнего поля каждого из ее элементов. Указанный метод позволяет рассчитывать поля многоэлементных фазированных решеток намного быстрее, чем традиционный метод прямого численного интегрирования, при сохранении высокой точности результатов. На основе развитого подхода рассчитано излучение типичных фазированных решеток и проанализировано качество их динамической фокусировки. Рассмотрены возникающие при этом нежелательные эффекты, состоящие в уменьшении амплитуды в основном максимуме и появлении побочных решеточных максимумов. Проведено сравнение качества динамической фокусировки акустических полей двух практически интересных решеток с квазислучайным расположением элементов, состоящих из 256 и 1024 элементов, а также регулярной решетки из 256 элементов. Исследовано влияние размеров элементов решетки и их расположения на размеры областей, в которых возможно осуществление динамической фокусировки без возникновения сильных побочных максимумов и значительного уменьшения амплитуды давления в основном фокусе.

Ключевые слова: медицинская акустика, ультразвуковая хирургия, фокусировка, дифракция, многоэлементные терапевтические решетки, электронное перемещение фокуса.

DOI: 10.7868/S0320791915010049

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в медицине широко используются ультразвуковые фокусирующие излучатели для проведения неинвазивных (без прямого хирургического вмешательства) операций [1–3]. Для этих целей недавно начали применяться мощные многоэлементные фазированные решетки, позволяющие независимо варьировать амплитуды и фазы элементов, проводить электронное перемещение фокуса и создавать различные комбинации из нескольких фокусов [4].

Многоэлементные фазированные решетки, как правило, состоят из большого числа небольших по размеру элементов, каждый из которых представляет собой отдельный пьезоизлучатель (рис. 1). В зависимости от структуры решетки и формы ее элементов применяются различные методы расчета ультразвуковых полей. Большинство из них основывается на применении интеграла Рэлея [5] и его численном расчете. Для эф-

фективного и быстрого расчета поля всей решетки используются различные методы. Так, например, в работе [4] поле от отдельного элемента решетки рассчитывалось численно, запоминалось и далее использовалось для вычисления суммарного вклада от всех элементов решетки путем геометрического преобразования координат (повороты и сдвиги) с учетом расположения элементов. Расчет параметров поля от отдельного элемента при таком подходе приходится делать в узлах трехмерной прямоугольной сетки. Так как при последующем повороте и смещении указанной сетки ее узлы оказываются не совпадающими с узлами основной координатной сетки, возникает необходимость интерполяции и, как следствие, происходит некоторая потеря точности; в то же время этот метод является достаточно быстрым. Для ускорения расчетов в недавней работе [6] указанный метод использовался с применением графических процессоров компьютера. В случае, когда интерес представля-

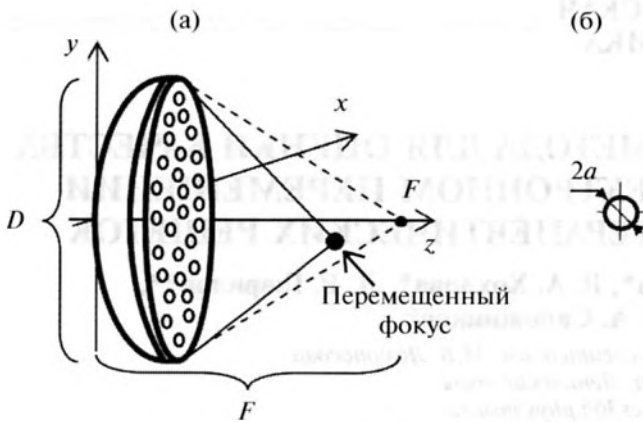


Рис. 1. Общая схема многоэлементной фазированной решетки. (а) Вид на решетку сбоку, (б) эскиз элемента решетки. D – диаметр решетки, F – радиус кривизны поверхности решетки, a – радиус элемента решетки.

ет ближнее поле излучателя, были предложены специальные упрощения, устраняющие сингулярность при использовании интеграла Рэля вблизи поверхности излучателя [7, 8].

В данной работе предлагается использовать метод расчета полей многоэлементных решеток с плоскими круглыми элементами, основанный на применении аналитического решения для интеграла Рэля в дальнем поле каждого из элементов [9]. На примере нескольких типичных многоэлементных решеток показана возможность применения этого метода для быстрого и точного расчета поля в объеме, а также его последующего анализа.

Одним из свойств многоэлементных решеток является возможность электронного перемещения их фокуса. При этом необходимо учитывать возникающие нежелательные побочные эффекты, обусловленные дискретной структурой решеток. В частности, к ним относятся уменьшение амплитуды поля в основном фокусе и появление побочных максимумов [4]. Как было предложено ранее [4, 10–12], степень проявления этих эффектов используется в данной работе как критерий качества создаваемого данной решеткой поля. Для оценки побочных эффектов необходимо проводить измерения или численные расчеты трехмерных полей при различных положениях фокуса решетки, что является трудоемким процессом. Поэтому чаще всего при этом используются большие шаги по перемещению фокуса, а анализ поля производится только в плоскости перемещения фокуса, то есть в плоскости, содержащей ось решетки и сам фокус. При таком подходе существует вероятность пропустить “горячую” точку, лежащую между узлами расчетной сетки или вне плоскости перемещения фокуса.

Используемый в данной работе аналитический метод позволяет рассчитывать поля многоэлементных фазированных решеток намного

быстрее, чем путем прямого численного расчета, при сохранении точности результатов. При этом становится возможным анализировать поля, создаваемые решетками, во всем объеме и с малым шагом перемещения фокуса.

В качестве примера применения метода было проанализировано качество полей, создаваемых двумя фазированными решетками с квазислучайным расположением элементов [4] и одной фазированной решетки с регулярным расположением элементов. Количество элементов в квазислучайных решетках было равно 256 и 1024, регулярная решетка состояла из 256 элементов. Решетка с 256 случайно расположенными элементами (рис. 1) соответствовала ультразвуковому источнику в экспериментальной установке Имперского колледжа Лондона [4] и имела следующие параметры: диаметр $D = 170$ мм, радиус кривизны поверхности $F = 130$ мм, радиус элементов $a = 3.5$ мм, количество элементов 256, рабочая частота $f = 1.0$ МГц. Решетка с регулярным расположением 256 элементов имела те же параметры и отличалась только расположением элементов. Решетка с 1024 элементами имела ту же общую излучающую площадь, что и 256-элементные решетки, соответственно, радиус элементов был в два раза меньшим, $a = 1.75$ мм, частота, диаметр и радиус кривизны поверхности были такими же. Плотность заполнения элементами поверхностей всех решеток составляла 52% для активной части размером 160 мм без учета кривизны поверхности. Таким образом, при одинаковой интенсивности на элементах излучаемая акустическая мощность была одинаковой для всех трех решеток. Схематическое представление расположения элементов рассматриваемых решеток представлено на рис. 2. С использованием аналитического подхода рассматривалась фокусировка в воде, были рассчитаны кривые практически непрерывного перемещения фокуса и проанализировано качество создаваемых полей в объеме. Было рассмотрено также влияние увеличения количества элементов на качество создаваемого поля на примере решетки с 1024 элементами.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Общая схема типичной для использования в неинвазивной хирургии многоэлементной решетки представлена на рис. 1. Решетка представляет собой сферическую чашку, на которой расположены круглые поршневые элементы, нормали к которым направлены в геометрический центр кривизны чашки [4]. Фаза каждого такого элемента может варьироваться независимо. Начало системы координат было выбрано в центре решетки, а ось z направлена вдоль ее оси. Для электронного перемещения фокуса начальная фаза волны для каждого из элементов решетки задавалась с учетом за-

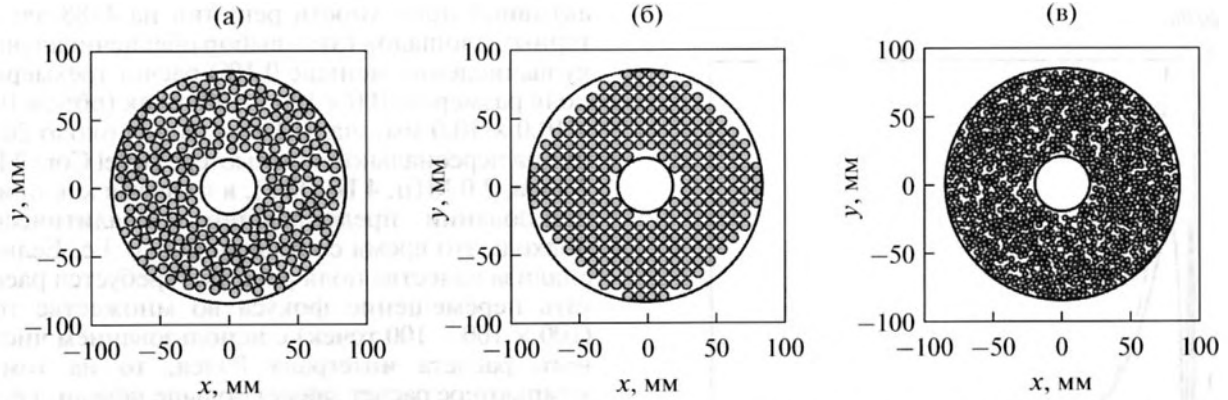


Рис. 2. Иллюстрация расположения элементов рассматриваемых в работе различных типов решеток, вид вдоль оси. (а) Решетка с квазислучайным расположением 256 элементов с радиусом $a = 3.5$ мм, (б) решетка с регулярным расположением 256 элементов того же размера, (в) решетка с квазислучайным расположением 1024 элементов с радиусом $a = 1.75$ мм.

держки прихода волны от центра элемента в создаваемый фокус (рис. 1).

В линейной постановке излучаемое поле всей решетки представляет собой сумму акустических полей от каждого из ее элементов. Акустическое давление, создаваемое j -м элементом, в комплексной форме можно рассчитать с помощью интеграла Рэлея [5]:

$$p_j(\mathbf{r}, t) = -\frac{i\omega\rho_0 e^{-i\omega t}}{2\pi} \int_{S_j} \frac{v_n(\mathbf{r}') e^{ikR}}{R} dS', \quad (1)$$

где i – мнимая единица, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота излучателя, $k = \omega/c_0$ – волновое число, c_0 – скорость звука, ρ_0 – плотность среды, S_j – площадь поверхности элемента, v_n – комплексная амплитуда нормальной компоненты скорости колебаний поверхности излучателя, R – расстояние от участка поверхности dS' до точки наблюдения поля.

Обычно расчет интеграла (1) проводится численно, что требует разбиения поверхности излучателя на достаточно малые участки (гораздо меньше длины волны), из-за чего расчет в общем случае занимает длительное время. Обойти указанную трудность можно, если учесть специфические особенности исследуемых источников. Для терапевтического воздействия представляет интерес область в окрестности геометрического фокуса, расстояние до которого от каждого из элементов решетки гораздо больше длины его ближней зоны: $F \gg z_R$, где $z_R = ka^2/2$. Благодаря этому уже на небольших расстояниях от поверхности решетки точку наблюдения можно считать расположенной в дальней зоне элемента. Как известно, волновое поле в дальней зоне для большинства излучателей с простой геометрией может быть рассчитано аналитически [5]. Это означает, что полное поле решетки можно также рассчитать аналитически, складывая решения

для “дальних полей” отдельных элементов. Такой аналитический подход для расчета акустических полей многоэлементных терапевтических решеток ранее не применялся.

Рассмотрим многоэлементную решетку, состоящую из плоских круглых элементов. Будем считать, что нормальная компонента скорости колебаний постоянна вдоль поверхности каждого элемента (“поршневой” источник). Аналитическое решение для комплексной амплитуды акустического давления в дальней зоне такого элемента известно [5]:

$$p(\theta, r) = -\frac{ip_0 z_R e^{ikr}}{r} \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta}, \quad (2)$$

где $p_0 = \rho_0 c_0 v_n$ – характерное давление на поверхности элемента, r – расстояние от центра элемента до точки наблюдения поля, θ – угол между осью элемента и лучом из центра элемента до точки наблюдения, J_1 – функция Бесселя первого порядка.

Для определения пределов применимости приближения дальнего поля для элемента решетки было проведено сравнение решения (2) с известным точным аналитическим решением для поля плоского круглого элемента вдоль его оси [1, 5]:

$$\frac{p(\theta = 0, r = z)}{p_0} = -2i \exp\left[i\frac{k}{2}(\sqrt{a^2 + z^2} + z)\right] \times \sin\left[\frac{k}{2}(\sqrt{a^2 + z^2} - z)\right]. \quad (3)$$

Здесь z – координата вдоль оси элемента.

Как видно на рис. 3, уже начиная с расстояний $z = 35$ мм от центра элемента решетки ($z_R = 26$ мм) аналитическое решение практически не отличается от точного, различие составляет десятую долю процента. Таким образом, общее поле решетки на больших расстояниях можно рассчитать путем суммирования решений для каждого элемента:

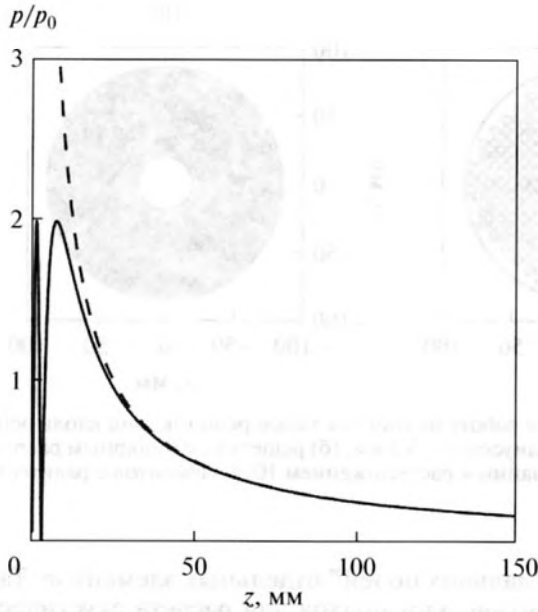


Рис. 3. Сравнение распределений амплитуды давления вдоль оси единичного элемента решетки с радиусом $a = 3.5$ мм: точное аналитическое решение на оси (сплошная линия) и аналитическое решение в дальнем поле излучателя (штриховая линия).

$$p(\mathbf{r}) = \sum_j p_j(\theta_j, r_j), \quad (4)$$

где p_j – вклад по давлению от j -го элемента решетки, (θ_j, r_j) – цилиндрические координаты в локальной системе координат, привязанной к указанному элементу.

Описанный выше новый метод расчета сравнивался с традиционным подходом, основанным на численном нахождении интеграла Рэлея. Поле всей решетки рассчитывалось по следующей формуле, полученной после замены интеграла (1) на соответствующую сумму по малым элементам площади S_j :

$$p(\mathbf{r}) = -\frac{ikp_0}{2\pi} \sum_{S_j} \frac{e^{ikR_j}}{R_j} S_j. \quad (5)$$

Здесь R_j – расстояние от центра каждой элементарной площадки S_j всей поверхности решетки до точки наблюдения. В наших расчетах использовалось разбиение касательной плоскости на треугольники, как, например, в работе [13].

Пространственные распределения поля решеток рассчитывались в воде (скорость звука $c_0 = 1500$ м/с, плотность $\rho_0 = 1000$ кг/м³) на сетке в декартовой системе координат с шагом расчета поля и шагом перемещения фокуса 0.1 мм. Точность и, соответственно, длительность численного расчета по формуле (5) зависели от количества элементарных площадок, на которое делилась поверхность решетки. Например, при разделении

активной поверхности решетки на 4188 элементарных площадок (этот выбор обеспечивал ошибку вычисления меньше 0.1%) расчет трехмерного поля размером $100 \times 100 \times 100$ точек (объем $10.0 \times 10.0 \times 10.0$ мм, шаг 0.1 мм), занял около 20 минут на персональном компьютере (Intel Core 2 Duo, 2 ядра, 2.0 МГц, 4 Гб ОЗУ), в то время как при использовании представленного аналитического подхода это время составило около 3 с. Если для анализа качества поля решетки требуется рассчитать перемещение фокуса во множестве точек ($100 \times 100 \times 100$ точек) с использованием численного расчета интеграла Рэлея, то на том же компьютере расчет займет больше недели, т.е. станет нереализуемым на практике. В случае применения аналитического подхода такой же расчет занимает меньше суток, что более чем на порядок быстрее. Это позволяет использовать метод для разработки специализированных расчетных комплексов для исследования акустических полей многоэлементных решеток в режиме реального времени [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки точности результатов, полученных аналитическим методом (4) для поля всей решетки, было проведено их сравнение с решением, полученным путем прямого численного расчета (5). На рис. 4а представлены распределения амплитуды давления вдоль оси z решетки с 256 случайно расположенными элементами, рассчитанные аналитически и численно. Из рисунка видно, что на расстоянии $z > 100$ мм аналитическое решение практически не отличается от численного.

На рис. 4б изображены рассчитанные аналитическим способом распределения амплитуды давления вдоль оси z для решеток с 256 случайно и регулярно расположенными элементами, а также с 1024 случайно расположенными элементами. Как можно видеть, в области трех дифракционных пиков вблизи фокуса решеток ($z = 130$ мм) распределения практически не отличаются как по форме, так и по амплитуде давления для всех рассматриваемых решеток. Некоторые отличия в распределениях наблюдаются ближе к излучателю и дальше от фокуса и связаны с отличиями в расположении элементов решетки и их размерах.

При перемещении фокуса от центра кривизны поверхности решетки ($x = 0, y = 0, z = 130$ мм) начинают проявляться побочные эффекты, связанные с ее дискретной структурой. На рис. 5 приведены двумерные распределения амплитуды давления в плоскости перемещения фокуса yz (рис. 5а) и в плоскости xu , перпендикулярной оси z и проходящей через центр кривизны поверхности решетки (рис. 5б). Распределения получены при перемещении фокуса на 20 мм от оси решетки по координате y . Для наглядности эти и последующие распределения были рассчитаны для ам-

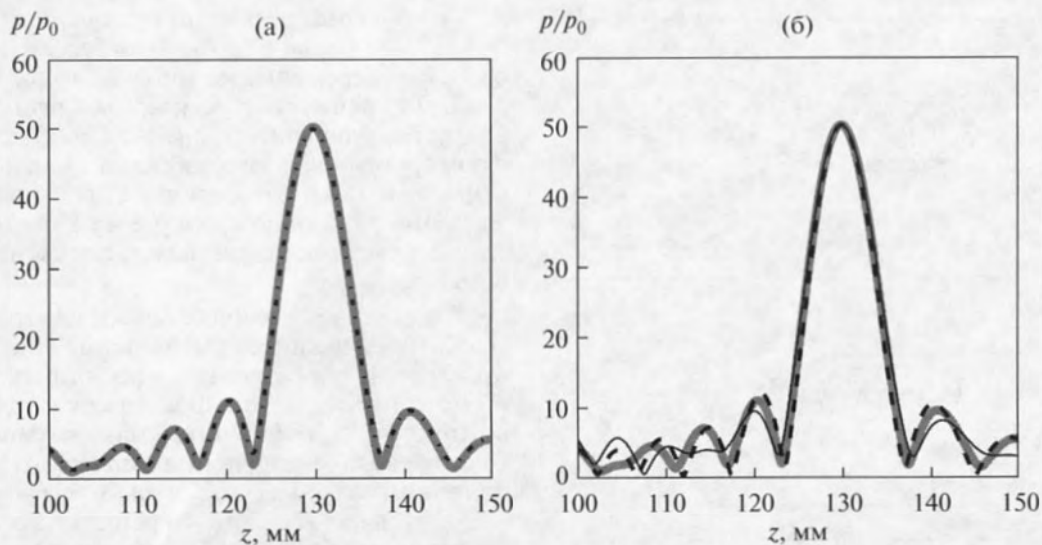


Рис. 4. Распределения амплитуды давления вдоль оси z решетки. (а) Сравнение аналитического решения (толстая серая линия) и численного расчета интеграла Рэлея (черная штрих-пунктирная линия) для решетки с квазислучайным расположением 256 элементов. (б) Сравнение аналитического решения для решеток со случайным расположением 256 элементов (толстая серая линия), решетки с регулярным расположением 256 элементов (черная сплошная линия) и решетки с квазислучайным расположением 1024 элементов (черная штриховая линия).

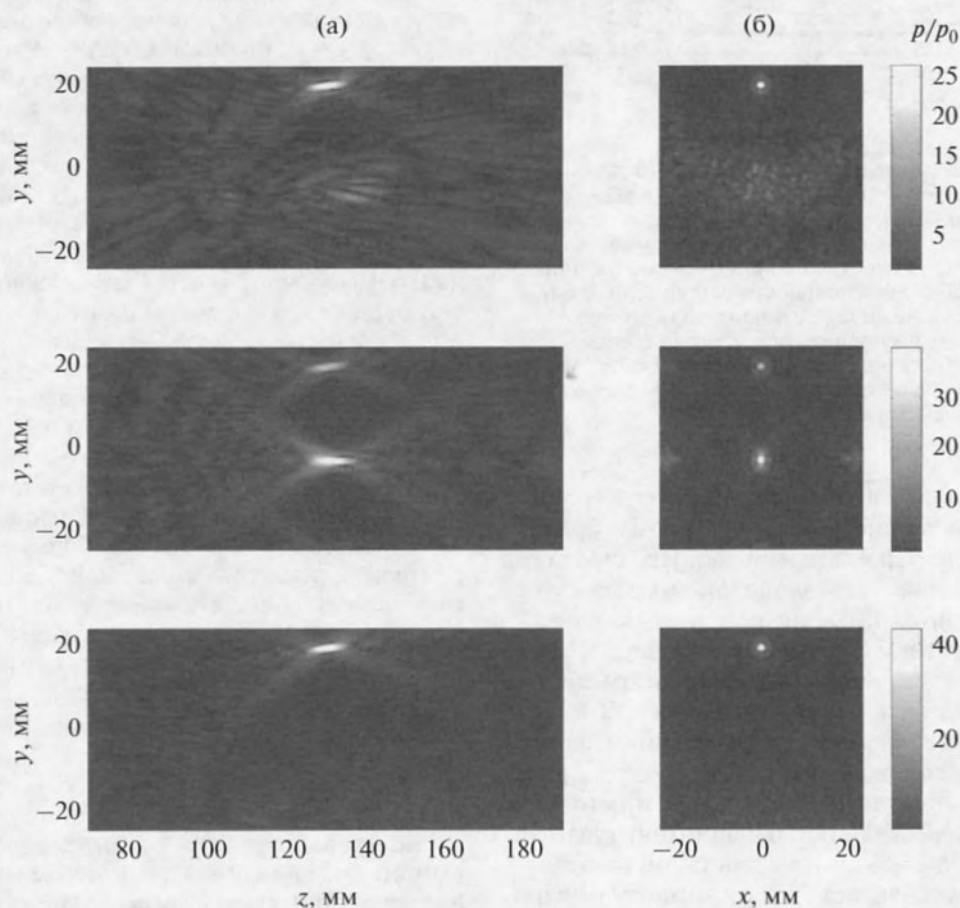


Рис. 5. Двумерные распределения амплитуды давления при перемещении фокуса на 20 мм от оси решетки ($x = 0$, $y = 20$ мм, $z = 130$ мм) для разных типов решеток. (а) Распределения в плоскости вдоль оси решетки, (б) распределения в плоскости, перпендикулярной оси решетки и проходящей через ее центр кривизны. Верхний ряд – решетка с квазислучайным расположением 256 элементов, средний ряд – решетка с регулярным расположением 256 элементов, нижний ряд – решетка с квазислучайным расположением 1024 элементов.

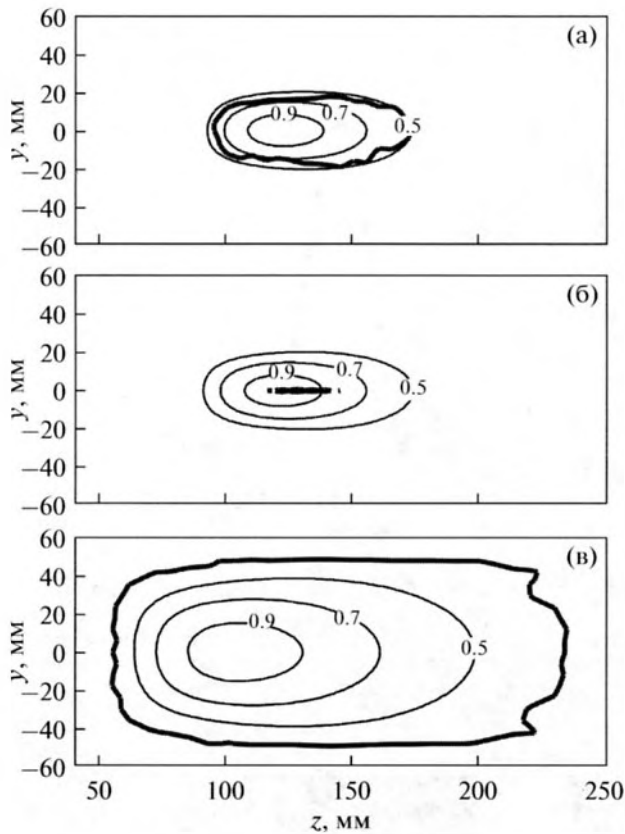


Рис. 6. Совмещенные области перемещения фокуса, соответствующие уменьшению амплитуды давления в основном максимуме на 10, 30 и 50% от наибольшего достигаемого значения (тонкие линии), и области, в которых интенсивность побочных максимумов не превышает 10% от интенсивности основного максимума (толстые линии). (а) Результаты для решетки с квазислучайным расположением 256 элементов, (б) для решетки с регулярным расположением 256 элементов, (в) для решетки с квазислучайным расположением 1024 элементов.

плитуды давления, а не интенсивности волны, связанной с давлением квадратичным образом. Видно, что при перемещении фокуса структура поля рассматриваемых решеток имеет существенные отличия. Так, для решетки со случайным расположением 256 элементов (рис. 5, верхний ряд) амплитуда давления в основном максимуме уменьшается примерно на 60% по сравнению со случаем без перемещения фокуса (рис. 4), а также формируется область с распределенными побочными максимумами в нижних частях распределений. Наибольшая амплитуда давления в побочном максимуме для такой решетки в данном случае составляет 35% от амплитуды в фокусе. При увеличении количества случайно расположенных элементов решетки и соответствующем уменьшении их радиуса уровень амплитуды давления в побочных максимумах гораздо меньше (до 1% от амплитуды в фокусе), и их практически

не видно на распределении, а давление в основном максимуме больше (до 85% по сравнению со случаем без перемещения фокуса) (рис. 5, нижний ряд). Для решетки с регулярным расположением 256 элементов (рис. 5, средний ряд) наблюдается формирование одного побочного максимума, уровень давления в котором даже превышает уровень давления в основном фокусе на 15%. Эти результаты согласуются с данными, полученными в работе [4].

Увеличение количества элементов решетки (и соответствующее уменьшение их размеров) приводит к существенному расширению рабочей области перемещения фокуса как с точки зрения возникновения побочных максимумов, так и с точки зрения уменьшения амплитуды давления в основном максимуме. Случайное расположение элементов на поверхности решетки дополнительно расширяет область безопасного перемещения фокуса без возникновения сильных побочных максимумов.

Эффекты уменьшения амплитуды давления в основном максимуме и возникновения побочных максимумов при постепенном перемещении фокуса в плоскости yz для рассматриваемых решеток проиллюстрированы на рис. 6. Уровни амплитуды давления анализировались во всем объеме поля решетки. На рисунке в виде тонких контуров представлены области перемещения фокуса, в пределах которых основной максимум уменьшается на 10, 30 и 50% от максимально достигаемого значения. Поскольку уменьшение амплитуды давления при перемещении фокуса определяется диаграммой направленности каждого из элементов решетки, которая зависит от их размера, для обеих решеток с 256 элементами одинакового размера ($a = 3.5$ мм) области уменьшения давления в основном максимуме практически совпадают (рис. 6а и 6б). Для решетки с 1024 элементами в два раза меньшего размера ($a = 1.75$ мм) линейные размеры этих областей в поперечном направлении примерно в два раза больше. Для двух рассматриваемых решеток с элементами большего размера характерные размеры области половинного уровня от максимума интенсивности (0.7 от максимума давления) одинаковы и составляют 23 мм в поперечном сечении и 60 мм вдоль оси; для решетки с элементами меньшего размера — 42 и 87 мм соответственно.

На рис. 6 в виде толстых контуров также показаны области перемещения фокуса, в которых интенсивность наибольшего побочного максимума не превышает 10% от интенсивности (32% от амплитуды давления) в основном максимуме, что является принятым критерием безопасности облучения [4, 10–12]. Так, для решеток со случайным расположением элементов меньшего размера ($a = 1.75$ мм) область безопасного перемещения фокуса без возникновения сильных побочных максимумов существенно превышает область уменьше-

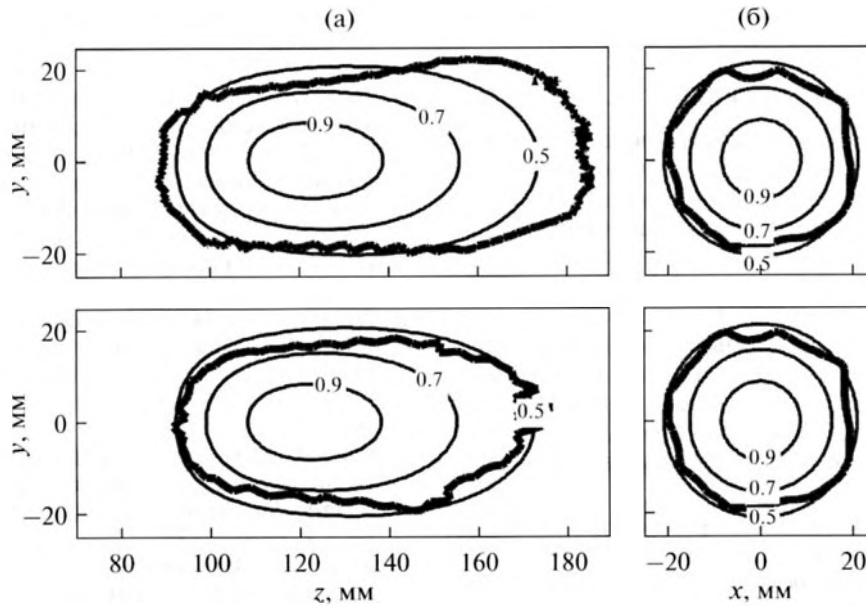


Рис. 7. Совмещенные области перемещения фокуса, соответствующие уменьшению амплитуды давления в основном максимуме на 10, 30 и 50% от наибольшего достигаемого значения (тонкие линии), и области, в которых интенсивность побочных максимумов не превышает 10% от интенсивности основного максимума (толстые линии) для решетки с квазислучайным расположением 256 элементов. Верхняя половина – поиск побочных максимумов только в плоскости перемещения фокуса, нижняя половина – поиск побочных максимумов во всем объеме. (а) Плоскость вдоль оси решетки, (б) плоскость, перпендикулярная оси решетки и проходящая через ее центр кривизны.

ния амплитуды давления в основном максимуме до уровня 0.5. В то же время для решетки со случайным расположением 256 более крупных элементов ($a = 3.5$ мм) область безопасного перемещения фокуса располагается между контурами уменьшения амплитуды давления в фокусе с уровнями 0.7 и 0.5 (рис. 6). Для решетки с регулярным расположением элементов (256 элементов, $a = 3.5$ мм, рис. 6б) область безопасного перемещения фокуса практически отсутствует.

Таким образом, видно, что решетка с регулярным расположением 256 элементов совершенно непригодна для практических задач из-за появления побочных максимумов большой амплитуды уже при минимальном перемещении фокуса. В задачах перемещения фокуса решетки с 256 случайно расположенными элементами безопасной рабочей зоной является область половинного уменьшения интенсивности (уровень 0.7 по давлению) в основном максимуме, так как в этом случае удовлетворяется критерий безопасности по уровню амплитуды давления побочных максимумов. При использовании решетки с большим количеством (1024) элементов меньшего размера практически можно не учитывать критерий безопасности по уровню побочных максимумов; область их возникновения превышает даже область уменьшения интенсивности в основном фокусе в четыре раза (уровень 0.5 по давлению). Это согласуется с результатами, полученными ранее в работе [4].

Хотя интуитивно ясно, что у решеток с большим количеством элементов структура акустического поля такова, что побочные максимумы будут возникать в плоскости перемещения фокуса, этот вопрос специально не исследован. Предложенный аналитический метод позволил быстро проанализировать структуру акустического поля во всем объеме (рис. 6). Расчеты показали, что для рассмотренных выше решеток побочные максимумы действительно находились либо в плоскости перемещения фокуса, либо на расстояниях до 2 мм от нее. В то же время, в отдельных случаях, побочные максимумы находились на расстояниях до 8 мм от плоскости перемещения. Тем не менее, это были практически неинтересные случаи, так как при этом фокус находился за пределами области уменьшения амплитуды давления в основном максимуме больше чем в два раза. В случае необходимости перемещения фокуса в такую точку обычно используется механический позиционер, смещающий саму решетку и ее фокус, как, например, в клинической системе Philips Sonalleve MR-HIFU [15].

На рис. 7 проиллюстрированы отличия при поиске побочных максимумов только в плоскости перемещения (верхняя половина) и в объеме (нижняя половина) на примере полученных областей безопасного перемещения фокуса решетки со случайным расположением 256 элементов (толстые кривые). Видно, что отличия незначительные, но достаточные для принятия во внима-

ние в случае необходимости получения точных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проиллюстрировано применение аналитического метода для быстрого анализа качества полей, создаваемых мощными ультразвуковыми решетками при динамическом перемещении их фокуса. Суть метода состоит в использовании аналитического решения для дальнего поля каждого из элементов решетки, что дает возможность анализировать поля многоэлементных решеток при перемещении фокуса с малым шагом и во всем объеме. Такой подход позволяет более чем на два порядка ускорить расчеты по сравнению с прямым численным расчетом интеграла Рэлея.

Для примера проведено сравнение качества полей, создаваемых различными видами решеток при перемещении их фокуса. Критериями качества поля в данной работе служили принятые в литературе критерии уменьшения интенсивности акустического поля в основном максимуме до некоторого уровня, а также уровень возникающих побочных максимумов (<10% от интенсивности в основном максимуме).

Показано, что существуют различия в определении безопасных областей перемещения фокуса при поиске побочных максимумов только в плоскости перемещения фокуса и во всем объеме поля решетки. Хотя в некоторых рассмотренных случаях побочный максимум возникал на некотором расстоянии от плоскости перемещения фокуса, в практически интересных случаях он находился на этой плоскости.

Представленный алгоритм позволяет быстро проводить исследования полей, создаваемых решетками иных конфигураций и с другими размерами элементов. В случае решеток с более крупными элементами и меньшей аксиальной симметрией, а также при создании многофокусных конфигураций [16], эффект возникновения побочных максимумов не в плоскости перемещения фокуса может быть выражен сильнее. В этом случае представленный быстрый метод расчета незаменим при поиске опасных побочных максимумов во всем объеме. Представляет также интерес использование метода для описания полей решеток, элементы которых имеют иную форму, например, квадратную, для которой также существует аналитическое решение в дальнем поле.

Работа поддержана грантом РФФИ № 14-12-00974.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультразвук в медицине. Физические основы применения. Под ред. Хилла К., Бэмбера Дж., тер Хаар Г. М.: Физматлит, 2008.
2. Бэйли М.Р., Хохлова В.А., Сапожников О.А., Карл С.Г., Крам Л.А. Физические механизмы воздействия терапевтического ультразвука на биологическую ткань (Обзор) // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 4. С. 437–464.
3. Гаврилов Л.Р. Фокусированный ультразвук высокой интенсивности в медицине. М.: Фазис, 2013.
4. Gavrilov L.R., Hand J.W. A theoretical assessment of the relative performance of spherical phased arrays for ultrasound surgery and therapy // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2000. V. 47. № 1. P. 125–139.
5. O'Neil H.T. Theory of focusing radiators // J. Acoust. Soc. America. 1949. V. 21. № 5. P. 516–526.
6. Hlawitschka M., McGough R.J., Ferrara K.W., Kruse D.E. Fast ultrasound beam prediction for linear and regular two-dimensional arrays // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2011. V. 58. № 9. P. 2001–2012.
7. Chen D., McGough R.J. A 2D fast near-field method for calculating near-field pressures generated by apodized rectangular pistons // J. Acoust. Soc. Am. 2008. V. 124. № 3. P. 1526–1537.
8. Kelly J.F., McGough R.J. A time-space decomposition method for calculating the near field pressure generated by a pulsed circular piston // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2006. V. 53. № 6. P. 1150–1159.
9. Ильин С.А., Юлдашев П.В., Хохлова В.А., Гаврилов Л.Р., Сапожников О.А. Оценка качества акустических полей при смещении фокуса многоэлементных фазированных решеток устройств ультразвуковой хирургии // Сборник трудов Научной конференции "Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества". 2012. Т. 2. С. 87–90.
10. Goss S.A., Frizell L.A., Kouzmanoff J.T., Barich J.M., Yang J.M. Sparse random ultrasound phased array for focal surgery // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1996. V. 43. № 6. P. 1111–1121.
11. Ebbini E.S., Cain C.A. A spherical-section ultrasound phased-array applicator for deep localized hyperthermia // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1991. V. 38. № 7. P. 634–643.
12. Hutchinson E.B., Buchanan M.T., Hynynen K. Design and optimization of an aperiodic ultrasound phased array for intracavitary prostate thermal therapies // Med. Phys. 1996. V. 23. № 5. P. 767–776.
13. Юлдашев П.В., Хохлова В.А. Моделирование трехмерных нелинейных полей ультразвуковых терапевтических решеток // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 3. С. 337–347.
14. Росницкий П.Б., Ильин С.А., Сапожников О.А., Хохлова В.А. Расчетный комплекс с интерактивным интерфейсом для исследования акустических полей многоэлементных решеток для ультразвуковой хирургии // Ученые записки физического факультета МГУ. 2013. Т. 4. С. 134301-1–134301-8.
15. Kreider W., Yuldashev P.V., Sapozhnikov O.A., Farr N., Partanen A., Bailey M.R., Khokhlova V.A. Characterization of a multi-element clinical HIFU system using acoustic holography and nonlinear modeling // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2003. V. 60. № 8. P. 1683–1698.
16. Гаврилов Л.Р. Двумерные фазированные решетки для применения в хирургии: многофокусная генерация и сканирование // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 5. С. 604–612.