

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ВИБРОМЕТРИЯ ДВУМЕРНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РЕШЕТКИ МЕТОДОМ НЕСТАЦИОНАРНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ

© 2021 г. С. А. Цысарь^а, *, Д. А. Николаев^а, О. А. Сапожников^а

^аФизический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1, Москва, 119991 ГСП-1 Россия

*e-mail: sergey@acs366.phys.msu.ru

Поступила в редакцию 02.05.2020 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2021 г.

Представлены результаты экспериментального определения структуры колебаний поверхности двумерного фазированного ультразвукового датчика мегагерцового диапазона частот с использованием метода нестационарной акустической голографии в полосе частот от 0.1 до 10 МГц. Показано, что указанный метод позволяет обнаружить индивидуальные элементы, работающие с отклонениями параметров от номинальных значений, в том числе и неактивные. Проведено сравнение с результатами поэлементных эхо-импульсных измерений, а также измерений электрической емкости элементов.

Ключевые слова: акустическая голография, двумерные решетки, характеристика излучателей, калибровка

DOI: 10.31857/S0320791921030138

ВВЕДЕНИЕ

Многоэлементные ультразвуковые (УЗ) решетки широко применяются в медицинской диагностике и неразрушающем контроле. В большинстве современных ультразвуковых сканеров используются одномерные (линейные) ультразвуковые решетки, которые за счет специальной фазировки сигналов различных элементов дают возможность осуществить эхо-импульсную визуализацию в двумерной области — плоском участке, перпендикулярном элементам решетки. Улучшение получаемых ими изображений по сравнению с простейшим методом построения DAS (*delay and sum*) достигается за счет применения новых алгоритмов обработки сигналов [1, 2] и методов распознавания [3, 4]. В последние годы наметилась тенденция к использованию двумерных решеток, которые позволяют существенно улучшить УЗ-визуализацию или точность воздействия не только за счет охвата трехмерной области, но и благодаря более эффективной компенсации аберраций при использовании УЗ методов в неоднородных средах [5].

При использовании таких решеток элементы обычно считаются идеальными, что зачастую является очень грубым приближением. В реальности важно уметь контролировать состояние различных элементов, их способность излучать и

принимать сигналы в нужном диапазоне частот. Желательно также оценивать состояние защитных и согласующих слоев на излучающей поверхности, качество электрических контактов между пьезоэлектрическими элементами и питающими их проводами и т.д. При определении характера излучаемого ультразвукового поля разработчики иногда ограничиваются набором электрических характеристик элементов с использованием различных приближений (например, предположения о поршневом характере колебаний поверхности элементов). Для ряда применений это может быть неприемлемо по уровню точности предсказываемого поля из-за наличия ряда дефектов и несправедливости использованных приближений [6]. Определить характер колебаний поверхности излучателя можно с помощью известных методов, например, метода лазерной виброметрии [7] или метода ширен-визуализации [8]. Но оба метода не позволяют непосредственно получить количественное распределение поля в жидкой рабочей среде. Первый метод работает в воздухе, а в жидкости возникает акустооптическое взаимодействие, вносящее существенные помехи [9, 10]. Второй метод позволяет просто получить качественную картину УЗ-пучка в прозрачной жидкости, но для получения количественных распределений необходимо применение сложной

и высокоточной томографической схемы. В настоящей работе для количественной характеристики излучаемого импульсного поля предлагается использовать метод нестационарной акустической голографии [11].

Голографией в широком смысле называют запись полной информации о волне (голограммы). В случае гармонической волны записывается не только амплитуда, но и фаза волны. Согласно общим свойствам решения волнового уравнения, такую запись достаточно осуществить на некоторой поверхности, окружающей визуализируемый объект. Для акустических волн было предложено и реализовано несколько вариантов голографии по аналогии с оптическим принципом записи [12–14]. Позже стало понятно, что в акустике можно избежать использования интерференции со вспомогательным опорным пучком, поскольку благодаря относительно низкой частоте сигналов удается достаточно легко осуществить прямую запись амплитуды и фазы волны в каждой точке поверхности измерений и затем воссоздать исходное поле численным образом. Более того, в случае несинусоидальных сигналов можно записать полную временную форму сигналов в точках указанной поверхности. Такой подход для случая распространения ультразвуковых волн меггерцового диапазона в жидкостях разработан в работах [8, 11, 15–17]. Суть метода заключается в численном расчете скорости колебаний поверхности преобразователя на основе экспериментально измеренного распределения акустического давления на некоторой поверхности перед источником. Математически проблема сводится к решению обратной задачи нахождения неизвестных значений поля в точках поверхности источника на основе известных значений поля в точках некоторого участка поверхности, расположенного перед источником.

К настоящему времени предложено несколько различных вариантов акустической голографии. Одним из эффективных способов пересчета волнового поля с плоскости на плоскость является метод углового (пространственного) спектра. Такой способ применяется как для расчета распространения акустических полей от плоских источников [18, 19], так и для обратного пересчета [20], т.е. для голографического восстановления посредством обратного распространения. Метод углового спектра можно обобщить на случай цилиндрических или сферических источников [21, 22]. Большое количество публикаций посвящено акустической голографии ближнего поля, для которой характерно проведение записи голограммы на относительно близком расстоянии от источника, порядка длины волны. Этот вариант голографии получил заметное развитие в воздушной акустике, где он уже используется для нахождения распределений скорости или давления на вибрирую-

щих поверхностях различных устройств. При этом проводится учет неоднородных волн, которые, как известно, несут информацию о мелко-масштабных деталях поля на источнике [23].

В настоящей работе для определения чувствительности элементов на излучение и определения соответствия элемента и номера канала УЗ-системы предложен и опробован метод импульсной акустической голографии. В эксперименте была исследована 384-элементная ультразвуковая решетка с центральной частотой 2 МГц (Меделком, Литва). При калибровке в полосе частот 0.1–10 МГц продемонстрировано, что предложенный метод обладает высокой пространственно-временной разрешающей способностью, что позволяет визуализировать колебания отдельных элементов и обнаружить дефекты на поверхности источника.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ МЕТОДА

В большинстве приложений ультразвука в медицине и неразрушающем контроле размеры преобразователей намного превышают длину волны, а исследуемые участки среды находятся от источника на расстоянии много большем длины волны, поэтому проводить учет неоднородных волн, в отличие от ряда голографических задач гидроакустики киллогерцового диапазона [12, 13], нет необходимости. В основу развиваемого нами варианта акустической голографии положен принцип обращения волнового фронта, основанный на инвариантности волнового уравнения в непоглощающей среде относительно операции обращения времени [24]. Для проведения операции прямого или обратного распространения в некоторых случаях удобно использовать метод интеграла Рэлея, который особенно удобен при исследовании неплоских излучающих поверхностей, колеблющихся по гармоническому закону [15]. В силу линейности задачи он легко обобщается на случай нестационарных (в частности, импульсных) источников [17]. При этом в каждой точке голограммы записывается не амплитуда и фаза сигнала (как это делается при исследовании монохроматических источников), а полная форма волны. Такой подход, как уже было отмечено, оправдан при исследовании колебаний поверхности источника и/или поверхности измерений неплоской формы, например, фокусирующей [16].

Когда поверхность области сканирования (область голограммы) и поверхность излучателя являются плоскопараллельными, более быстрый расчет возможен на основе метода углового спектра. Отметим, однако, что скорость расчетов обычно не является проблемой, так что выбор того или иного метода (интеграла Рэлея или углового спектра) не принципиален. Для определенности сформулируем аналитические закономерности

прямого и обратного распространения поля ультразвукового давления, меняющегося со временем по негармоническому закону, с использованием аппарата фурье-преобразования. Рассмотрим плоскость $z = 0$, расположенную непосредственно у поверхности плоского УЗ-источника в воде. Распределение акустического давления $p(x, y, z = 0, t)$ в этой плоскости определяется характером колебаний поверхности источника, который, вообще говоря, является неизвестным. В силу линейности задачи удобно рассматривать распространение каждой гармонической компоненты сигнала $S(x, y, z, \omega)$ независимо от других. Пространственная структура поля каждой гармоники представляет собой зависимость действительной амплитуды и фазы этой гармоники от координат, которую удобно свести к пространственной зависимости комплексной амплитуды, считая функцию $S(x, y, z, \omega)$ комплексной. В рамках метода углового спектра данная зависимость может быть сведена к $P(k_x, k_y, z, \omega)$ путем перехода от пространственных координат (x, y, z) к смешанным (k_x, k_y, z) с помощью двумерного пространственного преобразования Фурье:

$$P(k_x, k_y, z, \omega) = \int \int_{-\infty}^{\infty} S(x, y, z, \omega) e^{-ik_x x - ik_y y} dx dy, \quad (1)$$

где

$$S(x, y, z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y, z, t) e^{i\omega t} dt. \quad (2)$$

Здесь k_x, k_y представляют собой проекции волнового вектора $\mathbf{k}(\omega)$ для каждой гармонической компоненты на оси x и y соответственно. Ось z соответствует основному направлению распространения УЗ-поля.

Пользуясь введенными обозначениями, нетрудно через исходное поле на плоскости $z = 0$ выразить угловой спектр гармонической компоненты поля на плоскости, удаленной от источника на расстояние z_H , принимая во внимание приобретаемый фазовый набег $k_z z_H = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z_H$, где $k = k(\omega) = \omega/c(\omega)$ — волновое число, c — ско-

рость звука на данной частоте в среде (для рассматриваемого случая — в воде):

$$P(k_x, k_y, z_H, \omega) = P(k_x, k_y, 0, \omega) G(k_x, k_y, z_H, \omega), \quad (3)$$

где

$$G(k_x, k_y, z_H, \omega) = e^{i\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2 - k_y^2} z_H}. \quad (4)$$

Таким образом, угловые спектры поля акустического давления на параллельных плоскостях z связаны через пропагатор G , что позволяет легко пересчитывать поле с одной плоскости на другую. При этом полученные выражения сразу позволяют решить и обратную задачу в классической постановке голографии: при известном (из измерений) поле на плоскости голограммы $z = z_H$ найти поле на источнике. Действительно, домножив правую и левую части выражения (3) на G^{-1} , получим явное выражение для углового спектра на поверхности источника $z = 0$:

$$P(k_x, k_y, 0, \omega) = P(k_x, k_y, z_H, \omega) e^{-i\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2 - k_y^2} z_H}. \quad (5)$$

Здесь следует отметить, что при значениях k_x, k_y , выходящих за пределы круга с радиусом ω/c , показатель экспоненты будет положительным действительным числом, что при неизбежных шумах, вносимых в функцию $P(k_x, k_y, z_H, \omega)$ при голографических измерениях, приведет к экспоненциальному росту ошибок в определении исходного поля. Поэтому, как отмечалось выше, в задачах больших волновых размеров неоднородные волны принудительно исключаются из рассмотрения, что в методе углового спектра достигается использованием только спектральных компонент, находящихся в пределе так называемого круга излучения $(k_x, k_y) \in \Sigma_k$, который определяется условием $(k_x, k_y) : k_x^2 + k_y^2 \leq \omega^2/c^2$.

Удобно с использованием обратных к (1), (2) преобразований и соотношения (5) записать итоговые выражения для расчета исходного поля на источнике $p(x, y, 0, t)$ на основе измеряемого поля вдоль плоской поверхности голограммы $p(x, y, z_H, t)$, которые и использовались в настоящей работе:

$$p(x, y, 0, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \iint_{\Sigma_k} P(k_x, k_y, z_H, \omega) e^{-i\left(\omega t - k_x x - k_y y + \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2 - k_y^2} z_H\right)} dk_x dk_y \right\} d\omega, \quad (6)$$

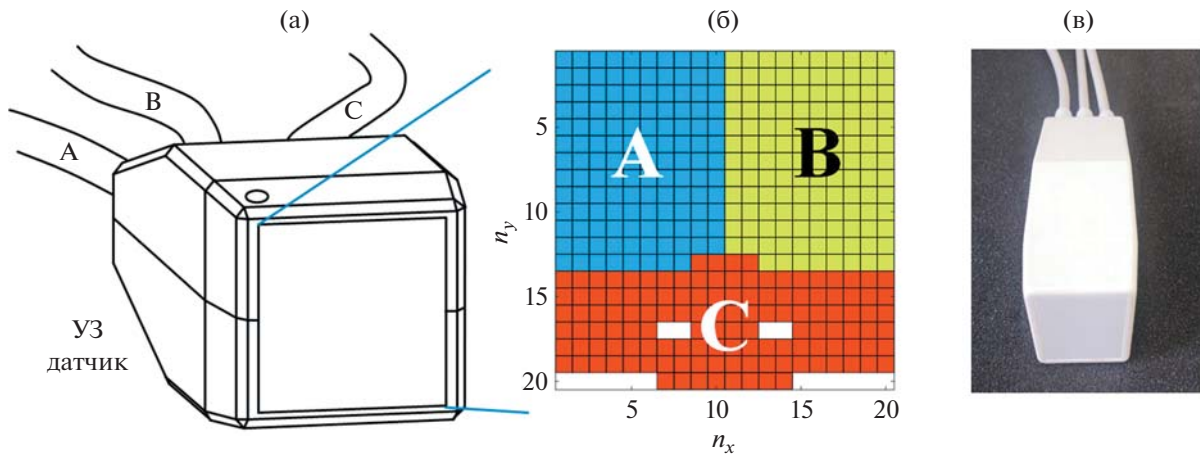


Рис. 1. (а, в) – Двумерный ультразвуковой датчик. Размер рабочей области 30 × 30 мм. (б) – Схема расположения 384 активных элементов на лицевой поверхности датчика, разделенных на три сектора А, В и С по 128 каналов.

где

$$P(k_x, k_y, z_H, \omega) = \iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y, z_H, t) e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)} dt \right\} dx dy. \quad (7)$$

Как было отмечено выше, расчет поля с использованием полученных формул возможен только для плоскопараллельных поверхностей. При проведении реальных измерений, однако, отклонение поверхностей преобразователя и голограммы от взаимной параллельности неизбежно [16], что формально делает предложенный метод не применимым непосредственно к реальным условиям. Данный факт, тем не менее, не является серьезной проблемой, поскольку даже монохроматическая голограмма представляет собой набор данных о полной трехмерной пространственной структуре поля в интересующей области, а значит, даже в случае взаимной непараллельности поверхностей информация о поле вдоль требуемой поверхности может быть восстановлена с использованием описанного метода углового спектра. Так, например, при линейных отклонениях порядка длины волны на поперечном масштабе голограммы, при прямом применении метода ошибка реконструкции составляет единицы процентов [16]. В случае больших отклонений или при необходимости корректировки возникающей большей ошибки она может быть скомпенсирована введением дополнительных фазовых множителей в преобразовании (7), что было проанализировано в работе [25].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Экспериментальная верификация предложенного метода проводилась на двумерной приемопередающей решетке из пьезоэлектрических эле-

ментов, выполненной в виде плоской квадратной матрицы (см. рис. 1). Форма матрицы – квадратная, плоская, размером 20×20 элементов (общее количество элементов 400). Вид каждого элемента матрицы – квадрат размером 1.45 × 1.45 мм. Зазор между соседними элементами – 0.05 мм (период матрицы 1.5 мм). Из имеющихся 400 элементов управляемыми (рабочими) являются 384 элемента, разбитые на три группы А, В и С по 128 элементов (распределение элементов по группам показано на рис. 1б), каждая из которых управляется с помощью отдельного кабеля, обеспечивающего подключение к выходу системы Verasonics (тип разъема соответствует стандарту Canon ZIF DL5-260PW6A).

Центральная частота в режиме приема–передачи при минимальном значении реактивной составляющей импеданса лежит в диапазоне 1.9–2.3 МГц. Относительная ширина полосы частот в режиме приема–передачи по уровню 6 дБ при минимальном значении реактивной составляющей импеданса – не менее 40%. Корпус решетки с подходящими к нему тремя кабелями гидроизолирован для обеспечения возможности погружения в воду при комнатной температуре на глубину до 1 м и нахождения в указанных условиях до 10 сут.

Голографические измерения проводились на специальном экспериментальном стенде. Исследуемый ультразвуковой датчик опускался в резервуар с дегазированной водой и был неподвижно закреплен в процессе измерений. Напротив него находился ультразвуковой датчик – капсульный гидрофон Golden Lipstick HGL-0200 (Onda Corp., США) со встроенным преусилителем электрического сигнала (рис. 2а). Номинальный диаметр чувствительного участка гидрофона равен 0.2 мм, чувствительность на частоте 2 МГц составляет 0.21 В/МПа.

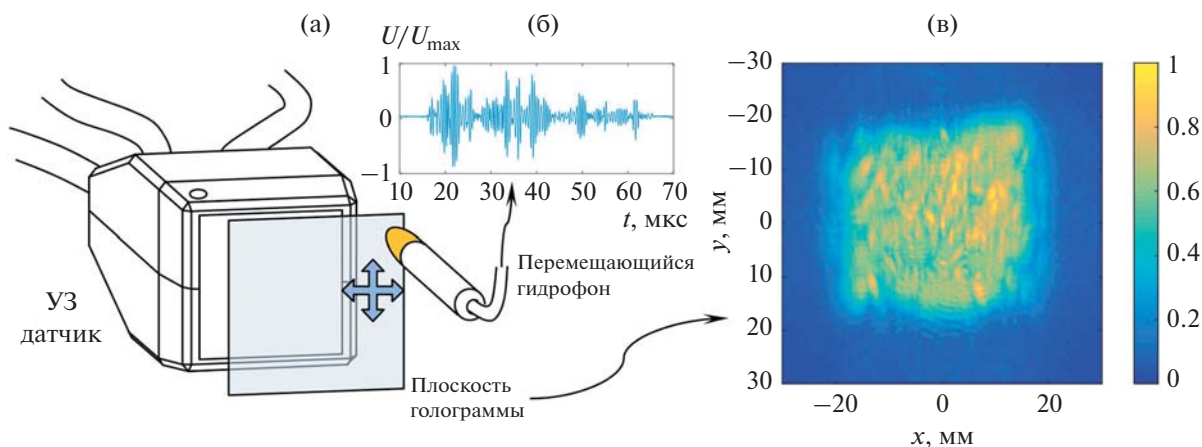


Рис. 2. (а) – Схема проведения измерений с помощью гидрофона, перемещающегося вдоль плоскости голограммы перед излучателем на расстоянии 25 мм. (б) – Типичный временной профиль электрического сигнала на гидрофоне в одной из точек голограммы при возбуждении излучателя во втором режиме, см. пояснения в тексте. (в) – Распределение пиковых значений электрического сигнала вдоль поверхности голограммы.

Гидрофон в процессе измерений мог перемещаться контролируемым образом в автоматическом режиме. Для этого использовалась система микропозиционирования UMS-3 (Precision Acoustics, Великобритания), позволяющая проводить пространственное трехмерное сканирование с шагом 1 мкм и гарантируемой точностью позиционирования 6 мкм за счет использования системы обратной связи с применением магнитных линейных энкодеров на каждой из трех осей.

Голограмма ультразвукового поля записывалась путем регистрации сигнала гидрофона в узлах плоской квадратной сетки с шагом 0.25 мм, ориентированной параллельно излучающей поверхности датчика и расположенной от него на расстоянии 25 мм. Соответствующее количество узлов сетки выбиралось равным 241×241 , т.е. размер участка сканирования составлял 60.25×60.25 мм, что превышало поперечный размер ультразвукового пучка: размер рабочей зоны исследуемого датчика составляет 30×30 мм при возбуждении всех его элементов. Центр области сканирования устанавливался напротив центра УЗ-датчика, что обеспечивало практически полное попадание акустического пучка в область сканирования.

Позиционная система располагалась над резервуаром размером $1 \times 0.5 \times 0.5$ м, который для проведения измерений заполнялся дегазированной фильтрованной водой. Стенки резервуара изготовлены из оргстекла толщиной 12 мм. Фильтрация, дегазация и бактерицидная обработка (УФ-лампой) осуществлялась с помощью системы подготовки воды PA WTS (Water Treatment System, Precision Acoustics, Великобритания). Сигнал гидрофона поступал на осциллограф (TDS5054B, Tektronix Inc., США), подключенный к компьютеру посредством шины GPIB и

виртуальной сессии VISA через LAN. Централизованное управление процессом измерений осуществлялось компьютером по программе, написанной в среде LabView, входящей в состав системы позиционирования Precision Acoustics.

Сигнал записывался в пределах временного окна длительностью 100 мкс. Указанной длительности было достаточно для записи регистрируемого гидрофоном импульсного акустического сигнала. Запись сигнала гидрофона происходила с шагом дискретизации 40 нс, что для выбранного временного окна составляет 2500 точек записи. Для снижения уровня шумов для каждой точки производилось усреднение по 32 реализациям периодически повторяющегося сигнала. Типичный вид регистрируемого гидрофоном электрического сигнала в одной из точек плоскости голограммы при импульсном возбуждении элементов УЗ-датчика представлен на рис. 2б (показано окно в 60 мкс, содержащее сигнал).

Исследуемый датчик подсоединялся к двум системам Verasonics V-1 (Verasonics Inc., США) с возможностью управления 256 каналами каждой. Две группы элементов решетки А и В (рис. 1а, 1б) подключались с помощью двух разъемов к первой системе Verasonics, а группа элементов С подключалась третьим разъемом ко второй системе Verasonics. Использовались два режима. В первом режиме все элементы датчика возбуждались синхронно одинаковыми сигналами, представляющими собой три периода электрического напряжения с формой в виде меандра с частотой 2 МГц и пиковым напряжением 10 В. Во втором режиме элементы трех групп возбуждались теми же сигналами, но с задержкой $(n - 1)392$ нс, где n – номер канала выхода системы Verasonics в пределах 1...128 для каждой из трех групп. Синхронизация двух

систем осуществлялась внешним генератором (Agilent 33250A, Agilent Technologies, США). Указанные импульсные сигналы периодически повторялись с частотой 100 Гц.

Результатом измерений являлась нестационарная голограмма, представлявшая собой набор из 58081 записей временного профиля сигнала гидрофона в различных положениях, соответствующих узлам измерительной сетки размером 241×241 . Характерное распределение пиковых значений на плоскости голограммы во втором режиме излучения (в рамках временного окна 100 мкс для каждого пространственного положения) представлено на рис. 2в. На основе этих данных с использованием алгоритма обратного распространения в соответствии с описанным выше методом (6)–(7) проводилась процедура реконструкции распределения колебаний поверхности исследуемого датчика. В результате находились распределения временной зависимости акустического давления и нормальной компоненты колебательной скорости на поверхности исследуемой решетки. На основе вычисления спектров указанных зависимостей находились также пространственные распределения амплитуд сигналов, соответствующих колебаниям поверхности решетки при непрерывном (гармоническом) возбуждении на разных частотах в пределах эффективной полосы излучения датчика.

Помимо измерений с помощью гидрофона, проводились эхо-импульсные измерения для каждого элемента решетки. Для этого один сектор элементов А, В или С подключался к системе Verasonics V-1, для которой был сформирован протокол излучения с использованием вышеописанного сигнала для возбуждения только одного элемента из подключенной 128-элементной группы. Сигнал излучался в воду, где на удалении 50 мм располагалась плоская поверхность латунного блока, расположенная параллельно поверхности преобразователя. Отраженный от границы сигнал попадал на поверхность преобразователя, после чего регистрировался 128 каналами приемного тракта УЗ-системы, подключенными к текущей группе элементов. Запись сигналов со всех элементов данной группы, а не только излучающего, позволила выявить замкнутые друг на друга элементы, работающие параллельно. Изначально данные измерения проводились с целью сопоставления распределений чувствительности элементов в режиме излучения–приема с распределением, получаемым в результате голографической реконструкции, которое соответствует распределению чувствительности в режиме излучения. Как оказалось, в таблице разводки контактов разъема к элементам преобразователя имелось несоответствие, которое не позволяло провести корректное сравнение распределений. Использование второго режима излучения (см. выше) сов-

местно с измерением голограммы позволило установить корректную связь “номер канала–элемент” для всех 384 активных элементов.

На заключительном этапе в качестве дополнительного контроля получаемых распределений были проведены измерения электрической емкости всех активных элементов с подведенными кабелями. Измерения осуществлялись на контактах разъемов в соответствии с установленной связью контактов разъема с пьезоэлементами каждой группы с помощью цифрового измерителя RLC E7-8.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с описанным методом на основе измеряемых голограмм (рис. 2б, 2в) проводилась реконструкция поля на поверхности преобразователя. Расчет углового спектра для каждой спектральной полосы (при разложении по временным гармоникам) проводился численным образом на основе выражения (7), где интегральные преобразования Фурье заменялись на набор операций быстрого преобразования Фурье (БПФ). В ряде случаев перед преобразованиями пространственно-временная область расчета дополнялась нулями во избежание эффекта наложения спектров. Реализация алгоритма численного расчета поля на поверхности преобразователя была осуществлена в среде MATLAB. По результатам расчета поля на поверхности излучателя были получены распределения для двух описанных выше режимов излучения: синфазного и последовательного возбуждения элементов преобразователя. Результат реконструкции поля на поверхности преобразователя, работающего во втором режиме, представлен на рис. 3. Слева показано двумерное распределение пиковых значений акустического давления, нормированное на максимум в данной плоскости. В данном режиме излучения все пьезоэлементы отчетливо различаются, в частности, видны неактивные элементы и различия в уровне излучения активных элементов.

На краю рабочей поверхности, в районе зоны А и частично В, имеется явно выраженный дефектный участок, который затрагивает около 40 элементов решетки. В пределах этого участка в рабочем диапазоне частот 1–3 МГц колебания элементов почти полностью подавлены по сравнению с остальными элементами. Для анализа характера колебаний элементов (указаны стрелками на рис. 3а) из состава дефектного и нормального участков на рис. 3б, 3г представлены временные профили излучаемых сигналов. Отчетливо видно, что общий уровень сигнала на элементе дефектной области значительно ниже, а структура колебаний имеет нерегулярный вид. При рассмотрении спектрального состава сигналов (рис. 3в, 3д) заметным является пик в районе

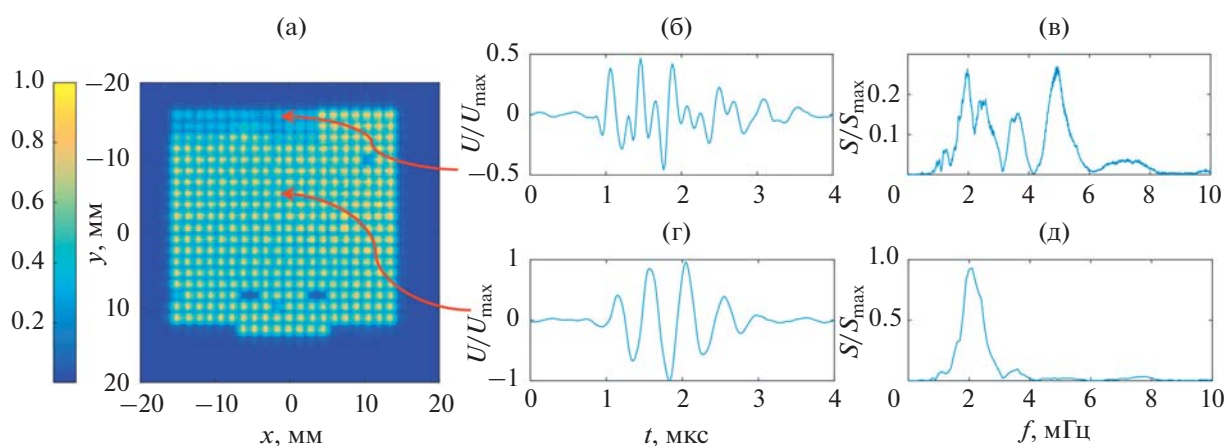


Рис. 3. (а) – Нормированное распределение пиковых значений поля на поверхности источника, рассчитанное из голограммы на рис. 2в. Временные профили сигнала в центрах указанных стрелками элементов излучателя: из (б) – дефектной и (г) – нормальной областей; (в, д) – соответствующие им частотные спектры.

5 МГц, который отсутствует у элементов нормальной области.

Удобно проиллюстрировать полученное на поверхности излучателя распределение не в виде двумерной картины пиковых значений сигнала, как на рис. 3, а в виде набора монохроматических голограмм, соответствующих распределению действительной амплитуды акустического давления, создаваемого поверхностью излучателя в воде, для выбранных спектральных компонент. На рис. 4 показаны такие голограммы для частот от 1 до 9 МГц с шагом 1 МГц для синфазного режима излучения всеми элементами. Следует отметить, что представленный набор составляет лишь малую часть всей нестационарной голограммы, которая обычно состоит из нескольких тысяч спектральных компонент (5000 компонент для представленной импульсной голограммы). В данном случае, в отличие от режима излучения с последовательным возбуждением (рис. 3а), отдельные элементы в пределах рабочей зоны не так различимы, что хорошо видно на распределении для центральной частоты 2 МГц (рис. 4). Это связано с тем, что при синфазном возбуждении вся поверхность излучателя вместе с согласующим слоем и заполненными компаундом зазорами между элементами колеблется как единая пьезокерамическая пластина, в то время как при последовательном возбуждении элементов активная область излучения локализована на площади, ограниченной колеблющимся элементом, с практически нулевым уровнем в областях между элементами. В данном случае проводится сравнение распределения пиковых значений временных профилей сигналов (рис. 3а) и распределения спектральной компоненты (2 МГц на рис. 4), что, строго говоря, не является корректным, но полезно для иллюстрации различия двух режимов излучения, так как соот-

ветствующее приведенному на рис. 3а распределение спектральной компоненты на центральной частоте 2 МГц будет визуально его повторять.

Представление нестационарной голограммы в виде набора монохроматических голограмм (рис. 4) позволяет проанализировать поведение дефектной области по сравнению с остальными элементами на разных частотах, что зачастую является более удобным, чем пространственно-временное представление (рис. 3). Так, хорошо видно, что в основной полосе частот около 2 МГц дефектная область практически не излучает, в то время как в диапазоне высоких частот (5, 6, 7 МГц на рис. 4) она излучает заметно сильнее, чем остальные элементы. На частоте 8 МГц выделяется граница между дефектной и рабочей областями.

Для контроля получаемых из голограммы распределений были проведены поэлементные эхо-импульсные измерения с отражением от латунного блока в воде (рис. 5а), а также измерения электрической емкости элементов, методика которых описана в предыдущем разделе. Полученные результаты эхо-импульсных измерений с использованием прилагаемой к преобразователю схемы разводки каналов к элементам представлены на рис. 5б. Структура распределения электрической емкости имела схожую структуру и здесь не приводится. В силу нерегулярной структуры получаемых распределений было принято решение сопоставить номера каналов с соответствующими элементами с использованием второго режима излучения при последовательном возбуждении элементов. Для этого измерялась голограмма, проводилась реконструкция поля на поверхности излучателя во временном представлении и выделялись моменты времени, в которые излучает только один элемент в пределах каждого сектора А, В и С. Из протокола излучения выбирался но-

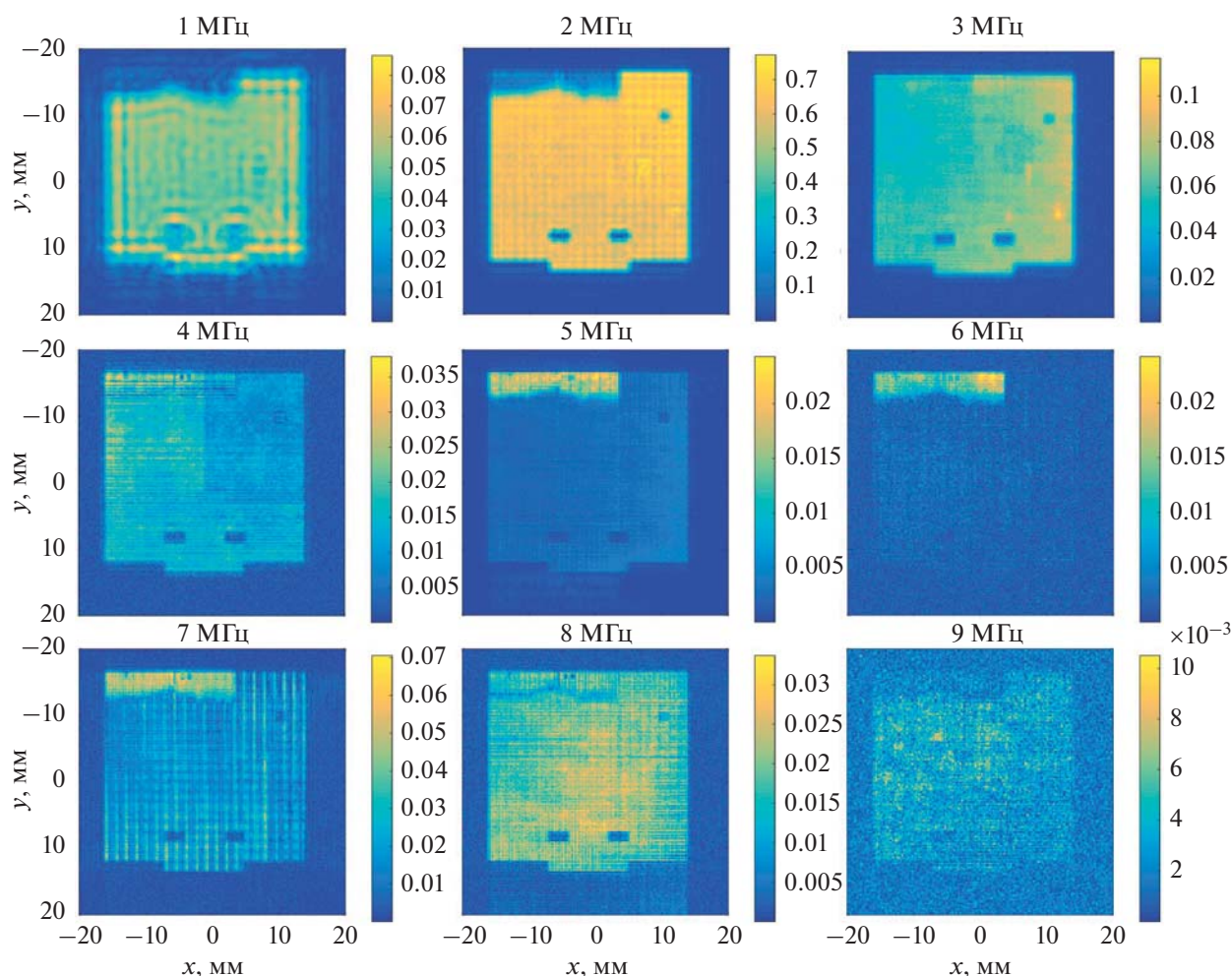


Рис. 4. Распределения действительных амплитуд поля на поверхности источника для монохроматических компонент в диапазоне 1–9 МГц с шагом 1 МГц, рассчитанные из голограммы для режима синфазного излучения всеми элементами. Отчетливо видна дефектная область элементов, не излучающая на основной частоте, но работающая на частоте 5 МГц. Нормировка цветовой шкалы – единая на абсолютный максимум поля в плоскости среди всех частот.

мер канала, который в этот момент был активен, и присваивался активному элементу на голограмме поверхности излучателя. Таким образом была определена новая схема соответствия канала и пьезоэлементов, по которой было построено распределение чувствительности в эхо-импульсном режиме (рис. 5в), соответствующее реальному. Итоговые распределения для удобства сравнения приведены на рис. 6. Видно хорошее согласование структуры поля на поверхности излучателя на центральной частоте (рис. 6а), распределения чувствительности элементов в эхо-импульсном режиме (рис. 6б) и распределения электрической емкости элементов с подводимым кабелем и разъемом (рис. 6в). На всех трех распределениях элементы дефектной области выделяются на фоне элементов рабочей зоны.

Указанный дефект с большой вероятностью не был связан с какими-либо проблемами в элек-

трическом соединении. Он, по-видимому, обуславливался механическими причинами, поскольку (а) нижняя граница дефектного участка неровная и проходит не по линии разграничения элементов и (б) дефектная область затрагивает две группы элементов (А и В), которые подсоединяются через различные разъемы системы Verasonics. Указанный дефект, скорее всего, не является деламинацией между согласующими слоями, поскольку, как уже отмечалось, в диапазоне частот 3.7–7 МГц этот участок, наоборот, является хорошо излучающим, а остальная область оказывается подавленной. Вероятной причиной дефекта может быть отличная от номинальной толщина согласующих слоев в этом месте.

Следует отметить, что на участках поверхности вне дефектной области колебания различных элементов с высокой точностью одинаковы, за исключением некоторых малых участков. Оди-

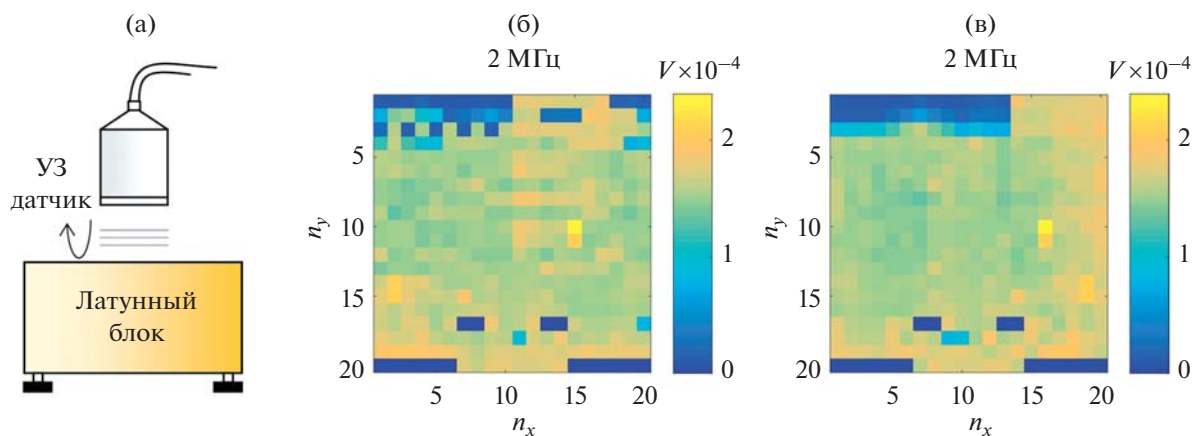


Рис. 5. (а) – Схема измерений для определения относительной чувствительности элементов эхо-импульсным методом. Распределение амплитуды принимаемого эхо-сигнала по поверхности датчика: (б) – при использовании прилагаемой схемы соответствия номера канала и положения элемента; (в) – при определении соответствия с помощью метода импульсной голографии.

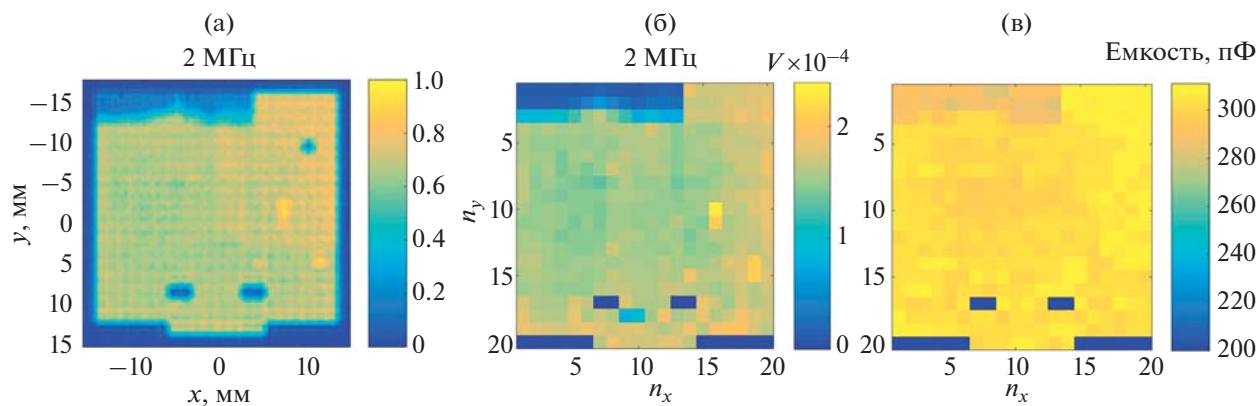


Рис. 6. Сравнение распределений по результатам: (а) – голографической реконструкции поля на поверхности двумерной решетки для частоты 2 МГц в синфазном режиме излучения, см. текст; (б) – поэлементных эхо-импульсных измерений с использованием латунного блока на частоте 2 МГц; (в) – поэлементных измерений электрической емкости.

ночный неактивный элемент, отчетливо заметный в секторе В на центральной частоте (рис. 6а), связан с дефектом излучающего канала второй системы Verasonics, так как при подключении этого сектора к первому разъему другой системы (рис. 6б) элемент становится активен; целостность кабеля и отсутствие проблем с контактом элемента также подтверждается практически однородным уровнем электрической емкости (рис. 6в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе показана возможность использования нестационарной акустической голографии для определения характера колебаний поверхности многоэлементной двумерной ультразвуковой решетки с целью обнаружения дефектов и калибровки по уровню излучаемого поля в различных режимах. Дополнительно показано, что

предложенный метод может быть использован для выявления схемы соответствия номера канала излучающей системы с положением элемента на поверхности преобразователя, что может быть очень полезным в случае отсутствия заводской схемы. Показано, что полученные с помощью метода нестационарной акустической голографии результаты хорошо согласуются с результатами независимых поэлементных эхо-импульсных измерений и измерений электрической емкости.

Предложенный метод является очень перспективным для характеристики практически любых УЗ-преобразователей, работающих в сложных режимах, позволяя получать количественные пространственно-временные распределения не только на поверхности излучателя, но и в любой области в рамках ограничений точности метода [16].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 19-12-00148. Авторы благодарны И.В. Мовшовичу за обсуждение технических характеристик исследованной ультразвуковой решетки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ting S., Shi Z., Dayu L., Dingjie Y.* Combined sign coherent factor and delay multiply and sum beamformer for plane wave imaging // *Acoust. Phys.* 2018. V. 64. № 3. P. 379–386.
2. *Ping W., Yizhe S., Jinyang J., Lu K., Zhihui G.* Generalized sidelobe canceller for ultrasound imaging based on eigenvalue decomposition // *Acoust. Phys.* 2019. V. 65. № 1. P. 123–131.
3. *Базулин Е.Г., Соколов Д.М.* Восстановление ультразвуковых изображений отражателей по неполным данным методом распознавания со сжатием // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 4. С. 520–532.
4. *Титов С.А., Зинин П.В.* Формирование ультразвуковых изображений через слои с неизвестными параметрами // *Акуст. журн.* 2020. Т. 66. № 2. С. 206–212.
5. *Росницкий П.Б., Сапожников О.А., Гаврилов Л.Р., Хохлова В.А.* Метод создания абсолютно плотных фазированных решеток для неинвазивной ультразвуковой хирургии с контролем степени нерегулярности расположения элементов // *Акуст. журн.* 2020. Т. 66. № 4. С. 366–376.
6. *Cathignol D., Sapozhnikov O.A., Zhang J.* Lamb waves in piezoelectric focused radiator as a reason for discrepancy between O’Neil’s formula and experiment // *J. Acoust. Soc. Am.* 1997. V. 101. №3. P. 1286–1297.
7. *Halliwel N.A.* Laser vibrometry optical methods in engineering metrology. London: Chapman and Hall. Ed. Williams D.C. 1993. Ch 6. P. 179–211.
8. *Сапожников О.А., Смагин М.А.* Нахождение дисперсионных зависимостей для волн лэмбовского типа в вогнутой пьезоэлектрической пластине посредством оптической визуализации излучаемого в жидкость ультразвукового поля // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 2. С. 199–206.
9. *Riley W.A., Klein W.R.* Piezo-optic coefficients of liquids // *J. Acoust. Soc. Am.* 1967. V. 42. № 6. P. 1258–1261.
10. *Сапожников О.А., Морозов А.В., Катиньоль Д.* Акустооптическое взаимодействие при лазерной виброметрии в жидкости // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 3. С. 362–373.
11. *Сапожников О.А., Пономарев А.Е., Смагин М.А.* Нестационарная акустическая голография для реконструкции скорости поверхности акустических излучателей // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52. № 3. С. 385–392.
12. *Акустическая голография.* Пер. с англ. под ред. Прохорова В.Г. Л.: Судостроение, 1975. 304 с.
13. *Гук Л.Д.* Акустическая голография. Новосибирск: Наука, 1981. 64 с.
14. *Маларовский А.И., Пронюшкин В.И., Пыльнов Ю.В.* Формирование изображений методом импульсной акустической голографии // Сб. трудов ИОФ АН “Оптоэлектронная обработка данных дистанционного зондирования”. 1990. Т. 22. С. 78–106.
15. *Сапожников О.А., Пищальников Ю.А., Морозов А.В.* Восстановление распределения нормальной скорости на поверхности ультразвукового излучателя на основе измерения акустического давления вдоль контрольной поверхности // *Акуст. журн.* 2003. Т. 49. № 3. С. 416–424.
16. *Sapozhnikov O.A., Tsysar S.A., Khokhlova V.A., Kreider W.* Acoustic holography as a metrological tool for characterizing medical ultrasound sources and fields // *J. Acoust. Soc. Am.* 2015. V. 138. №3. P. 1515–1532.
17. *Nikolaev D.A., Tsysar S.A., Khokhlova V.A., Kreider W., Sapozhnikov O.A.* Holographic extraction of plane waves from an ultrasound beam for acoustic characterization of an absorbing layer of finite dimensions // *J. Acoust. Soc. Am.* 2021. V. 149. №1. P. 386–404.
18. *Forbes M., Letcher S.V., Stepanishen P.R.* A wave vector, time-domain method of forward projecting time-dependent pressure fields // *J. Acoust. Soc. Am.* 1991. V. 90. P. 2782–2793.
19. *Vecchio C.J., Lewin P.A.* Finite amplitude acoustic propagation modeling using the extended angular spectrum method // *J. Acoust. Soc. Am.* 1994. V. 95. № 5. P. 2399–2408.
20. *Stepanishen P.R., Benjamin K.S.* Forward and backward projection of acoustic fields using FFT methods // *J. Acoust. Soc. Am.* 1982. V. 71. P. 803–812.
21. *Williams E.G.* Fourier Acoustics: Sound Radiation and NAH. London: Academic, 1999. 306 p.
22. *Цысарь С.А., Синельников Е.Д., Сапожников О.А.* Применение метода акустической голографии для исследования ультразвуковых источников цилиндрической формы // *Акуст. журн.* 2011. Т. 57. № 1. С. 104–116.
23. *Williams E.G., Maynard J.D.* Holographic imaging without the wavelength resolution limit // *Phys. Rev. Lett.* 1980. V. 45. P. 554–557.
24. *Fink M.* Time Reversed Acoustics // *Physics Today.* 1997. V. 50(3). P. 34–40.
25. *Цысарь С.А., Сапожников О.А., Гурбатов С.Н., Демин И.Ю., Прончатов-Рубцов Н.В.* Определение положения ультразвукового источника при линейной и нелинейной акустической голографии // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского.* 2013. Т.3. № 1. С. 230–236.