

УДК 534.6

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИСТОЧНИКА  
ПРИ ЛИНЕЙНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ**

© 2013 г.

**С.А. Цысарь<sup>1</sup>, О.А. Сапожников<sup>1</sup>, С.Н. Гурбатов<sup>2</sup>, И.Ю. Демин<sup>2</sup>,  
Н.В. Прончатов-Рубцов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова<sup>2</sup>Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

sergey@acs366.phys.msu.ru

*Поступила в редакцию 16.11.2012*

Для определения истинного распределения акустического поля в пространстве достаточно знать распределение поля (амплитуды и фазы) на поверхности излучателя, которое находится методом акустической голографии. Точное восстановление истинного распределения поля на поверхности возможно только при точной локализации самой поверхности, на которой происходит восстановление. В настоящей работе представлен метод, позволяющий с требуемой точностью определить положение поверхности источника относительно поверхности измерений. Проверка метода осуществлялась на численной модели, а также экспериментально с использованием ультразвуковых излучателей мегагерцового диапазона.

*Ключевые слова:* акустическая голография, акустические преобразователи, акустические измерения.

**Введение**

Для определения пространственной структуры акустического поля, создаваемого ультразвуковым источником, очень перспективным является метод акустической голографии [1]. Метод имеет хорошо разработанный математический аппарат, основанный на использовании принципов Фурье-акустики [2, 3] или применении интеграла Рэлея [4]. Использование голографии дальнего поля позволяет восстанавливать распределение акустического поля на поверхности преобразователя с точностью до половины длины волны в среде, а голография ближнего поля позволяет даже превзойти дифракционный предел [5–9]. Тем не менее, восстановление распределения поля на поверхности источника возможно только при условии, что с достаточной точностью известно само положение источника относительно поверхности сбора голографической информации (поверхности сканирования). В ряде практически важных приложений допустимая неопределённость пространственной локализации источника для нахождения истинных характеристик акустического поля на его поверхности имеет порядок длины волны. При исследовании преобразователей, работающих на высоких частотах (более 10 МГц) или имеющих сложную форму, осо-

бенно трудно провести запись голограммы вдоль поверхности, точно локализованной относительно поверхности преобразователя. В зависимости от параметров излучателя (рабочая частота, волновые размеры, степень фокусировки) и поверхности сканирования (шаг, размеры, форма) ошибки в определении взаимного расположения поверхностей измерений и источника могут составлять много длин волн, что приводит к существенным ошибкам в расчете распределений амплитуды и фазы на поверхности источника. Рассчитанное при помощи метода акустической голографии поле на источнике с учетом описанных выше трудностей может заметно отличаться от истинного, что неприемлемо для задач, требующих знания точного распределения поля в пространстве, в том числе положений фокусов, боковых лепестков диаграммы направленности и других.

В настоящей работе предлагается метод обработки данных измерений, позволяющий устранить проблему неточной локализации поверхности измерений относительно поверхности излучателя. Применение указанного метода особенно актуально для излучателей со слабой симметрией поля и излучателей с характерными размерами неоднородностей поля, сильно превышающими длину волны в среде.

### Описание метода

Рассмотрим алгоритм предлагаемого метода для локализации поверхности цилиндрического фокусированного источника. На рис. 1 представлена ситуация, когда поверхность измерений расположена под неизвестным углом к акустической оси преобразователя, обозначенной вектором  $\mathbf{R}$ . При проведении стандартной процедуры голографического восстановления распределения акустического поля на поверхности излучателя будет найдено распределение поля по поверхности, не совпадающей с истинной поверхностью измерений (показана серым контуром). Эффективная акустическая ось нового виртуального преобразователя будет перпендикулярна поверхности измерений, т.е. в нашем случае окажется совпадающей с осью  $OZ$ . Полученное распределение на этой поверхности будет не только размыто, что отобразится на амплитуде полученного поля, но и будет иметь дополнительную неравномерность в распределении фазы, связанную с тем, что поверхность источника была повернута на определенный угол относительно поверхности измерений. Естественно, использование полученного распределения в качестве начальных данных для алгоритмов расчета поля в пространстве приведет к значительным ошибкам в определении не только положений характерных областей (фокальная область, боковые лепестки и др.), но и значений амплитуды поля в этих точках.

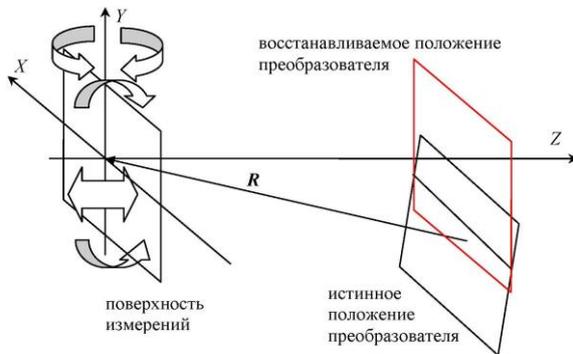


Рис. 1. Взаимное расположение поверхности источника, поверхности измерений и поверхности виртуального источника. Поверхность источника и поверхность измерений расположены под неизвестным углом

Для нахождения распределения поля вдоль истинной поверхности источника необходимо определить взаимное расположение поверхности измерений и поверхности источника. Определение положения можно проводить поэтапно: сначала найти угол поворота одной поверхности относительно другой, а затем произвести корректировку расстояния между центрами

двух поверхностей. Для определения угла (или углов) поворота предлагается использование фазового метода. Для этого проводится построение набора поверхностей, имеющих форму источника (заданной априорно) и расположенных на одном удалении от поверхности измерений, но ориентированных под разными углами  $\theta_i$  в горизонтальной и  $\Omega_i$  в вертикальной плоскостях, пробегающих все значения в диапазонах  $\theta_{\min} < \theta < \theta_{\max}$ ,  $\Omega_{\min} < \Omega < \Omega_{\max}$  с шагами  $\Delta\theta$  и  $\Delta\Omega$  соответственно. Набор таких поверхностей образует семейство так называемых «виртуальных» источников. На каждой такой поверхности проводится расчет акустического поля с помощью интеграла Рэлея или аппарата Фурье-акустики на основе экспериментально полученных данных амплитуды и фазы акустического давления вдоль поверхности измерений. Среди полученного набора виртуальных источников необходимо выбрать один, расположенный наиболее близко к истинной поверхности источника. Точность определения поверхности задается шагами  $\Delta\theta$  и  $\Delta\Omega$ .

Искомая поверхность имеет углы поворота  $\theta$  и  $\Omega$ , соответствующие максимуму функционала вида

$$S(\theta_i, \Omega_j) = \sum_{k,l} h(x'_k(\theta_i, \Omega_j), y'_l(\theta_i, \Omega_j)). \quad (1)$$

Здесь  $x'_k(\theta_i, \Omega_j)$  и  $y'_l(\theta_i, \Omega_j)$  – дискретные значения координат узлов сетки для виртуального источника, соответствующего углам  $\theta_i, \Omega_j$ . Суммирование ведется по всей поверхности виртуального источника. Функция  $h(x'_k(\theta_i, \Omega_j), y'_l(\theta_i, \Omega_j))$  – ступенчатая функция вида

$$h(x'_k(\theta_i, \Omega_j), y'_l(\theta_i, \Omega_j)) = \begin{cases} 1, & |grad(\phi(x'_k, y'_l))| \leq G_{\text{пор}}, \\ 0, & |grad(\phi(x'_k, y'_l))| > G_{\text{пор}}. \end{cases} \quad (2)$$

Уменьшением шага по углу и ужесточением ограничивающего условия на интегральный фазовый градиент можно с требуемой точностью обнаружить положение истинной поверхности источника.

После определения углов поворота производится коррекция расстояния между поверхностями источника и измерений, а также сдвиг поверхностей, если это необходимо. Коррекция расстояния осуществляется по алгоритму, аналогичному определению углов, с поиском максимума следующего функционала:

$$I(\theta, \Omega, z') = \int_{\Sigma} \left| \text{grad} \left( p(x'(\theta, \Omega), y'(\theta, \Omega), z') \right) \right| dx' dy'. \quad (3)$$

Здесь углы  $\theta, \Omega$  фиксированы, производится расчет для параметров  $z'$  в определенном диапазоне.

### Проверка метода на численной модели

Рассмотрим плоский излучатель квадратной формы, расположенный в плоскости  $XU$ . Параметры излучателя следующие: размер  $40 \times 40$  мм, частота 1 МГц, фаза на поверхности излучателя равномерна. Амплитуда на поверхности источника принимается равной единице, вне ее – нулю (рис. 2а, слева). Сетка имеет размеры  $160 \times 160$  мм, шаг по осям 0.5 мм. На рис. 2 показаны распределения только в области  $80 \times 80$  мм. Поверхность измерений расположена на расстоянии апертуры от излучателя (рис. 2а, справа). Положим, что поверхность измерений расположена строго параллельно поверхности излучателя. Тогда распределение поля на поверхности измерений будет выглядеть так, как показано на рис. 2б. Расчеты полей для плоского излучателя и плоской поверхности измерений проводятся с помощью метода, описанного выше.

Для того чтобы локализовать поверхность источника, проведем расчет акустического поля на поверхностях виртуальных источников, расположенных на одном удалении от поверхности измерений, но повернутых на углы  $\theta$  в плоскости  $XZ$  и  $\Omega$  в плоскости  $YZ$ , пробегающих все значения в диапазонах  $\theta_{\min} < \theta < \theta_{\max}$ ,  $\Omega_{\min} < \Omega < \Omega_{\max}$  с шагами  $\Delta\theta$  и  $\Delta\Omega$  соответственно. На рис. 2в показано характерное распределение поля на поверхности виртуального источника, повернутого относительно плоскости измерений на угол  $\Omega = 3^\circ$ .

Функционал  $S(\theta_i, \Omega_j)$ , определяемый выражением (1), пропорционален суммарной площади областей на поверхности виртуального источника, в которых выполняется неравенство  $|\text{grad}(\phi(x'_k, y'_i))| \leq G_{\text{пор}}$ . Чем больше значение  $S$  на поверхности конкретного виртуального источника, тем более равномерным является распределение фазы на этой поверхности. При условии того, что изначально распределение фазы на поверхности является в целом однородным с возможными отклонениями, связанными с дефектами излучателя и с наличием

волн Лэмба на поверхности излучателя, виртуальный источник с максимальным значением функционала  $S(\theta_i, \Omega_j)$  является максимально близким или совпадающим с поверхностью реального излучателя. Рассмотрим поведение функционала  $S$  при наклонах в вертикальной плоскости  $YZ$ . Сначала выбирается широкий диапазон изменения угла с крупным шагом и высокое пороговое значение градиента  $G_{\text{пор}}$ . Далее пороговое значение уменьшается, сужается область изменения угла и уменьшается шаг по углу. На рис. 3а представлены зависимости нормированной функции  $S/S_{\text{max}}$  от угла  $\Omega$  для шага по углу  $0.01^\circ$  и величин  $G_{\text{пор}} = \pi/a$ ,  $\pi/(4a)$  и  $\pi/(50a)$ . Здесь  $a$  – апертура излучателя.

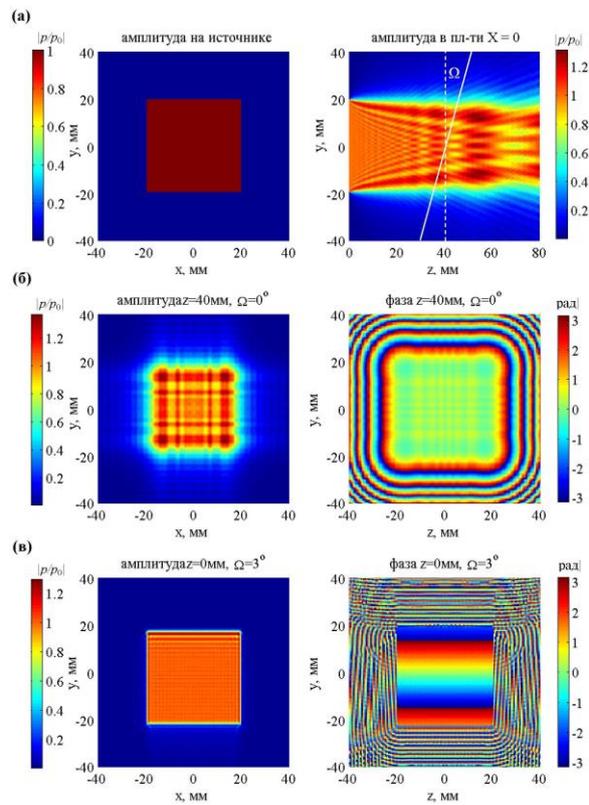


Рис. 2. Распределение амплитуды акустического давления на поверхности модельного преобразователя и создаваемое им поле в плоскости  $YZ$  (а).

Распределение амплитуды и фазы акустического давления на поверхности измерений при  $\Omega = 0$  (б).

Распределение амплитуды и фазы акустического давления на поверхности виртуального источника, расположенного под углом  $\Omega = 3^\circ$  (в). Амплитуда приведена к начальному значению на источнике

При поиске положения поверхности источника перебор углов  $\theta$  и  $\Omega$  выполняется одновременно, в результате чего получается дву-

мерное распределение функции  $S/S_{\max}$ , которое для рассматриваемой модели выглядит так, как показано на рис. 3б.

По максимуму на распределении выбирают соответствующие значения углов, которые в нашем случае равны нулю, так как мы установили поверхность измерений строго параллельно поверхности модельного излучателя. На двумерном распределении хорошо виден острый максимум, который соответствует искомым значениям углов. Для получения такой картины следует подбирать оптимальные значения величины  $G_{\text{пор}}$  и шагов по углам.

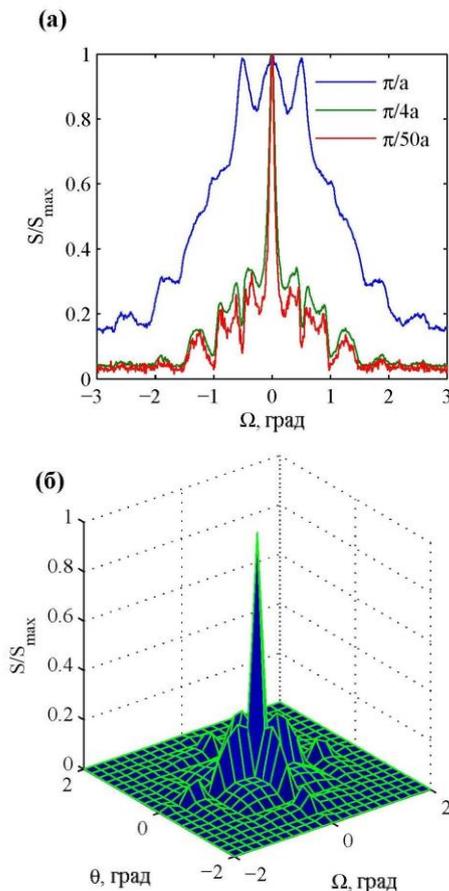


Рис. 3. Зависимость  $S/S_{\max}$  от угла  $\Omega$  для рассматриваемой модели (а). Шаг по углу  $0.01^\circ$ , величины  $G_{\text{пор}} = \pi/a$  (синяя линия),  $\pi/(4a)$  (зеленая линия) и  $\pi/(50a)$  (красная линия). Двумерная зависимость  $S/S_{\max}$  от углов  $\Omega$  и  $\theta$  для шага по углу  $0.1^\circ$  и  $G_{\text{пор}} = \pi/(4a)$  (б).

После определения углов поворота производится определение расстояния между поверхностями источника и измерений.

При демонстрации алгоритма на данной численной модели было сделано существенное упрощение: фаза выбиралась равномерной по

поверхности источника. Для реальных источников это далеко не так; на их поверхности всегда присутствуют искажения как амплитуды, так и фазы. Тем не менее, с помощью предложенного алгоритма путем подбора порогового параметра  $G_{\text{пор}}$  можно обнаружить поверхность виртуального источника с минимальным изменением фазы, связанным с поворотом плоскости измерений. Дополнительные трудности могут возникать при исследовании фазированных преобразователей, имеющих неизвестный сдвиг фазы между элементами. В этом случае невозможно различить сдвиг фазы вдоль источника, создаваемый паразитными задержками в электронном тракте, и фазовый сдвиг, обусловленный поворотом поверхности измерений. Поэтому важно иметь максимальное количество априорной информации об исследуемом излучателе.

### Экспериментальные результаты

Рассмотрим применение предложенного метода на практике. На рис. 4 представлен внешний вид пьезокомпозитного излучателя, работающего на частоте 6 МГц. Излучатель представляет собой цилиндр с семью плоскими гранями, каждая из которых имеет размер  $10 \times 1$  мм и состоит из 8 пьезокомпозитных элементов, работающих синфазно. Исследование такого преобразователя удобно проводить отдельно для каждой грани. В этом случае удобно пользоваться методом голографии источников, основанным на аппарате Фурье-акустики.

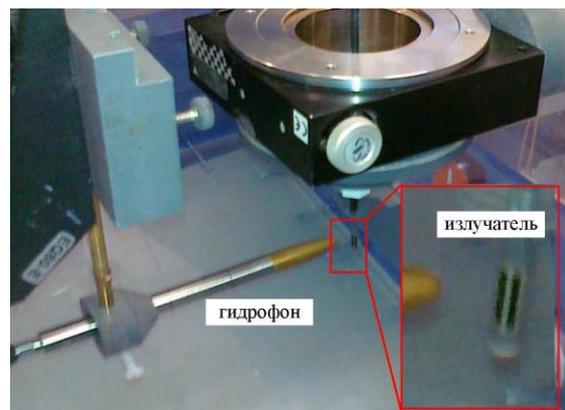


Рис. 4. Установка для проведения измерений акустического поля, создаваемого многоэлементным пьезокомпозитным излучателем с плоскими поверхностями. На каждой поверхности расположено 8 элементов.  $h = 10$  мм,  $l = 1$  мм,  $f = 6$  МГц

Для излучателей подобного типа достаточно сложно провести точную локализацию точек акустической оси на двух контрольных плоскостях, т.е. ошибки в определении положения по-

верхности измерений относительно поверхности источника неизбежны. Действительно, распределение поля акустического давления в плоскости, примерно параллельной поверхности излучателя, имеет вид, показанный на рис. 5а для расстояния 6 мм от источника. Видно, что характерный масштаб неоднородности, создаваемой представленным излучателем, имеет порядок миллиметра, в то время как требуемая точность в определении акустической оси порядка ста микрон. Дополнительная сложность в нахождении центра распределения рассматриваемого излучателя состоит в том, что структура поля имеет периодическую структуру по вертикали и для нахождения центрального пятна необходимо проводить сканирование по поверхности, превышающей размер самого источника, что сильно увеличивает время проводимых измерений. Таким образом, локализация

акустической оси производится с существенной ошибкой, даже если две точки оси выбираются на больших удалениях друг от друга.

На рис. 5а представлены измеренные распределения амплитуды и фазы для одной из граней указанного излучателя на расстоянии 6 мм от его поверхности с шагом 100 мкм.

При прямом использовании алгоритма акустической голографии для восстановления поля на поверхности преобразователя получают картины распределения, представленные на рис. 5б. По распределению фазы видно, что эффективная поверхность преобразователя наклонена в вертикальной плоскости. Для того, чтобы определить точное положение излучателя, применяется процедура, описанная выше. При поиске положения поверхности источника перебор углов  $\theta$  и  $\Omega$  выполнялся одновременно, в результате чего было получено двумерное рас-

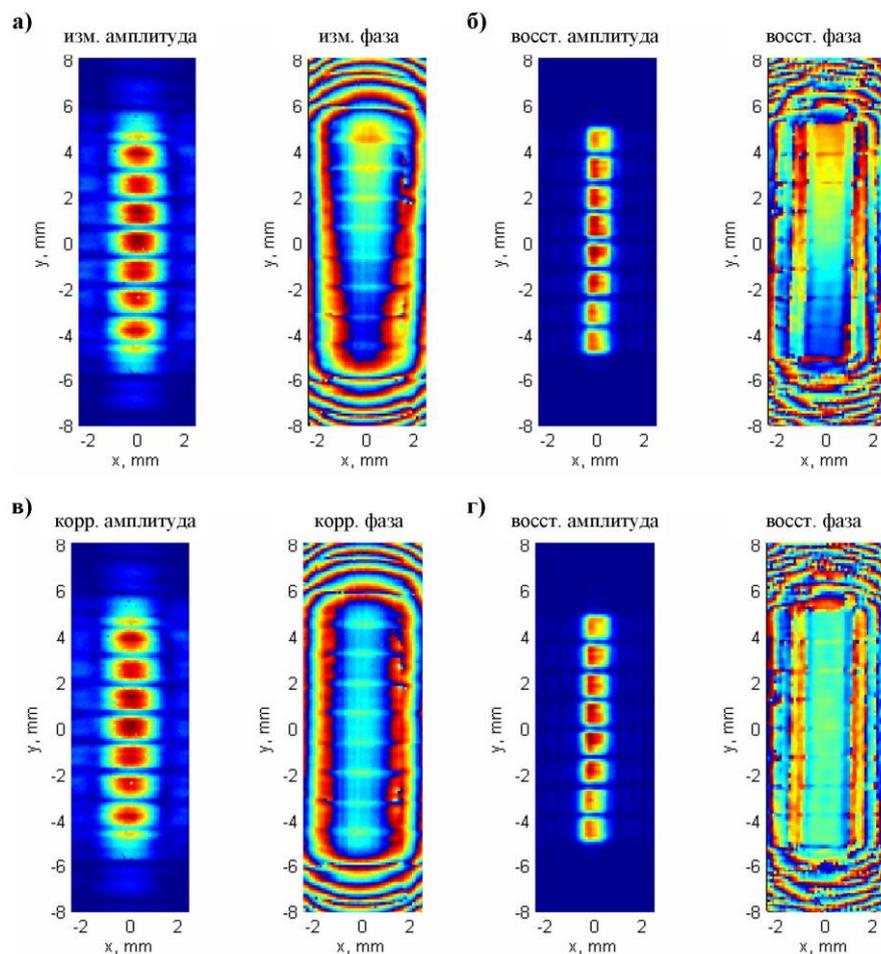


Рис. 5. Измеренные распределения амплитуды и фазы акустического давления для одной плоской грани излучателя с параметрами  $h = 10$  мм,  $l = 1$  мм,  $f = 6$  МГц на расстоянии 6 мм (а). Найденные распределения на поверхности виртуального преобразователя, не совпадающего с истинным (б). Скорректированные распределения на поверхности измерений с учетом ее поворота (в). Восстановленные распределения на поверхности реального излучателя (г).

пределение функции  $S/S_{\max}$ , представленное для значения  $G_{\text{пор}} = \pi/a$  на рис. 6б. Здесь величина  $a = h = 10$  мм. На рис. 6а представлены зависимости нормированной функции  $S/S_{\max}$  от угла  $\Omega$  для  $\theta = 0^\circ$ , шага по углу  $0.02^\circ$  и величин  $G_{\text{пор}} = 2\pi/a$ ,  $\pi/a$  и  $\pi/(4a)$ . Видно, что в отличие от случая идеального излучателя (см. рис. 3), который обладает равномерным распределением фазы по поверхности, распределение  $S/S_{\max}$  для  $G_{\text{пор}} = \pi/(4a)$  уже оказывается сильно изрезанным, а при  $G_{\text{пор}} = \pi/(50a)$  (на графике не показано) становится практически случайным. Для значений  $G_{\text{пор}} = 2\pi/a$  и  $\pi/a$  распределение  $S/S_{\max}$  является достаточно гладким и имеет явно различимый максимум, по которому можно

определить необходимые углы поворота. Оказывается, что поверхность излучателя повернута на угол всего в  $0.85^\circ$  в вертикальной плоскости. При учете данного поворота (см. рис. 5в) восстановление можно провести более точно. Полученное в результате расчетов распределение поля на поверхности излучателя представлено на рис. 5г. При такой незначительной ошибке определения взаимного расположения поверхности измерений и поверхности исследуемого источника восстанавливаемое распределение амплитуды практически не меняется, однако изменение фазы оказывается существенным.

При последующем расчете пространственного распределения акустического поля, создаваемого исследуемой гранью преобразователя, можно быть уверенными в том, что положение основных максимумов с выбранной точностью

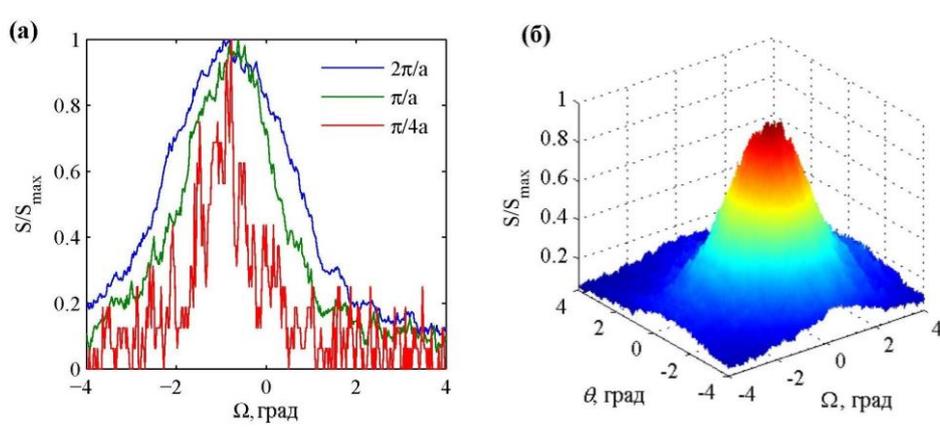


Рис. 6. Зависимость  $S/S_{\max}$  от угла  $\Omega$  для одной стороны исследуемого пьезокомпонитного излучателя для  $\theta = 0^\circ$  (а). Шаг по углу  $0.02^\circ$ , величины  $G_{\text{пор}} = 2\pi/a$  (синяя линия),  $\pi/a$  (зеленая линия) и  $\pi/(4a)$  (красная линия). Двумерная зависимость  $S/S_{\max}$  от углов  $\Omega$  и  $\theta$  для шага по углу  $0.02^\circ$  и  $G_{\text{пор}} = \pi/a$  (б)

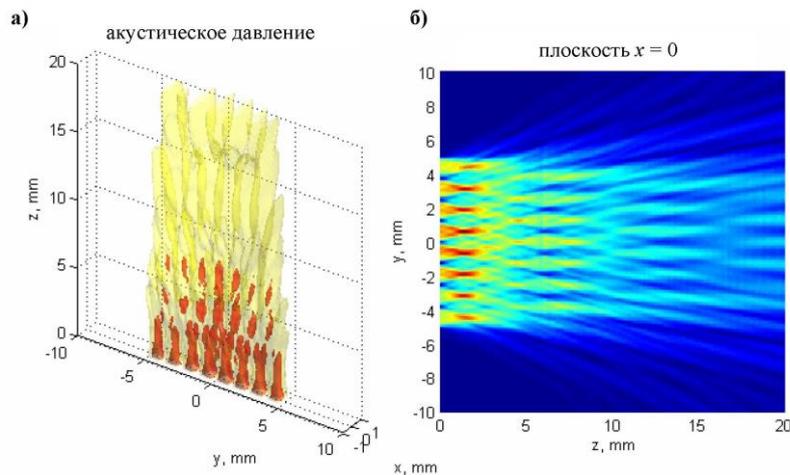


Рис. 7. Восстановленное по найденному на поверхности излучателя распределению поле в пространстве (а). Красным цветом показаны изоповерхности по уровню -6 дБ, желтым – по уровню -12 дБ. Это же распределение в плоскости  $X = 0$  (б)

совпадает с реальным. На рис. 7 представлено пространственное распределение амплитуды акустического давления, создаваемое исследуемой гранью пьезокомпозитного преобразователя.

### Выводы

Разработан метод, позволяющий с требуемой точностью определить взаимное расположение поверхности измерений и истинной поверхности источника. Работоспособность метода была проверена на численной модели, а также на реальных излучателях мегагерцового диапазона различной формы.

Для ряда излучателей, используемых в различных приложениях, особенно медицинских, где требуется высокая избирательность воздействия на живую ткань, представляемые указанным методом данные о пространственной структуре поля могут оказаться незаменимыми.

### Список литературы

1. Акустическая голография. Сб. статей. Пер. с англ. / Под ред. В.Г. Прохорова Л.: Судостроение. 1975. 304 с.
2. Williams E.G. Fourier acoustics: Sound radiation and nearfield acoustical holography // London Academic

Press: 1999.

3. 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
4. Сапожников О.А., Пищальников Ю.А., Морозов А.В. Восстановление распределения нормальной скорости на поверхности ультразвукового излучателя на основе распределения акустического давления вдоль контрольной плоскости // Акуст. журн. 2003. Т. 49, № 3. С. 416–424.
5. Williams E.G., Maynard J.D. Holographic imaging without the wavelength resolution limit // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. P. 554–557.
6. Williams E.G., Dardy H.D., Washburn K.B. Generalized nearfield acoustical holography for cylindrical geometry: Theory and experiment. // J. Acoust. Soc. Am. 1987. V. 81, № 2. P. 389–407.
7. Williams E.G., Houston B.H., Bucaro J.A. Broadband nearfield acoustical holography for vibrating cylinders. // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V. 86, № 2. P. 674–679.
8. Lee M., Bolton J.S. Patch near-field acoustical holography in cylindrical geometry // J. Acoust. Soc. Am. 2005. V. 118, № 6. P. 3721–3732.
9. Lee M., Bolton J.S. Scan-based near-field acoustical holography and partial field decomposition in the presence of noise and source level variation // J. Acoust. Soc. Am. 2006. V. 119, № 1. P. 382–393.

## POSITION DETERMINATION OF ULTRASOUND SOURCE DURING LINEAR AND NONLINEAR ACOUSTIC HOLOGRAPHY

S.A. Tsysar, O.A. Sapozhnikov, S.N. Gurbatov, I.Y. Demin, N.V. Pronchatov-Rubtsov

In order to determine the true distribution of the acoustic field in the space is enough to know the field distribution (amplitude and phase) on the surface of the radiator, which can be founded by acoustic holography method. For accurate calculation of the true distribution of the field on the surface exact location coordinates of this surface are required. In this paper we present a method that allows to determine the position of the source surface relative to the surface measurements with the required accuracy. Method was verified on the numerical model and experimentally, using ultrasonic transducers of MHz range.

*Keywords:* acoustic holography, acoustic transducers, acoustic measurements.