

Регистрация акустических полей в жидкости с применением волноводной системы

С.А. Цысарь¹, С.А. Петросян¹, В.Д. Свет², О.А. Сапожников¹

¹*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет*

²*Акустический Институт имени академика Н.Н. Андреева*

sergey@acs366.phys.msu.ru

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковое изображение в жидкостях может быть получено различными способами. Ограничения возникают в тех случаях, когда обычные системы визуализации не могут быть адаптированы к агрессивным средам (по химическим, термическим, радиоактивным признакам), например, в ядерных реакторах с жидкометаллическими теплоносителями. Для работы в зонах активной зоны реактора были разработаны пьезоэлектрические материалы с высокой точкой Кюри (до 900 °С) и ряд специфических приемно-излучающих систем. В нем участвуют группы из Литвы и Бельгии [1], Франции [2], США [3] и Японии [4]. Следует отметить, что некоторые из них были апробированы, и лишь немногие из них были использованы в реакторах из-за ряда существенных ограничений. Некоторые не имеют возможности получения изображений (одноканальные системы), другие имеют низкую чувствительность, существующие многоканальные системы имеют узкий сектор обзора.

В настоящей работе предлагается использовать набор акустических волноводов в виде твердотельных стержней для создания многоэлементной приемной решетки. Предлагаемый подход был проверен в неагрессивных жидкостях, были получены первые изображения. Метод основан на передаче ультразвукового сигнала с одного конца волновода, погружённого в жидкую среду, на противоположный, находящийся в среде с контролируемыми условиями.

АПЕРТУРНЫЙ СИНТЕЗ

В качестве первого шага в построении многоэлементного массива использовался метод апертурного синтеза. Применение этого метода позволяет избежать перекрестных помех между соседними стержнями в реальной многоканальной волноводной системе и сосредоточиться на оценке оптимальных параметров для достижения наилучшего качества получаемого изображения. В данном методе используется один волновод, который перемещается из точки в точку перпендикулярно его оси так, что входной конец волновода сканирует акустическое поле, поступающее от исследуемых рассеивателей. Полученный набор пространственных точек представляет собой синтезированную фазированную ультразвуковую решётку. Входной конец такой синтезированной волноводной системы принимает акустические сигналы из жидкости, передает их в виде упругих стержневых волн на выходной конец, где регистрируются колебания выходных торцов. Геометрия системы и типичные сигналы показаны на рисунке 1. Волноводы подбираются таким образом, чтобы в них присутствовала основная квазипродольная и изгибная моды. При достаточной длине волновода быстрая (квазипродольная) мода разделяется с медленной (изгибной) и может быть зарегистрирована отдельно. В правой части рисунка 1 представлены типичные необработанные сигналы для выбранных стержней. Первая часть каждого сигнала, находящаяся в окне длительностью около 40 мкс, использовалась в качестве граничных условий для процедуры формирования изображения.

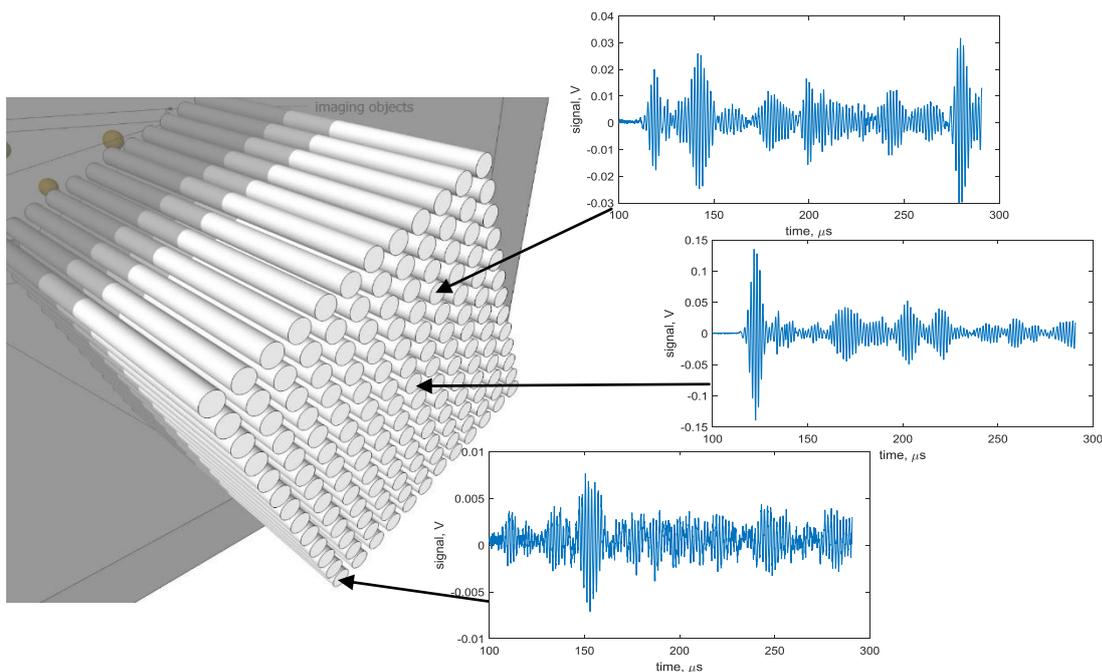


Рис.1. Схема синтезированной волноводной приёмной системы с представлением типичного вида выходных сигналов, показанных для трёх волноводов.

РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ

Формирование изображения может выполняться любым существующим способом. В настоящей работе представлены результаты полнодифракционного расчета обратного распространения акустического поля, также известного как метод акустической голографии [5].

Голографическая реконструкция рассеянного поля в текущей работе была выполнена в несколько этапов. На первом этапе из измеренных профилей сигнала колебаний торцов каждого стержня с координатами \mathbf{r}_{out_tip} выделялся сигнал $p(\mathbf{r}_{out_tip}, t)$, соответствующий квазипродольной моде. На следующем этапе для каждого волнового профиля применялось БПФ во временной области $p(\mathbf{r}_{out_tip}, t) \rightarrow S(\mathbf{r}_{out_tip}, \omega)$ и выполнялось фазовое сопряжение (которое соответствует процедуре обращения времени). На третьем этапе проводился фазовый сдвиг к входному концу (\mathbf{r}_{in_tip}) каждого стержня. После этого с использованием интеграла Рэлея или метода углового спектра проводилось численное обратное распространение каждой спектральной составляющей ω от входного конца волноводной системы до пространственной области построения изображения \mathbf{r}_{image} : $S(\mathbf{r}_{in_tip}, \omega) \rightarrow S(\mathbf{r}_{image}, \omega)$. На последнем шаге проводилось обратное преобразование Фурье $S(\mathbf{r}_{image}, \omega) \rightarrow p(\mathbf{r}_{image}, t)$ и осуществлялось построение изображения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для измерений методом апертурного синтеза была создана экспериментальная установка. Фокусированное ультразвуковое поле создавалось пьезокерамическим одноэлементным преобразователем, помещённым в дегазированную воду (система подготовки воды, Precision Acoustics, Ltd., Великобритания) на дне резервуара (см. Рис.2, справа). В качестве визуализируемых рассеивателей были использованы буквы из акустически поглощающего материала, нанесенные на поверхность преобразователя. Ось излучателя была направлена вертикально вверх. Апертура и

фокусное расстояние источника составляли 100 мм. Резонансная частота преобразователя равна 1.096 МГц, но преобразователь работал на частоте 589 кГц в соответствии с резонансной частотой принимающей волноводной системы. Данная частота определялась приёмным преобразователем, размещенным на выходном конце пространственно транслируемого волновода. Источником сигнала служил генератор (Agilent 33250A, Agilent Technologies, Inc., США) в сочетании с усилителем мощностью 9 Вт. Сигнал состоял из двух циклов рабочей частоты. Регистрация акустического поля выполнялась входным торцом одномодового волноводного кварцевого стержня диаметром 3 мм и длиной 455 мм. Выходной конец стержня был соединен с приемным одноэлементным плоским пьезокерамическим преобразователем, который, как уже указывалось, имел резонансную частоту 589 кГц (см. Рис.2, левая сторона). Апертурный синтез выполнялся вдоль горизонтальной плоскости на расстоянии 50 мм от центра излучателя. Перемещение вертикально ориентированного стержня производилось с помощью трехмерной системы позиционирования с шаговыми двигателями с ЧПУ (UMS3, Precision Acoustics, Ltd., Великобритания). Для каждого положения стержня форма профиля электрического сигнала, получаемого от приемного преобразователя, усреднялась по 128 стробированным измерениям для уменьшения шума на осциллографе (TDS5054, Tektronix, Inc., США) и передавалась на компьютер. Процедура измерения была автоматизирована с использованием кода, написанного в среде LabView. Зарегистрированные формы сигналов сохранялись в компьютере и затем обрабатывались в среде MatLab в соответствии с описанным выше алгоритмом.

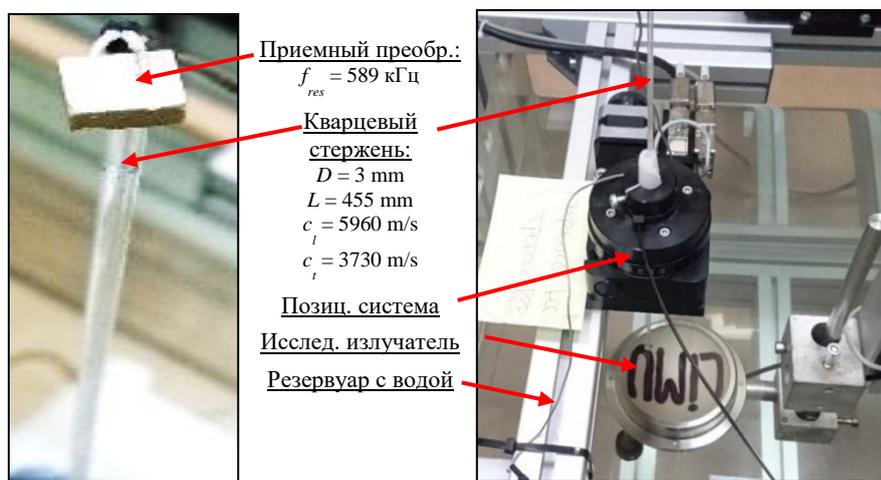


Рис.2. Кварцевый стержень с пьезокерамическим преобразователем на его торце (слева). Общий вид экспериментальной системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Обработка нестационарной голограммы поля позволяет определить реальную пространственно-временную структуру акустического поля в интересующей области. Целью настоящей работы было восстановление изображения искусственно созданных рассеивающих объектов, размещенных на поверхности излучающего преобразователя, с использованием предложенного волноводного метода регистрации поля. Поэтому представляющей интерес областью для расчета поля из голограммы является поверхность преобразователя, которая содержит исследуемые цели. После обработки принятых сигналов было восстановлено пространственно-временное распределение колебательной скорости на двумерной поверхности, соответствующей поверхности

преобразователя. В правой части рис. 3 представлено типичное фазовое распределение нормальной составляющей колебательной скорости, восстановленное на поверхности преобразователя. В левой части представлен преобразователь с поглощающей надписью «LIMU» на его поверхности. Видно, что все детали отчетливо локализованы на получающемся изображении. Следует отметить, что размер области сканирования (апертура волноводной решетки) составлял 4×4 см, расстояние между излучающим преобразователем и входным концом волновода – 5 см, а размер области изображения составлял 12×12 см. Это говорит о широких углах обзора представленной системы.

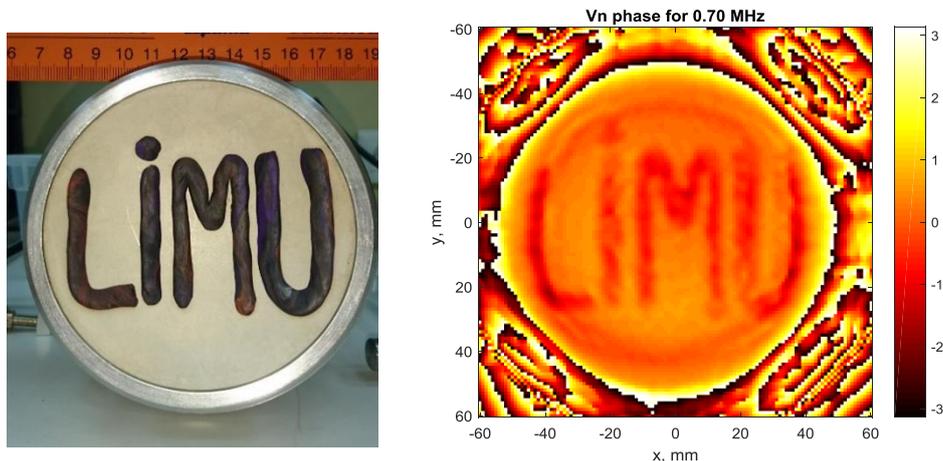


Рис.3. Пьезокерамический излучатель апертурой 10см с нанесёнными на его поверхность поглощающими буквами “LIMU” (слева). Полученное с волноводной приёмной системы изображение в виде распределения амплитуды колебательной скорости на поверхности излучателя для частоты 700 кГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенном исследовании показано, что полученное с помощью предлагаемого метода изображение обеспечивает хорошую локализацию всех рассеивателей, что демонстрирует потенциал волноводной системы для ультразвуковой визуализации в агрессивных жидкостях. Работа выполнена при поддержке РФФ, проект 17-72-10284.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Kazys et al. // IEEE Sensor J. 2006. V. 6. No 5. P. 1134.
2. F. Baque // Nucl. Tech. 2005. V. 150. No 1. P. 67.
3. L.J. Bond et al. // Proc. of Adv. Nuc. Fuel Cyc. and Syst. (GLOBAL 2007). September 9-13. Boise, Idaho. American Nuclear Society, Illinois. 2007. P. 1274.
4. M. Ando et al. // Proceedings of ICONE14 International Conference on Nuclear Engineering. Miami, Florida. ASME. 2006. Paper # 89558
5. O.A. Sapozhnikov et al. // J. Acoust. Soc. Am. 2015. V. 138. No 3. P. 1515.