

УДК 534.222

Н.Н. Куценко**АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ
ЖИДКИХ СРЕД**

Предлагается статистический метод определения нелинейных характеристик жидких сред. В работе приведены основные теоретические соотношения и результаты экспериментальных измерений. Описаны схема установки и алгоритм обработки данных для определения нелинейной функции среды.

Статистическая акустика; параметр нелинейности.

N.N. Kutsenko**ACOUSTIC METHOD OF FLUID NONLINEAR PROPERTIES
DETERMINATION**

Statistical method of fluid nonlinear characteristics determination is proposed. There are main theoretical equations and experiment results. The experimental stand scheme and data processing algorithm for estimation of medium nonlinear function are described.

Statistical acoustics; nonlinear parameter.

Акустические методы исследования характеристик материалов получили широкое распространение. Они практически незаменимы при работе в жидких средах, при исследовании свойств медицинских растворов, в ультразвуковой медицине. Определяя степень нелинейности среды, можно судить о ее физических свойствах [1].

Распространение акустических волн в газах и жидкостях описывается следующими уравнениями:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \right) + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \eta \Delta \vec{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \vec{v}), \quad (1)$$

- уравнение движения;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

- уравнение непрерывности;

$$p = p(\rho, S) \quad (3)$$

- уравнение состояния.

Здесь \vec{v} – скорость движения среды; ρ – ее плотность; p и S – давление и энтропия; η и ζ – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости.

В квадратичном приближении уравнение состояния имеет вид:

$$p' = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_S \rho' + \left(\frac{\partial^2 p}{\partial \rho^2} \right)_S \frac{1}{2} \rho'^2 = c_0^2 \rho' + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial c^2}{\partial \rho} \right)_S \rho'^2. \quad (4)$$

Здесь $p' = p - p_0$, $\rho' = \rho - \rho_0$, $c_0^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_{S, \rho_0}$. Первый член разложения соответ-

ствует закону Гука, второй учитывает нелинейность среды.

Уравнение (4) также записывают в следующем виде:

$$p' = A \left(\frac{p'}{\rho_0} \right) + \frac{1}{2} B \left(\frac{p'}{\rho_0} \right)^2 \quad (5)$$

и тогда отношением $\frac{B}{A}$ характеризуют степень нелинейности уравнения состояния данной среды.

Таким образом, учитывая нелинейность среды, представляет интерес процесс прохождения случайного процесса через нее. В данном случае становится возможным воспользоваться известным решением для нахождения выходного закона распределения (ЗР) [2]:

$$W(z) = \frac{W(x)}{\left| \frac{dz}{dx} \right|}, \quad (6)$$

где $W(x)$ – закон распределения мгновенных значений акустического давления до нелинейного преобразования; z – функция воздействия на $W(x)$ нелинейно зависящая от x ; $W(z)$ – закон распределения мгновенных значений акустического давления после нелинейного преобразования. Отсюда легко найти решение обратной задачи: измеряя $W(z)$ и $W(x)$ определить $z(x)$:

$$z(x) = \int \frac{W(x)}{W(z)} dx. \quad (7)$$

Для измерения $W(z)$ и $W(x)$ была собрана установка, структурная схема которой приведена на рис.1.

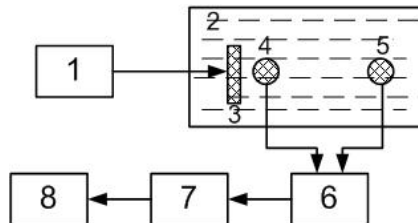


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В блоке 1 осуществляется формирование излучающего сигнала. Сформированный сигнал подается на акустическую излучающую антенну 3. В зависимости от того, какая частота является рабочей для антенны (резонансная частота), рассчитывается длина ближней зоны. В соответствии с этим определяются положения гидрофонов 4 и 5.

В случае исследования функции нелинейности среды гидрофон 4 располагается вблизи излучающей антенны (измеряется закон распределения при излучении), а гидрофон 5 на расстоянии $l_1 = l/l_0 \geq 1$. В упрощенной схеме можно воспользоваться только гидрофоном 5, предполагая, что изменение ЗР сформированного сигнала в акустической антенне пренебрежимо мало. В случае определения изменения нелинейности (определения инородных включений в среде) гидрофон 4 помещается на место гидрофона 5, а последний помещается на расстоянии $l_2 = l/l_0 \gg 1$. Таким образом, размер области сканирования равен $l = l_2 - l_1$.

Принятые сигналы поступают с гидрофонов на блок приема и предварительной обработки акустических сигналов 6. Далее сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь 7, который позволяет записать полученную информацию на ЭВМ 8.

Основные вычислительные процедуры производятся в алгоритме, реализованном в ЭВМ 8. На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма обработки данных и принятия решения. Сигналы с АЦП E20-10 фирмы L-Card записываются на жесткий диск (14 разрядов на отчет). Алгоритм принимает данные и производит определение гистограмм плотности вероятности для каждого сигнала. Затем, используя полиномиальное приближение, определяется аналитическое выражения закона распределения для каждой гистограммы. В зависимости от задачи исследования определяется либо функция нелинейности, либо – значения моментных функций, которые характеризуют изменение формы закона распределения. По результатам вычислений производится принятие решения для конкретной задачи.

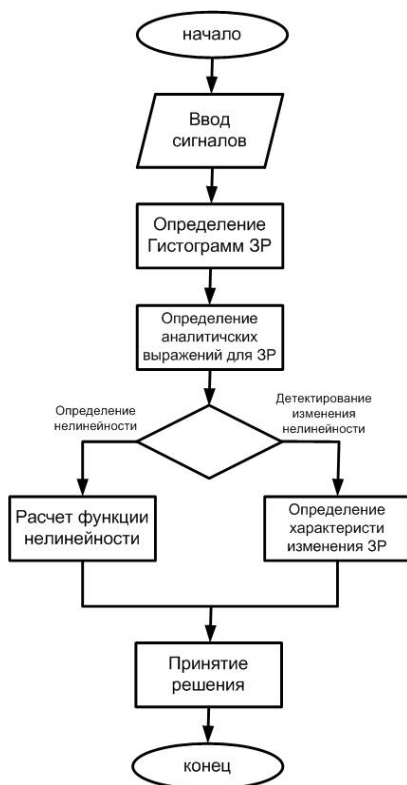


Рис. 2. Блок-схема алгоритма обработки сигналов и принятия решения

Процедуру определения функции нелинейности жидкой среды можно разбить на следующие этапы:

1. Задание закона распределение на излучателе.
2. Измерение закона распределения в точке приема.
3. Аппроксимация закона распределения полиномом, получение аналитического выражения для закона распределения.
4. Вычисление функции нелинейности по формуле (7).

Определение функции нелинейности будем проводить на основе экспериментальных данных, полученных для гармонических акустических волн. На рис. 3 показаны графики плотности вероятности мгновенных значений акустического давления при излучении (рис. 3, а) и на расстоянии $l/l_0 \approx 1$ (рис. 3, б).

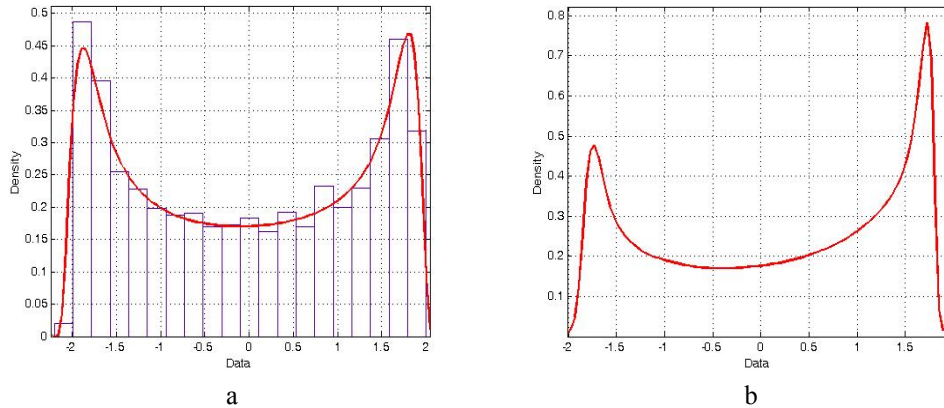


Рис. 3. Эволюция изменения закона распределения синусоидальной волны:
а – при излучении, б – в точке приема

Полиномиальная аппроксимация осуществлялась стандартными инструментами программного пакета Matlab: Curving Fitting Tool и Distribution Fitting Tool [3]. Повышение порядка полинома прекращается в том случае, если оно не дает увеличения точности более чем на 5 %.

ЗР при излучении восстанавливается полиномом следующей формы:

$$W_1(x) = p_1x^6 + p_2x^5 + p_3x^4 + p_4x^3 + p_5x^2 + p_6x + p_7,$$

со следующими значениями коэффициентов (значения даны с доверительными границами, вероятность попадания 95 %):

$p_1=0,01683$ (0,006254, 0,02741); $p_2=0,06399$ (0,02726, 0,1007); $p_3=0,07379$ (0,04448, 0,1031); $p_4=0,008781$ (-0,02671, 0,04427); $p_5=-0,01339$ (-0,042, 0,01521); $p_6=0,00615$ (-0,005968, 0,01827); $p_7=0,04239$ (0,03783, 0,04694).

Значения параметров, характеризующих точность восстановления [3]:

$$SSE = \sum_{i=1}^N w_i (y_i - \tilde{y}_i)^2, SSE = 1,3 \cdot 10^{-4}; SSR = \sum_{i=1}^N w_i (\tilde{y}_i - \bar{y})^2, SSR = 0,98586.$$

ЗР в точке приема восстанавливается полиномом следующей формы:

$$W_1(x) = p_1x^4 + p_2x^3 + p_3x^2 + p_4x + p_5$$

со следующими значениями коэффициентов (значения даны с доверительными границами, вероятность попадания 95 %):

$p_1=0,007242$ (0,005941, 0,008542); $p_2=0,002426$ (0,001233, 0,003619); $p_3=-5,867 \cdot 10^{-5}$ (-0,004002, 0,003885); $p_4=0,004894$ (0,002236, 0,007553); $p_5=0,03574$ (0,03362, 0,03786).

Значения параметров, характеризующих точность восстановления:

$$SSE = 7,3113 \cdot 10^{-5}; SSR = 0,99342.$$

При данных значениях коэффициентов полиномов можно вычислить функцию нелинейности среды:

$$f(x) = 2,4x^3 + 8,5x^2 + 9,9x.$$

Вид данной функции представлен на рис. 4.

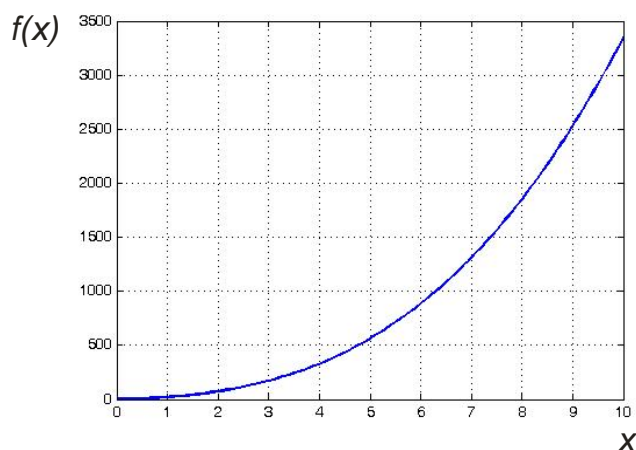


Рис. 4. Функция нелинейности, полученная по экспериментальным данным

Таким образом, определяя законы распределения мгновенных значений акустического давления, можно судить о степени нелинейности жидкой среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. – М.: Наука, 1966. – 519 с.
2. Тихонов В.И., Шахтарин Б.И., Сизых В.В. Случайные процессы. Примеры и задачи. Линейные и нелинейные преобразования: Учеб. пособие для вузов. Под ред. В.В. Сизых. – М.: Радио и связь, 2004. Т.2. – 400 с.
3. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

Куценко Николай Николаевич

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: kutsenkonn@mail.ru.

347928 г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.: (8634)371795.

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант.

Kutsenko Nikolay Nikolaevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kutsenkonn@mail.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia, Phone: (8634)371795.

Department of Hydroacoustic and Medical Engineering, post-graduate student.