

## Исследование затухания акустических сигналов в мелком природном водоеме

К. В. Дмитриев, А. А. Дорофеева, И. А. Панков, С. Н. Сергеев\*

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Изучалось распространение звукового сигнала в мелком водоеме. Проведена запись сигнала на нескольких известных расстояниях от излучателя. Вычислены амплитуды спектральных компонент сигнала в этих точках. Определена зависимость коэффициента затухания от частоты методом максимального правдоподобия.

PACS: 43.30.+m

УДК: 534.143, 534.231.2, 534.286.2

Ключевые слова: акустика мелкого моря, коэффициент звукового затухания, метод максимального правдоподобия.

В последнее время возрастает интерес к мелководным морям, в первую очередь, северным. Хорошо изучен процесс распространения звука в глубоком океане [1], где на некоторой глубине скорость звука минимальна, что приводит к образованию волновода. При этом дно океана оказывает слабое влияние. В мелких водоемах волноводные свойства, наоборот, обуславливаются именно дном и поверхностью, которые характеризуются набором параметров, являющихся в общем случае нестационарными в пространстве и времени [2,3]. Более сложные условия распространения звука объясняют меньшую степень изученности этого класса задач. Возможность определения свойств дна мелкого водоема акустическими методами является важным вопросом, поскольку бурение скважин под водой крайне трудоёмко. В перспективе это может позволить предложить новый подход, например, к поиску углеводородного сырья на шельфовой зоне. Вместе с тем морские эксперименты требуют серьёзных финансовых затрат. Поэтому представляется целесообразным выявить и отработать основные технические и организационные трудности в более простых условиях, выходящих, тем не менее, за рамки лабораторного эксперимента. В связи с этим в данной работе была поставлена задача проведения пробного натурного эксперимента по изучению влияния характеристик водоема на распространение акустического сигнала.

Эксперимент проводился в карьере, геометрия которого изображена на рис. 1. Его длина и ширина составляли соответственно 295 и 20 м, глубина  $h \approx 1$  м. Карьер находился в заболоченной области диаметра порядка 300 м. Измерения температуры воды в разных точках и на разной глубине дали значения  $16^\circ\text{C}$ .

Форма излученного сигнала  $f(t)$  в проведенном эксперименте определялась следующими соображениями. Принятый сигнал  $g(t)$  связан с ним линейным интегральным соотношением  $g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(t-t')f(t')dt'$ , где  $H(t)$  — передаточная функция водоема. Можно показать, что взаимная корреляционная функция принятого и излученного сигналов  $K_{gf}(\tau) \equiv \int g(t+\tau)f^*(t)dt$

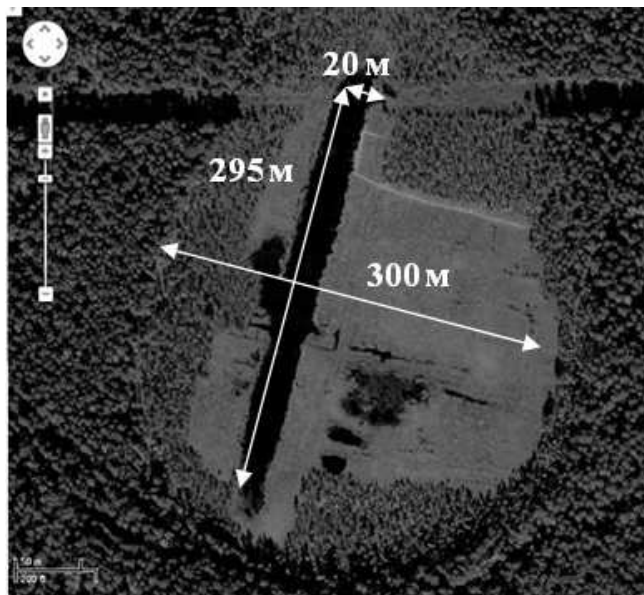


Рис. 1: Геометрия и размеры исследуемого водоема.

и автокорреляционная функция излученного сигнала  $K_{ff}(\tau) \equiv \int f(t+\tau)f^*(t)dt$ , где звездочкой обозначено комплексное сопряжение, связаны между собой тем же образом:

$$K_{gf}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\tau - \tau')K_{ff}(\tau')d\tau'. \quad (1)$$

Проведенные рассуждения позволяют заменить излучение и приём импульсного сигнала большой амплитуды (что требует создания более сложной экспериментальной аппаратуры) излучением и приёмом непрерывного сигнала относительно малой амплитуды с узкой автокорреляционной функцией. Такими свойствами, в частности, обладает сигнал с линейной частотной модуляцией, который можно легко реализовать на практике. В проведенном эксперименте частота сигнала менялась в диапазоне от 100 Гц до 10 кГц в течение 10 с.

Для определения зависимости коэффициента затухания акустического сигнала  $\alpha$  от частоты  $\omega$  был предло-

\*E-mail: sergeev@phys.msu.ru

жен следующий метод. Измерения сигнала  $g_n(t)$  производились в  $M = 9$  точках, находящихся на известных расстояниях  $r_n$  от источника сигнала. После корреляционной обработки, выполненной согласно (1), выделялись относительно короткие интервалы временного сдвига  $\tau$ , где величина корреляционной функции  $K_{gf,n}(\tau)$  была значительной. В рамках каждого такого интервала вычислялись спектральные компоненты корреляционной функции  $A_n(\omega) = \int K_{gf,n}(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau$ . С учетом цилиндрической расходимости и затухания они могут быть выражены через спектральные компоненты излученного сигнала  $A_0(\omega) = \int K_{ff}(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau$  и шума  $N(\omega)$ :

$$A_n(\omega) = A_0(\omega) \exp(-\alpha r_n) / \sqrt{r_n} + N(\omega). \quad (2)$$

На больших расстояниях вклад шумовой составляющей может быть сравним или даже превосходить вклад полезного сигнала. Поэтому для вычисления  $\alpha$  требуется взвешенный учет данных каждой точки наблюдения на каждой отдельной частоте. Для его осуществления используется метод максимального правдоподобия.

Пусть шум является гауссовым и обладает дисперсией  $\sigma^2$ . Вероятность того, что коэффициент затухания равен  $\alpha(\omega)$  при условии, что в результате обработки экспериментальных данных спектральные компоненты принимают значения  $\vec{A}(\omega) \equiv \{A_n(\omega); n = 1 \dots M\}$ , равна

$$w(\alpha(\omega) | \vec{A}(\omega)) = \frac{1}{(2\pi)^{M/2} \sigma^M} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left(A_n(\omega) - A_0(\omega) \frac{\exp(-\alpha(\omega)r_n)}{\sqrt{r_n}}\right)^2\right) \equiv L(\alpha). \quad (3)$$

Эта условная вероятность как функция  $L(\alpha)$  параметра  $\alpha$  является функцией правдоподобия. Она достигает своего максимума при условии  $\frac{\partial}{\partial \alpha} \ln L(\alpha) = 0$ , которое в итоге сводится к уравнению

$$\sum_{n=1}^M \left\{ \left( A_n(\omega) - A_0(\omega) \frac{\exp(-\alpha(\omega)r_n)}{\sqrt{r_n}} \right) \exp(-\alpha(\omega)r_n) \sqrt{r_n} \right\} = 0. \quad (4)$$

Его численное решение позволяет определить коэффициент затухания  $\alpha(\omega)$ . Множители  $\exp(-\alpha(\omega)r_n) \sqrt{r_n}$ , входящие в (4), учитывают «вес» каждой точки, где происходила регистрация сигнала. Вид этого множителя говорит о том, что ухудшение качества сигнала, вызванное затуханием (экспоненциальный множитель), несколько улучшается за счёт второго множителя (квадратный корень из расстояния), который обязан своим существованием образовавшемуся из-за границ волновода. В отсутствие границ и волновода второй множитель равен единице. Если положить эти «веса» равными единице, уравнение (4) сведется к простому методу наименьших квадратов, который для данной задачи может давать некорректные результаты, поскольку не учитывает зашумленность принятого сигнала.

На рис. 2 точками обозначены рассчитанные с помощью (4) значения коэффициента затухания в исследуемой полосе частот. На каждой частоте было произведено 6 измерений. Линия соответствует усредненной по этим измерениям зависимости  $\alpha(\omega)$ . Значительное затухание звука на частотах ниже 700 Гц объясняется тем, что этот диапазон лежит ниже критической частоты первой моды волновода, и амплитуда соответствующих спектральных компонент сигнала быстро убывает с расстоянием. С наименьшими потерями распространялся сигнал в диапазоне 700–2000 Гц, а сигнал на

частотах 4.5–6.5 кГц и выше 8.5 кГц сильно зашумлен.

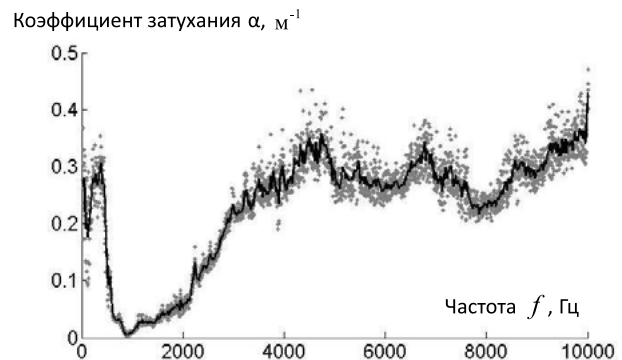


Рис. 2: Зависимость коэффициента затухания от частоты. Точками обозначены значения по 6 наблюдениям, линии соответствует усреднение по наблюдениям.

Таким образом, можно подвести следующие итоги. Во-первых, приведен метод исследования отклика водоема с помощью корреляционной обработки. Также с помощью статистической обработки сигнала построена зависимость коэффициента затухания от частоты, что позволило определить частотные полосы с сильным и слабым затуханием.

Исследование выполнено за счет гранта Президента РФ №НШ-283.2014.2 и грантов РФФИ № 15-05-01183, № 13-02-00632.

- 
- [1] *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. (Л.: Гидрометеиздат, 1982).  
[2] *Григорьев В.А. и др.* Акуст. журн. **47**, №3. С. 330. (2001).  
[3] *Белов А.И., Кузнецов Г.Н.* Акуст.журн. **60**, №2. С. 190. (2014).

## The study of shallow water acoustic wave attenuation

**K. V. Dmitriev, A. A. Dorofeeva, I. A. Pankov, S. N. Sergeev<sup>a</sup>**

*Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119991, Russia.  
E-mail: <sup>a</sup>sergeev@phys.msu.ru*

The propagation of sound in shallow water was studied. The recording of signal to several distances from the source was held. The amplitudes of the signal spectral components at these points were calculated. The dependence of the attenuation coefficient on the frequency was obtained by the maximum likelihood estimation.

PACS: 43.30.+m

Keywords: shallow water acoustics, sound attenuation coefficient, maximum likelihood estimation.

Received 27.07.2015.

### Сведения об авторах

1. Сергеев Сергей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: sergeev@phys.msu.ru.
2. Дмитриев Константин Вячеславович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: kdmitrie@aesc.msu.ru.
3. Дорофеева Алиса Александровна — студентка 4 курса; тел.: (915) 177-16-05, e-mail: aa.dorofeeva@physics.msu.ru.
4. Панков Иван Александрович — студент 3 курса, тел.: (495) 939-30-81, e-mail: ivan.pankov.365@yandex.ru.