

УДК 534.833.3

## ИСПЫТАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ДОННЫХ СЛУЧАЙНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В МОРЕ И ВОДОХРАНИЛИЩЕ

© 2004 г. В. И. Бардышев

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: [bvp@akin.ru](mailto:bvp@akin.ru)

Поступила в редакцию 15.05.03 г.

Проведены измерения отклика, коэффициента усиления и помехоустойчивости гидроакустической приемной компенсированной аддитивной антенной решетки со случайным пространственным размещением гидрофонов, установленной на дне пресноводного водохранилища, при многомодовом распространении звукового сигнала. Продемонстрировано шумопеленгование источников звука в море с использованием подобной антенной решетки в диапазоне частот 5–100 Гц. Разработан и испытан специализированный цифровой процессор для обработки сигналов, принимаемых случайной антенной решеткой.

Приемные гидроакустические антенны, установленные на дне моря, применяются для контроля судоходства в охраняемых акваториях [1], изучения биологических [2], сейсмических [3] и других источников сигналов и исследования распространения звука в океане. При выходе из строя или смещении некоторых гидрофонов антенная решетка (АР) оказывается случайным образом разреженной со средним межузловым расстоянием  $b > \lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина звуковой волны. Используя методы гидроакустического позиционирования, можно измерить координаты смещенных гидрофонов и при правильной компенсации восстановить эффективность решетки [4].

Существующие теоретические разработки позволяют определять характеристики случайных компенсированных разреженных антенн в однородной неискажающей среде [5–7]. В естественных гидроакустических волноводах с неточно определенными параметрами при многомодовом распространении сигнала расчеты характеристик таких антенн ненадежны, что повышает роль экспериментальных измерений. В естественных условиях вместо характеристики направленности антенны обычно измеряется аналогичная ей характеристика – отклик антенны [8], [9]. В ряде случаев целесообразно выполнять такие измерения в пресноводных водоемах достаточных размеров [9]. По характеру распространения звуковых сигналов и источникам внешних шумовых помех судоходные пресноводные водоемы приближаются к прибрежным морским акваториям. Результаты измерений с некоторыми ограничениями могут быть пересчитаны к условиям морских акваторий при сохранении коэффициента масштабности  $K$  с увеличением всех геометрических размеров, включая длину звуковой волны, в

$K$  раз. По сравнению с морскими экспериментами измерения в пресноводных водоемах значительно дешевле, технически проще и почти не ограничены метеоусловиями и во времени.

Ниже описаны измерения отклика, усиления и помехоустойчивости случайной разреженной компенсированной аддитивной АР в пресноводном судоходном Иваньковском водохранилище (Московском море). Его особенностью является аномально низкое значение скорости волн сжатия  $c_b$  в верхнем слое донного грунта ( $c_b = 100–300$  м/с), обусловленное наличием в грунте мелких пузырьков метана – продукта жизнедеятельности грунтовых анаэробных бактерий [10–13]. Близкие значения  $c_b = 76–168$  м/с получены в пресноводном водохранилище на территории США [14].

Согласно измерениям в Иваньковском водохранилище при  $kH \geq \pi$  и  $r/H > 2–3$  звук распространяется в виде нормальных волн (мод) [10]. Здесь  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $r$  – горизонтальное расстояние между корреспондирующими точками (дистанция),  $H$  – глубина места. При  $\pi \leq kH < 6.5$  распространяется только первая мода, и в этом случае эмпирические данные согласуются с расчетными. При  $kH > 6.5$  распространяются моды первого и более высоких номеров [10].

С учетом сказанного воспользуемся удобными для расчетов приближенными выражениями, предложенными в работе [12].

$$p(t) = p_0 r^{-1/2} \exp(i\omega t) \times \sum_{n=1}^N m_n^{-1/2} \exp(-im_n r) \sin(l_n z_0) \sin(l_n z), \quad (1)$$

$$m_n = (k^2 - l_n^2)^{1/2} \approx [k^2 - (\pi n/H)^2 - i\pi\rho_b c_b n^2 / \rho f H_b^3]^{1/2},$$

$$l_n = \frac{n\pi}{H_b}(1 + i\xi), \quad \xi = \rho_b c_b / w \rho H_b, \quad N = 2H_b/\lambda,$$

$$H_b = H + \Delta H,$$

где  $p(t)$  – переменное звуковое давление,  $t$  – текущее время,  $r$  – дистанция,  $p_0$  – амплитуда звукового давления, приведенного к дистанции  $r = 1$  м,  $i$  – мнимая единица,  $w = 2\pi f$ ,  $f$  – частота,  $m_n, l_n$  – горизонтальная и вертикальная составляющие волнового вектора,  $n$  – номер моды,  $N$  – максимальный номер моды,  $\Delta H = 0.15$  м. Источник звука – точечный ненаправленный на глубине  $z_0$ .

При  $\xi \ll 1$  можно считать  $l_n = n\pi/H_b$ , и фазовая скорость сигнала:

$$v_n = c[1 - (n\lambda/2H_b)^2]^{-1/2}, \quad (2)$$

амплитуда моды номера  $n$ :

$$p_n(r) = p_0 r^{-1/2} \exp(-\alpha_n r) m_n^{-1/2} \sin(l_n z_0), \quad (3)$$

$$m_n = [k^2 - (n\pi/H_b)^2]^{1/2},$$

коэффициент затухания моды номера  $n$ :

$$\alpha_n = \rho_b c_b n^2 / 4\rho f^2 H_b^3 [1 - (n\lambda/2H_b)^2]^{1/2}. \quad (4)$$

Вертикальное распределение амплитуды моды номера  $n$ :

$$p_n(Z) \approx \sin(\pi n z / H_b) \sin(\pi n z_0 / H_b). \quad (5)$$

Указанные формулы получили экспериментальное подтверждение на лабораторной установке, моделирующей гидроакустический канал с точно определенными параметрами и мягкими границами, и качественное подтверждение при измерениях в Ивановском водохранилище на частоте 3200 Гц при  $kH = 27.7$  [12].

В работе [13] расчеты звуковых полей давления и колебательной скорости, выполненные на ЭВМ с использованием более точного алгоритма, сравнивались с результатами измерений в Ивановском водохранилище при распространении тонального сигнала при  $N > 1$ . И так же было получено качественное подтверждение расчетов без точного количественного совпадения. При  $kr \gg 1$  фазы мод весьма чувствительны к изменениям их фазовых скоростей, обусловленным переменными по трассе распространения сигнала глубинами и акустическими параметрами грунта. Измерение по трассе этих параметров с требуемой точностью и подробностью практически неосуществимо, что и ограничивает точность расчетов. Однако они применимы для качественных оценок и пояснения результатов экспериментальных измерений.

Таблица 1

$f$ , Гц	$\bar{H}$ , м	$H$ , м	$H_0$ , м	$k\bar{H}$	$kr$	$N$	$N_e$
290	3.7	3.8	4.7	4.8	91.4	1	1
400	3.9	4.0	4.9	11.2	126.1	2	1
3150	4.4	4.5	5.4	62.1	993.2	19	8

Перейдем к описанию наших экспериментальных измерений в Ивановском водохранилище. Прежде всего были проверены условия распространения звука на выбранной для экспериментов трассе. По трассе были промерены глубины, отобраны пробы воды в грунта. Периодически измерялись температура воды, скорость ветра и высота ветровой волны. Температура воды была постоянна по глубине и равна  $+7^\circ\text{C}$ . Соленость воды оказалась ниже чувствительности метода измерения (менее 1‰). Вычисленная скорость звука в воде  $c = 1434.8$  м/с. Скорость ветра не превышала 2 м/с, среднеквадратическое отклонение взволнованной поверхности воды  $\sigma \approx 2$  см  $\ll \lambda$ , благодаря чему рассеяние звука на ней незначительно. Дистанция  $r = 72$  м, глубины по трассе распространения переменные с отклонением от средней глубины  $\bar{H}$  в пределах  $\pm 0.9$  м с горизонтальным размером неровностей около 30 м. Глубины в точках излучения  $H_0$ , приема  $H$ , параметр  $k\bar{H}$  и расчетные высшие номера распространяющихся мод  $N$  и эффективных мод  $N_e$  приведены в табл. 1. Эффективными считаются моды, содержащие в сумме не менее 90% энергии сигнала на дистанции  $r$ . Различие глубин при измерениях на разных частотах обусловлено изменениями уровня водохранилища при переменном режиме работы гидроэлектростанции и водосливной плотины. Согласно формуле (4) коэффициент затухания мод примерно пропорционален  $n^2$ , моды с номерами  $n > N_e$  при  $kr \gg 1$  сильно затухают. Расчеты  $N$  и  $N_e$  выполнялись по формулам (1)–(4).

Излучатель звуковых сигналов опускался на трассе на глубину  $z_0$ , измеряемую от поверхности воды до его геометрического центра, с помощью подъемного устройства, установленного на платформе, смонтированной на свайных опорах. На дистанции  $r = 72$  м от него на дне была установлена размеченная вертикальная мачта, по которой перемещался приемный гидрофон. С помощью мачты измерялись также уровень воды и глубина  $H$ . Отношение сигнала к шумовой помехе превышало 20 дБ. На рис. 1 показаны эмпирические и расчетные зависимости амплитуды сигнала от глубины  $|p(z)|$ . Расчеты выполнялись по формулам (1)–(5). На частотах 290 Гц и 400 Гц эмпирические данные соответствуют расчетным. На частоте 290 Гц распространяется одна первая мода,

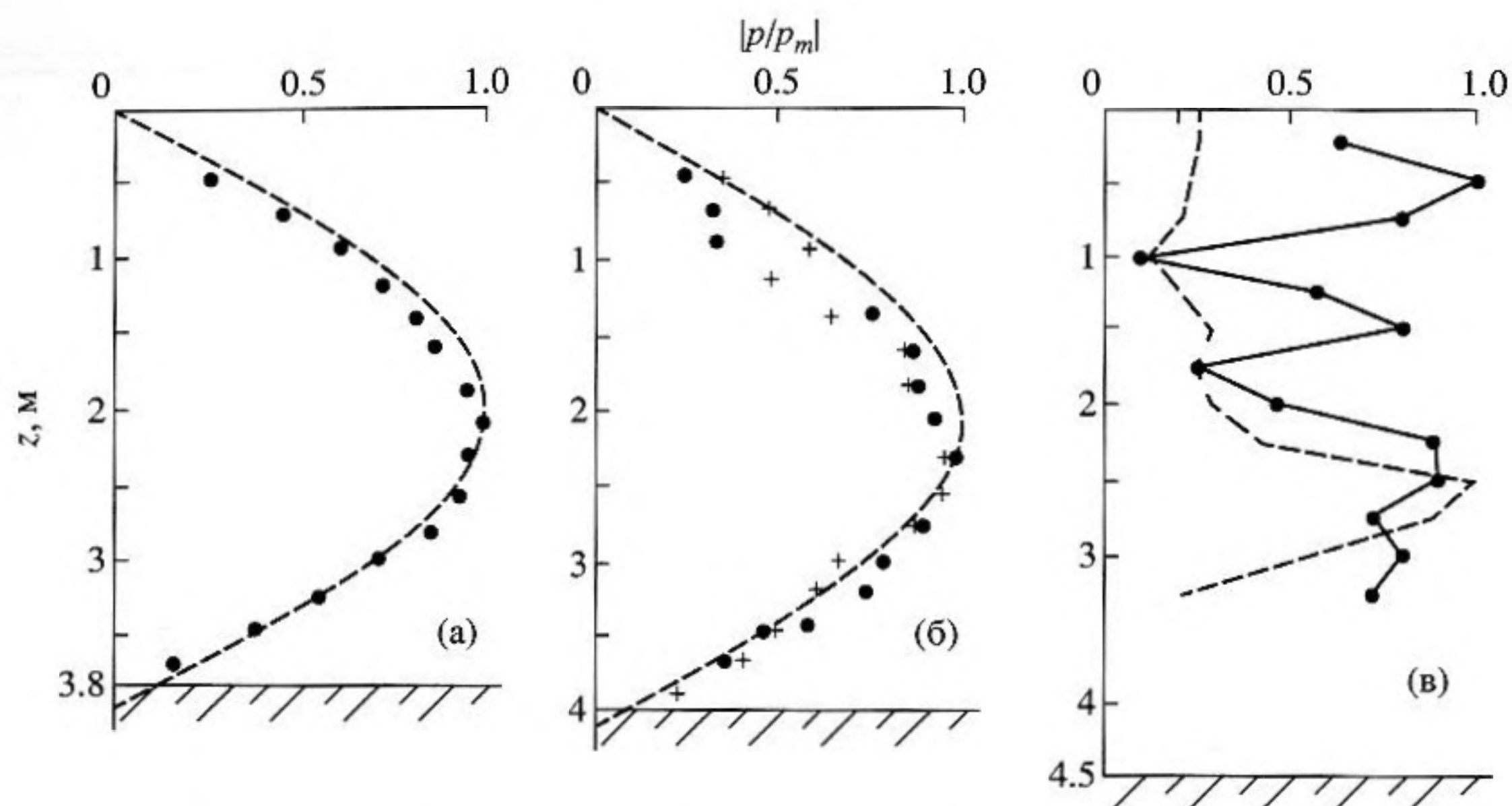


Рис. 1. Расчетные (пунктир) и эмпирические (точки и крестики) зависимости амплитуды давления тональных звуковых сигналов, нормированные на максимальные значения, в зависимости от глубины точки приема на дистанции 72 м от точки излучения: а – для частоты сигнала  $f = 290$  Гц, б –  $f = 400$  Гц (крестики – результаты повторного измерения), в –  $f = 3150$  Гц. При расчетах значение  $H$  увеличено на 0.15 м согласно рекомендации работы [12].

а на частоте 400 Гц – первая и вторая, но коэффициент затухания, второй моды относительно велик, и в точках приема преобладает первая мода. Эти результаты согласуются с моделью гидроакустического канала с мягкими границами, описываемой формулами (1)–(5). На частоте 3150 Гц эмпирическая функция  $|p(z)|$  не совпадает с расчетной и соответствует интерференции не менее пяти эффективных мод, что качественно не противоречит принятой модели канала.

Эти результаты в целом согласуются с полученными ранее [10–13]. Далее при расчетах мы пользовались выражениями (1)–(5), и в соответствии с рекомендациями работы [10] взяли значения  $c_b = 200$  м/с и  $\rho_b = 1950$  кг/м<sup>3</sup>.

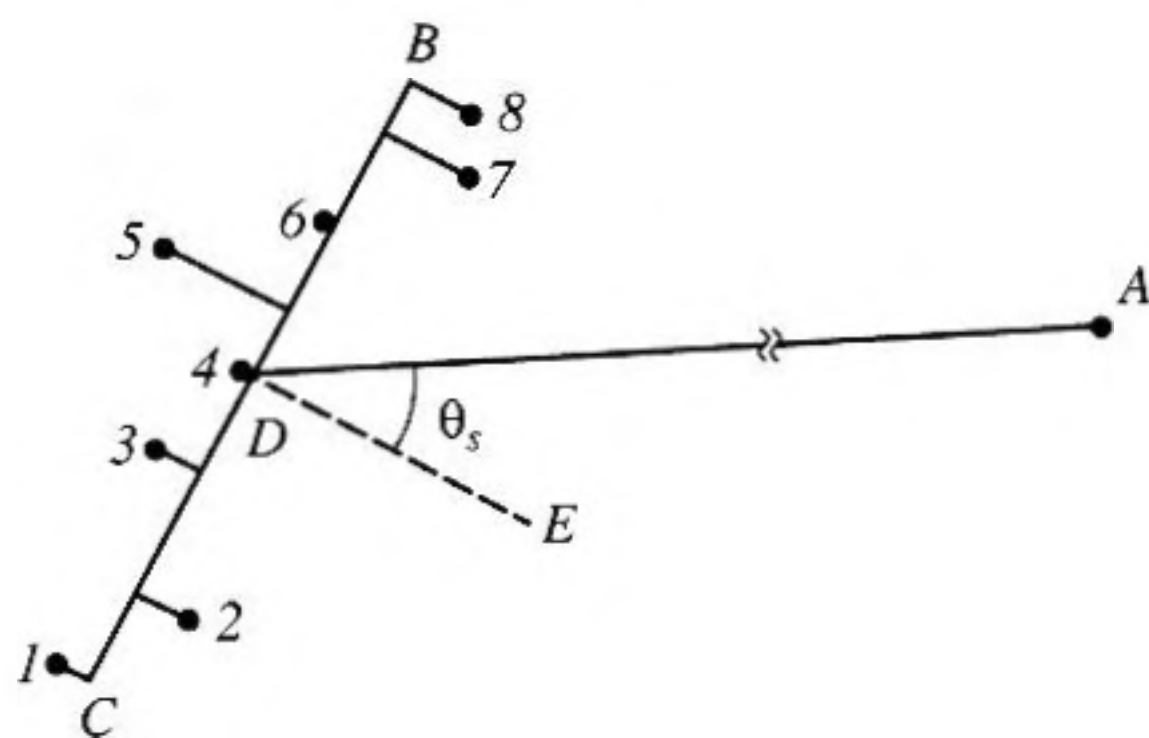


Рис. 2. Геометрия экспериментальной случайной AP в плане: 1–8 – узлы AP, BC – базовая линия AP, DE – перпендикуляр к центру BC (директриса), A – точка излучения сигнала,  $AD = r = 112.7$  м – дистанция до точки излучения,  $\theta_s = 32^\circ$ .

На продолжении трассы, использованной при измерениях  $|p(z)|$ , была установлена донная случайная AP. Излучатель сигнала находился в прежней точке при  $z_0 = 3$  м,  $H_0 = 4.7$  м. Излучался непрерывный шумовой сигнал в полосе частот 2500–3000 Гц со средней частотой  $\bar{f} = 2750$  Гц, которой при  $c = 1434.8$  м/с соответствовала средняя длина звуковой волны  $\lambda = 0.52$  м. Антенна была установлена на плоской жесткой раме и затем уложена на дно. Количество гидрофонов  $J = 8$ , их центры располагались на высоте 0.5 м над поверхностью грунта. По трассе распространения сигнала и в месте установки AP  $\bar{H} = 4.2$  м. Геометрия AP в плане показана на рис. 2. AP вписывается в прямоугольник с размерами  $7.5 \times 2.5$  м. Случайные отклонения фазовых центров гидрофонов от чертежа не превышали 0.5 см. Расположение AP относительно точки излучения сигналов определялось с помощью мерной ленты и уточнялось акустическим способом. При этом излучатель шумового сигнала заменялся на электроискровой излучатель мощных коротких импульсов, опускавшийся в ту же точку A. Измерялись разности времени вступления акустического импульса  $t_{1j}$  в точки приема  $1, j$  со стандартной ошибкой  $\sigma t = 1.3 \times 10^{-5}$  с. Стандартная ошибка разности дистанций от точки A до точек  $1, j$   $\sigma r_{1j} = U_1 \sigma t$ , где  $U_1$  – расчетное значение групповой скорости первой моды. В нашем случае для частот в несколько КГц  $U_1 \approx c$ , и  $\sigma r_{1j} \approx 0.02$  м. Согласно чертежу, длина базовой линии AP  $d = BC = 7.5$  м =  $14.4\lambda$ . Среднеквадратическое отклоне-

ние (СКО) узлов АР от базовой линии равно 0.8 м. СКО узлов АР от узлов эквивалентной ей эквидистантной линейной АР (с параметрами  $N = 8$ ,  $d = 7.5$  м, межузловое расстояние  $b = 1.07$  м) вдоль базовой линии равно 0.37 м. Поскольку  $b > \lambda$ , то АР можно считать разреженной, дистанция от точки излучения сигнала до центра АР  $AD = r = 112.7$  м,  $kr = 1361.8$ . Расчетные параметры мод в точке  $D$  представлены в табл. 2. Можно считать, что поле в узлах АР формируется первыми шестью модами. Моды более высоких номеров сильно затухают при распространении или слабо возбуждаются.

При обработке сигналов и помех, принимаемых гидрофонами АР, измерялись значения мощностей сигналов и помех, функции взаимной нормированной корреляции сигналов, принятых парами гидрофонов, а также помех, отклик антенны в зависимости от угла компенсации, коэффициент усиления антенны и ее помехоустойчивость. При этом использовался стандартный алгоритм обработки сигналов компенсированной аддитивной антенны:

$$D_{asp}(\theta) = \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J p_{spj} [t_q - \tau_{1j}(\theta)]^2, \quad (6)$$

где  $D_{asp}(\theta)$  – эмпирический отклик антенны, или энергия сигнала в сумме с помехой на выходе системы обработки при угле компенсации  $\theta$ ,  $q$  – номер дискретного отсчета сигнала,  $j$  – номер узла и соответствующего ему канала антенны,  $J$  – количество узлов,  $p_{spj}$  – величина отсчета с номером  $q$  входного сигнала в сумме с помехой,  $\tau_{1j}(\theta)$  – время аппаратной задержки сигнала в канале с номером  $j$  относительно канала с номером 1, соответствующее углу компенсации  $\theta$ ,  $\tau_{1j}(\theta) = d_{1j} \sin \theta_{kj} / v_1$ ,  $\theta_{kj} = (\theta + \theta_{1j})$ ,  $\theta_{1j}$  – угол между линией, соединяющей узлы 1,  $j$ , и базовой линией АР,  $d_{1j}$  – расстояние между узлами 1,  $j$ . Время накопления сигнала  $T = (Q - 1) / f_d \cdot f_d$  – частота квантования сигнала. В нашем случае  $Q = 4096$ ,  $T = 0.2$  с.

Таким образом, обработка сигнала состояла во временной компенсации сигналов в каждом канале антенны, суммировании их, возведении в квадрат и накоплении по времени реализации длительностью  $T$ .

Отклик антенны на помеху  $D_{ap}(\theta)$  определялся согласно алгоритму (6), где  $p_{spj}$  заменяются на отсчеты помехи при выключенном излучателе  $p_{pj}$ .

Усредненные по всем каналам антенны на входе системы обработки значения энергии сигнала

Таблица 2

$n$	$\alpha_n$	$v_n$ , м/с	$ p_n / p_4 $
1	$2.19 \times 10^{-5}$	1434.4	0.66
2	$8.82 \times 10^{-4}$	1445.2	0.77
3	$2.02 \times 10^{-3}$	1458.6	0.54
4	$3.62 \times 10^{-3}$	1478.0	1.0
5	$5.74 \times 10^{-3}$	1504.1	0.17
6	$8.85 \times 10^{-3}$	1537.8	0.15
7	$1.18 \times 10^{-2}$	1581.0	0.005

в сумме с помехой  $D_{sp}$ , помехи  $D_p$  и сигнала  $D_s$  вычислялись по формулам:

$$D_{sp} = \frac{1}{J} \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J p_{spj}^2(t_q), \quad D_p = \frac{1}{J} \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J p_{pj}^2(t_q),$$

$$D_s = D_{sp} - D_p.$$

Среднее по всем каналам входное отношение сигнала к помехе  $E = D_s / D_p$ . В нашем случае  $E = 1800$  и  $D_s \approx D_{sp}$ .

Отклик антенны на сигнал  $D_{as}(\theta) = D_{asp}(\theta) - D_{ap}(\theta)$ . ОСП на выходе системы обработки  $E_a(\theta) = [D_{asp}(\theta) - D_{ap}(\theta)] / D_{ap}(\theta) \approx D_{asp}(\theta) / D_{ap}(\theta)$ . В нашем случае  $E_a(\theta) \gg 1$  и  $D_{as}(\theta) \approx D_{asp}(\theta)$ .

На рис. 3 показана эмпирическая зависимость отклика антенны от угла компенсации  $\theta$ , нормированная к его максимальному значению при  $\theta = \theta_s$ . Боковые лепестки отклика имеют нерегулярный характер, обычный для случайной АР, и все они по уровню ниже главного лепестка. Уровень максимального бокового лепестка равен 0.56, что на 2.5 дБ ниже главного лепестка. Таким образом, однозначное пеленгование одиночного источника шума возможно. Средний уровень боковых лепестков, равный 0.21, намного превышает вели-

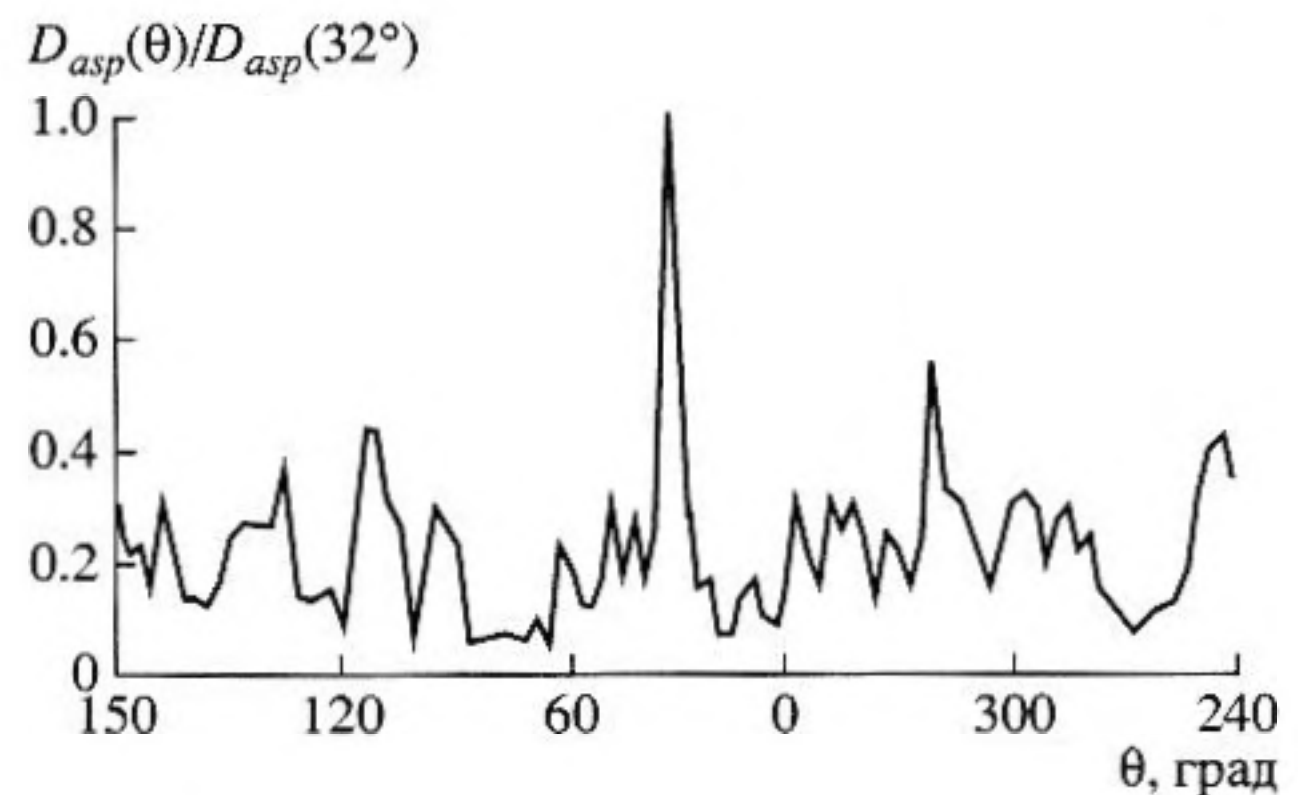


Рис. 3. Эмпирический отклик АР в зависимости от угла компенсации  $\theta$ , нормированный к его максимальному значению при  $\theta = \theta_s$ .

чину  $1/E = 5.5 \times 10^{-4}$ , благодаря чему внешние помехи практически не искажают отклика антенны.

При полной пространственной корреляции сигнала по апертуре антенны при аппаратных задержках времени, соответствующих углу компенсации  $\theta_s$ , ( $R_{sij} = 1$ ), и полной декорреляции помех ( $R_{pij} = 0, i \neq j$ ) средний уровень боковых лепестков должен приближаться к величине  $1/J = 0.125$ , что на 2.3 дБ ниже эмпирического уровня.

Эмпирическая угловая ширина главного лепестка отклика антенны по уровню  $-3$  дБ  $\Delta\theta_e = 7^\circ$ . Для сравнения оценим ширину  $\Delta\theta_T$  главного лепестка ХН непрерывной линейной компенсированной антенны при наших значениях  $d, \lambda, \theta_s$ . Согласно [15]

$$\Delta\theta_T = \theta_2 - \theta_1, \quad \theta_{1,2} = \arcsin\left(\sin\theta_s \pm 1.39 \frac{\lambda}{\pi d}\right). \quad (7)$$

Считая  $\lambda = V_1/\bar{f} = 0.52$  м, получим  $\Delta\theta_T = 5^\circ$ .

Покажем, что наблюдавшееся расширение главного лепестка отклика АР и ухудшение других ее характеристик можно объяснить снижением пространственной корреляции сигнала при многомодовом его распространении в гидроакустическом канале.

Оценим пространственную корреляцию сигнала с учетом фазовых скоростей эффективных мод. Пусть точки приема  $i, j$  расположены на одной глубине в плоскостром волноводе на расстояниях  $r_i, r_j$  от точки излучения,  $r_i - r_j = \Delta r > 0$ , и шумовой сигнал с равномерным спектром в полосе частот  $w_2 - w_1 = \Delta w > 0$  распространяется в виде суммы эффективных мод одинаковой амплитуды с номерами  $1 \dots N$  и фазовыми скоростями  $v_1 \dots v_N$ ,  $v_N - v_1 = \Delta v > 0$ . Фаза тонального сигнала с частотой  $w_1$  в точке  $i$   $\varphi_i(w_1) \in \left[ w_1\left(t - \frac{r_i}{v_1}\right), w_1\left(t - \frac{r_i}{v_N}\right) \right]$ .

Аналогичные выражения можно написать для частоты  $w_2$  и точки  $j$ . При введении в точке  $j$  аппаратной задержки сигнала на время:  $\Delta t = \Delta r/v_1$  фаза сигнала на частоте  $w_1$  в точке  $j$  будет лежать в интервале  $\varphi_j(w_1) \in \left[ w_1\left(t - \frac{r_j}{v_1}\right), w_1\left(t - \frac{r_j}{v_N} - \frac{\Delta r}{v_1}\right) \right]$ .

Тогда максимальная разность фаз сигнала на частотах  $w_1, w_2$  в точках  $i, j$   $\varphi_{ijm}(w_1) = w_1 \frac{\Delta r \Delta v}{v_1 v_N}$ ,

$\varphi_{ijm}(w_2) = w_2 \frac{\Delta r \Delta v}{v_1 v_N}$ . Функция взаимной корреляции тонального сигнала  $r_{ij}$  в точках  $i, j$  связана с разностью его фаз соотношением  $R_{ij} = \cos \varphi_{ij}$ . Счи-

тая среднее значение разности фаз  $\bar{\varphi}_{ij} \approx \varphi_{ijm}/2$  для шумового сигнала

$$R_{ij} \approx \frac{1}{\bar{\varphi}_{ij}(w_2) - \bar{\varphi}_{ij}(w_1)} \int_{\bar{\varphi}_{ij}(w_1)}^{\bar{\varphi}_{ij}(w_2)} \cos x dx = \frac{\sin \bar{\varphi}_{ij}(w_2) - \sin \bar{\varphi}_{ij}(w_1)}{\bar{\varphi}_{ij}(w_2) - \bar{\varphi}_{ij}(w_1)}.$$

При  $\varphi_{ijm}(w_1), \varphi_{ijm}(w_2) \ll 1$ , используя приближение  $\sin x \approx x - x^3/6$ , получим

$$\begin{aligned} R_{ij} &\approx 1 - \frac{1}{24} \left( \frac{\Delta r \Delta v}{v_1 v_N} \right)^2 (w_1^2 + w_1 w_2 + w_2^2) = \\ &= 1 - \frac{\pi^2}{6} \left( \frac{\Delta r \Delta v}{v_1 v_N} \right)^2 (f_1^2 + f_1 f_2 + f_2^2) = \\ &= 1 - \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{\Delta r \Delta v f_0}{v_1 v_N} \right)^2 \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta f}{f_0} \right)^2 \right], \quad f_0 = \sqrt{f_1 f_2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Выражение (8) показывает необходимость ограничения размеров АР, центральной частоты и полосы частот ее рабочего диапазона ради сохранения пространственной корреляции сигнала по ее апертуре. Кроме того, при снижении частот сигнала уменьшаются потери его корреляции при рассеянии на случайных неоднородностях гидроакустического волновода и при ошибках позиционирования узлов АР.

В нашем случае  $f_1 = 2500$  Гц,  $f_2 = 3000$  Гц,  $v_i = 1437.4$  м/с,  $v_N = 1537.8$  м/с,  $\Delta v = 100.4$  м/с, и согласно (8)  $R_{ij} \geq 0.5$  при  $\Delta r \leq 2.5$  м. Этому условию удовлетворяют узлы АР 2–5, для которых апертура  $d_{25} = 3.56$  м и угол  $\theta_s = 2^\circ$ . Следовательно, эффективно работает только половина АР. Действительно, согласно формуле (7) для сплошной антенны при  $d_{25} = 3.56$  м и  $\theta_s = 2^\circ$  получается значение  $\Delta\theta_T = 7.5^\circ$ , близкое к эмпирическому.

При полной коррелированности сигналов во всех узлах АР ее усиление  $K_T = 20 \lg J$ . При  $J = 8$   $K_T = 18.1$  дБ. В нашем случае эмпирическое значение усиления  $K_e = 10 \lg D_{as}(\theta_s)/D_s = 15.5$  дБ. Потеря усиления  $\Delta K = K_T - K_e = 2.6$  дБ объясняется декорреляцией сигнала. Можно показать, что при равенстве мощностей сигналов во всех узлах АР

$$K = 10 \lg \{ J[(J-1)\bar{R} + 1] \}, \quad (9)$$

где среднее по всем парам каналов значение взаимной нормированной корреляции сигналов

$$\bar{R} = \frac{1}{J(J-1)} \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J R_{ij}, \quad i \neq j.$$

В нашем случае эмпирическое значение  $\bar{R} = 0.5$ ,  $J = 8$ , и согласно (9)  $K = 15.5$  дБ.

Некоторая потеря усиления возможна за счет ошибок позиционирования узлов АР. Ее можно оценить согласно [4] по формуле:  $\Delta K = -10 \lg [1 - (2\sigma r/\lambda)^2]$ . В нашем случае  $\sigma r = 0.02$  м,  $\lambda = 0.52$  м, и  $\Delta K = 0.15$  дБ.

Помехоустойчивость  $\Pi$  аддитивной АР при одинаковом ОСП во всех ее узлах согласно [1], [15] вычисляется по формуле:

$$\Pi = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J R_{ij}}{\sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J R_{pij}}, \quad (10)$$

где  $R_{pij}$  – нормированная функция, взаимной корреляции помех в парах узлов  $i, j$ . При  $R_{pij} = 0$  при  $i \neq j$ ,  $R_{pij} = 1$  при  $i = j$  получим

$$\Pi = 10 \lg [(J-1)\bar{R} + 1]. \quad (11)$$

В нашем случае  $\bar{R} = 0.5$ ,  $R_{pij} \approx 0$ , и согласно (11)  $\Pi = 6.5$  дБ. Эмпирическое значение  $\Pi_e = 10 \lg E_a/E = 6.8$  дБ. При полной коррелированности сигналов  $R_{ij} \equiv 1$  и  $J = 8$   $\Pi_T = 10 \lg J = 9$  дБ. Потеря помехоустойчивости за счет декорреляции сигнала  $\Delta \Pi = \Pi_T - \Pi_e = 2.2$  дБ.

Таким образом, наблюдавшееся ухудшение полезных качеств случайной разреженной аддитивной компенсированной АР – расширение главного лепестка отклика, подъем уровня боковых лепестков, снижение усиления и помехоустойчивости объясняется не недостатками самой АР, а декорреляцией сигнала при многомодовом его распространении в гидроакустическом канале. Такие же потери в данных условиях показала бы и эквидистантная полуволновая АР такой же протяженности. Измеренные потери не превышали 3 дБ, АР сохраняла способность однозначного пеленгования источника шума, поэтому ее работу можно считать эффективной.

С использованием результатов описанных измерений была разработана специализированная аппаратура цифровой обработки сигналов (АЦОС) для случайных стационарных и дрейфующих АР. В компактном корпусе размещены 16-канальный аналого-цифровой преобразователь, специализированный процессор и дисплей, на экран которого выводится информация в цифровой и графической форме. Частотный диапазон входных сигналов 2–100 Гц. Частоты квантования сигналов – от 250 до 2000 Гц. Время накопления сигналов – от 8.2 с до 65.6 с. Максимальная протяженность компенсированной АР вдоль направления на источник сигнала – до 3 км. Координаты узлов АР вводятся в процессор с помощью клавишного терминала. Предусмотрена работа в режиме автоматического позиционирования узлов АР с использованием импульсных или непрерывных шумовых сигналов, излучаемых из двух или более

разнесенных по углу точек пространства. Формируются 32 лепестка характеристики направленности, а также до семи зон фокусировки по дистанции, если источник сигнала находится в зоне Френеля АР. 4 полученных отклика сохраняются в запоминающем устройстве. По выбору оператора любой из них выводится на дисплей. С каждого сформированного лепестка характеристики направленности сигнал в цифровой или аналоговой форме может выводиться на дополнительную внешнюю аппаратуру.

Опытная эксплуатация АЦОС проводилась в комплексе с экспериментальной гидроакустической стационарной приемной линейной эквидистантной АР, уложенной на дно склона морского шельфа на глубине 460 м. В узлах АР находились ненаправленные гидрофоны с шагом 10 м. Частотный диапазон сигналов, принимаемых АР, составлял 5–100 Гц.

Для работы с АЦОС были выбраны 16 гидрофонов со случайными интервалами 10–60 м, образовавшие линейную случайную АР с апертурой 600 м. С помощью АЦОС формировались 32 лепестка в секторе 180°. Вследствие осевой симметрии характеристики направленности симметричные лепестки формировались и по другую сторону линии АР. При этом осуществлялся круговой обзор пространства с двузначным пеленгованием – каждому источнику шума соответствовали два пеленга, симметричных относительно линии АР. Сигналы, принятые в каждом лепестке характеристики направленности, подавались на цифровой анализатор спектра с разрешением 1 Гц. Одновременно с акустическим наблюдением акватория контролировалась радиолокационной станцией. Акустическое наблюдение акватории осуществлялось в течение нескольких дней. В зоне обзора АР обнаруживалось от 1 до 6 источников шума. Спектральный анализ показывал наличие в частотных спектрах всех обнаруженных источников шума гармонических звукорядов, характерных для звуков вращающихся гребных судовых винтов. По данным радиолокационного наблюдения большинство источников шума являлись судами, проходившими на расстояниях 10–50 км от АР. В некоторых случаях с помощью АР – АЦОС пеленговались источники звуков винтов, не наблюдавшиеся радиолокационной станцией. Акустические пеленги совмещались с радиолокационными с точностью 1°–2° вблизи директрисы АР и 10°–20° вблизи линии АР в соответствии с расчетной угловой шириной лепестков характеристики направленности. Угловая точность радиолокации составляла около 1°.

Экспериментальные измерения и испытания, проведенные в пресноводном водохранилище и в прибрежной зоне моря, показали возможность использования стационарных донных протяжен-

ных компенсированных аддитивных антенных решеток со случайным пространственным размещением гидрофонов для пеленгования источников шумовых сигналов, распространяющихся в гидроакустическом канале в виде суммы нормальных волн, а также работоспособность и надежность разработанной аппаратуры обработки сигналов для случайных антенных решеток значительной протяженности, до 600 метров на частотах в десятки Гц.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 446 с.
2. Mohl B., Wahlberg W., Heerfort A. A large-aperture array of nonlinked receivers for acoustic positioning of biological sound sources // J. Acoust. Soc. Amer. 2001. V. 109. № 1. P. 434–437.
3. Лаппо С.П., Левин Б.В., Сасорова Е.В., Морозов В.Е., Диденкулов И.Н., Карлик Я.С. Гидроакустическая локация области зарождения океанического землетрясения // Докл. РАН. 2003. Т. 388. № 6. С. 805–808.
4. Бардышев В.И. Дрейфующая гидроакустическая антенная решетка // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 3. С. 342–347.
5. Lo Y.T. A mathematical theory of antenna arrays with randomly spaced elements // IEEE Transactions on Antenna and Propagation. 1964. V. AP-12. № 3. P. 257–268.
6. Газелян Л.Л., Инютин Г.А., Содин Л.Г. Опыт разработки двумерных антенных решеток со случайным размещением излучателей. Антенны: Связь, 1972. С. 17–25.
7. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. М.: Сов. радио, 1970. 383 с.
8. Евтютов А.П. и др. Справочник по гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. 307 с.
9. Зверев В.А., Коротин П.И., Матвеев А.А., Митюгов В.В., Орлов Д.А., Салин Б.М., Турчин В.И. Экспериментальные исследования дифракции звука на движущихся неоднородностях в мелководных условиях // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 2. С. 227–237.
10. Кряжев Ф.И., Петров Н. А. Исследования распространения звука низких частот в пресноводном водоеме. М.: Отчет АКИН. 1959. 59 с.
11. Кряжев Ф. И. Звуковое поле первой нормальной волны в водном слое // Акуст. журн. 1960. Т. 6. № 1. С. 65–76.
12. Захаров Л.Н., Нестеров С.Н., Федосеева Э.Г. Медленные флюктуации звукового поля под воздействием сейшевых колебаний мелкого пресного водоема // Акуст. журн. 1964. Т. 10. № 3. С. 293–300.
13. Бардышев В.И., Зотова Л.Н., Зубиева Т.Г., Чекойда В.Н. Сравнение расчетов поля колебательных скоростей, создаваемых точечным гармоническим источником звука в мелком волноводе, с эмпирическими данными. М.: Отчет АКИН. 1987. 57 с.
14. Jones J.L., Leslie C.B., Barton L.E. Acoustic characteristics of a lake bottom // J. Acoust. Soc. Amer. 1958. V. 30. № 2. P. 142–145.
15. Смаришев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. Справочник по расчету направленных свойств гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1984. 304 с.

## Testing Underwater Bottom-Moored Antenna Arrays in Sea and Man-Made Lake

V. I. Bardyshev

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia  
e-mail: bvp@akin.ru

**Abstract**—Measurements of the response, gain, and noise immunity are carried out for an underwater compensated additive receiving array with randomly spaced hydrophones that is moored at the bottom of a man-made lake with multimode sound propagation. The in-sea locating ability of a similar array is demonstrated with the sources of noise-like signals at the frequencies of 5–100 Hz. A dedicated numerical processor is developed and tested for processing the signals received by a random underwater array.