АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2001, том 47, № 5, с. 698–705

УДК 551.463

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЕМНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В УСЛОВИЯХ МЕЛКОГО МОРЯ

© 2001 г. Д. А. Орлов, В. И. Турчин

Институт прикладной физики РАН
603600 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46
E-mail: turchin@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 20.09.2000 г.

Представлен метод диагностики приемных гидроакустических антенных решеток в условиях мелкого моря, включающий определение коэффициентов преобразования гидрофонов, профиля решетки и ее положения относительно поверхности и дна; при этом используется источник тонального сигнала с возможностью перестройки частоты, а также специальный приемный элемент с известным коэффициентом преобразования. Разработанная методика иллюстрируется на примере реальных гидроакустических данных; приводятся оценки погрешностей определения каждого из оцениваемых параметров.

После установки стационарных приемных гидроакустических антенных решеток в рабочее положение обычно производится измерение их характеристик – коэффициентов преобразования каждого гидрофона и его координат относительно поверхности и дна (включая оценку профиля решетки в целом). Хотя коэффициенты преобразования, связывающие звуковое давление на входе гидрофона (в Па) с электрическим напряжением на выходе (в В), предварительно измеряются в лабораторных условиях, их величина может меняться после установки – как вследствие несовпадения температурных и прочих условий с лабораторными, так и вследствие влияния различных конструктивных элементов решетки (несущих конструкций, механических связей и т.п.) на коэффициенты преобразования, что достаточно трудно учесть при лабораторных измерениях. Очевидно также, что в случае гибкой или полужесткой конструкции решетки ее профиль после развертывания может отличаться от требуемого. В то же время современные методы обработки сигналов (см., например, [1]) требуют достаточно точного знания как коэффициентов преобразования, так и положения приемных элементов в некоторой системе координат. Например, как показано в [2], при ошибке задания координат приемных элементов, превышающей $\lambda/10$ (где λ – длина волны), коэффициент усиления антенны понижается в среднем на 1 дБ.

В настоящее время известны и применяются на практике различные способы определения как абсолютных коэффициентов преобразования приемных элементов ([3, 4]), так и профиля антенных решеток ([5–8]). При этом для определения положения приемных элементов используется набор источников акустического сигнала (как правило, взрывного типа), расположенных на достаточно большом удалении от решетки. Это обстоятельство существенно ограничивает точность, достигаемую с помощью этих методов, поскольку среда оказывает сильное влияние на распространение звука; при этом форма принимаемого сигнала плохо предсказуема [9].

В данной работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования метода диагностики линейных гидроакустических антенных решеток в условиях мелкого моря. Рассматриваемая методика использует источник акустического сигнала, перестраиваемого по частоте в рабочем диапазоне решетки, установленный на небольшом (меньше глубины места) расстоянии от антенны, а также дополнительный гидрофон с известным коэффициентом преобразования. Преимуществом данной методики является то обстоятельство, что излучатель располагается на малом расстоянии до антенны. Реверберация сигнала в этом случае имеет более регулярный и прогнозируемый характер, что дает возможность эффективного ее подавления.

Одним из простейших методов определения коэффициентов преобразования приемников звука является так называемый метод сравнения, состоящий в сопоставлении акустического сигнала, принимаемого каждым из элементов решетки, с сигналом, принимаемым специальным ("эталонным") гидрофоном с точно известным коэффициентом преобразования. Комплексный коэффициент преобразования n-го элемента решетки K_n ($|K_n|$ имеет размерность Па/В) при этом находится как

$$K_n = \frac{U_n G_{\text{эт}}}{U_{\text{эт}} G_n} K_{\text{эт}}, \qquad (1)$$

где $K_{эт}$ – известный коэффициент преобразования "эталонного" гидрофона, U_n, $U_{эт}$ – напряжения на выходах n-го элемента и "эталонного" гидрофона, G_n, $G_{эт}$ [м$^{-1}$] – коэффициенты передачи акустического поля от источника к n-му элементу и "эталонному" гидрофону соответственно; в свободном пространстве $G_n/G_{эт} = (r_{эт}/r_n)\exp ik(r_n - r_{эт})$, где r_n, $r_{эт}$ – расстояния от источника до n-го элемента и "эталонного" гидрофона соответственно, $k = 2\pi f/c$, f – частота излучаемого тонального сигнала, c – скорость звука. Для описания коэффициентов передачи G в условиях мелкого моря можно воспользоваться многолучевой моделью распространения; в частности, для приемных элементов решетки

$$G_n = \sum_{l=1}^{L} V_n^{(l)} \frac{\exp(ikr_n^{(l)})}{r_n^{(l)}}, \qquad (2)$$

где $r_n^{(l)}$ – расстояние от l-го мнимого источника до n-го гидрофона, $V_n^{(l)}$ – произведение коэффициентов отражения для l-го луча, L – число учитываемых лучей ($l = 1$ соответствует прямому лучу, $l = 2, 3$ – первым отражениям от поверхности и дна соответственно и т.д.). При этом мы считаем, что источник, приемные элементы и "эталонный" гидрофон являются всенаправленными. Кроме того, мы пренебрегли в (2) искривлением лучей из-за вертикальной стратификации скорости звука, учитывая малость расстояний между источником и приемными элементами[1]. Можно предположить, что в этом случае выражение (2) будет достаточно точно описывать реальные зависимости коэффициентов передач от расстояния, частоты и пр., в отличие от случая дальнего распространения звука в мелком море, когда интерференционная структура поля плохо предсказуема (см., например, [9]).

Хотя метод сравнения, использующий (1) и (2), позволяет, в принципе, получить зависимость коэффициентов преобразования не только от номера гидрофона, но и от частоты, прямое его использование в условиях мелкого моря обладает существенным недостатком – чувствительностью к возможным несоответствиям между параметрами, используемыми в модели (2), и их истинными значениями (это касается, в частности, всевозможных геометрических параметров – глубин, расстояний и т.п.), а также к несоответствию самой модели (2) реальным условиям. По этой причине целесообразно вначале предположить, что коэффициенты преобразования приемных элементов решетки слабо зависят от частоты (что обычно реализуется на практике), и построить процедуру, позволяющую определить средние в некоторой полосе частот коэффициенты преобразования, а также профиль антенной решетки и положение излучателя относительно антенны. После этого можно с помощью соотношений (1) и (2) уточнять частотную зависимость коэффициентов преобразования.

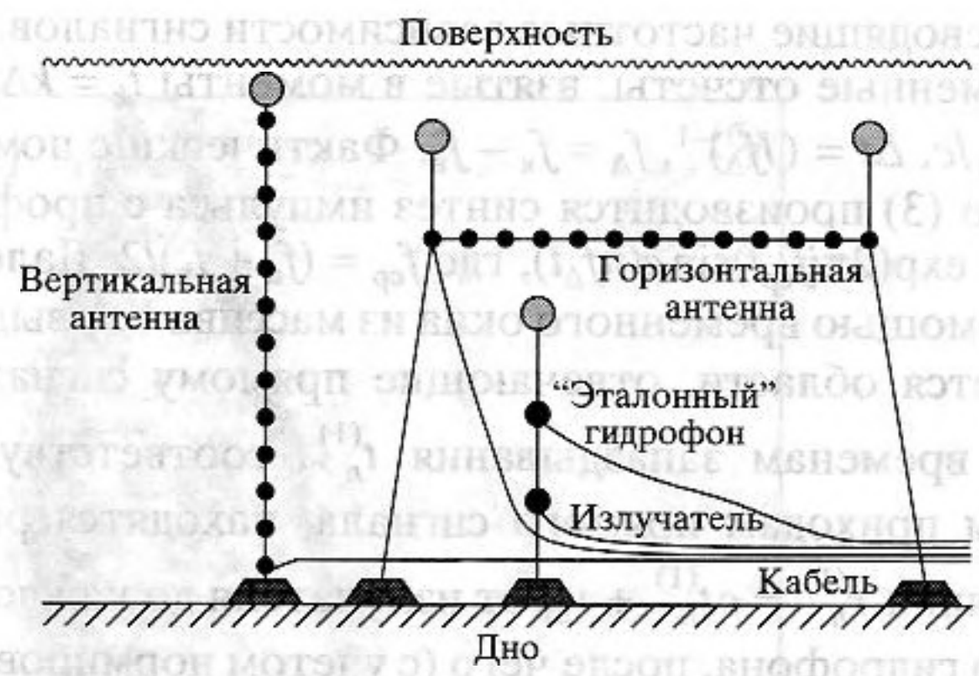

Рис. 1. Схема эксперимента.

Соответствующая методика измерений может быть построена следующим образом. На расстоянии ~0.2…0.5 глубины места H от антенной решетки устанавливается акустический источник с частотой, последовательно перестраиваемой с дискретом Δf в диапазоне $f_н \ldots f_к$. Каждая m-я частота f_m излучается в течение некоторого интервала времени, достаточного для узкополосной фильтрации. На известном небольшом расстоянии $r_{эт}$ от источника (с разнесением по глубине) устанавливается "эталонный" гидрофон (см. рис. 1).

С учетом введенного выше предположения о том, что коэффициенты преобразования приемных элементов решетки слабо зависят от частоты, построим зависимость выходов узкополосных фильтров $U_{n,m}$ от номера приемного элемента n и номера частоты m, нормированную на сигнал от "эталонного" гидрофона $U_{эт,m}$ для выравнивания частотной характеристики излучателя[2]: $U_{n,m}^{(norm)} = U_{n,m}/U_{эт,m}$. Далее, для каждого n-го элемента найдем преобразование Фурье $Y_{n,k}$:

$$Y_{n,k} = \frac{1}{J}\sum_{m=0}^{J-1} U_{n,m}^{(norm)} e^{-2\pi i \frac{km}{J}}, \qquad (3)$$

[1] Тем не менее частично вертикальная стратификация скорости звука может быть учтена путем использования для различных слагаемых в (2) средних для каждого из лучей значений скорости звука, что можно сделать, если известен вертикальный профиль скорости звука $c(z)$.

[2] Хотя из-за близости "эталонного" гидрофона к источнику переотражения от поверхности воды и дна будут вносить меньший вклад в $U_{эт,m}$ по сравнению с $U_{n,m}$, для повышения точности измерений реверберационная составляющая должна быть предварительно устранена, например, с помощью сглаживания частотных зависимостей амплитуды и фазы $U_{эт,m}$.

переводящие частотные зависимости сигналов во временные отсчеты, взятые в моменты $t_k = k\Delta t - r_{эт}/c$, $\Delta t = (Jf_\Delta)^{-1}$, $f_\Delta = f_к - f_н$. Фактически с помощью (3) производится синтез импульса с профилем $\exp(2\pi i f_{ср} t)\mathrm{sinc}(\pi f_\Delta t)$, где $f_{ср} = (f_н + f_к)/2$. Далее, с помощью временного окна из массива $Y_{n,k}$ выделяются области, отвечающие прямому сигналу. По временам запаздывания $t_n^{(1)}$, соответствующим приходам прямого сигнала, находятся расстояния $r_n^{(1)} = ct_n^{(1)} + r_{эт}$ от излучателя до каждого n-го гидрофона, после чего (с учетом нормировки на сигнал от "эталонного" гидрофона), например, модули коэффициентов преобразования $|K_n|$ находятся с помощью (1), где в качестве отношения $|U_н/U_{эт}|$ для каждого n берутся максимумы $\left|Y_n^{(\max)}\right| = \max\limits_k \left|Y_{n,k}^{(1)}\right|$ и $|G_n/G_{эт}| = r_{эт}/r_n^{(1)}$. Результат, очевидно, представляет собой средние в диапазоне частот $f_н \ldots f_к$ коэффициенты преобразования.

Для построения трехмерного профиля решетки, кроме $r_n^{(1)}$, должен использоваться, как минимум, еще один набор расстояний, например, $r_n^{(2)}$ (для лучей, однократно отраженных от поверхности). Введем декартову систему координат (x, y, z), где ось z ориентирована вниз и проходит через источник, ось y ориентирована от источника к ближайшему элементу решетки, начало координат расположено на поверхности. Таким образом, координаты источника есть $(0, 0, z_s)$, где z_s – глубина источника, которую будем считать известной. Профиль решетки будем характеризовать набором координат гидрофонов (x_n, y_n, z_n), $n = 1, \ldots, N$; например, для идеальной горизонтальной решетки с межэлементным расстоянием, равным d, $x_n = (n - n_0 + \nu)d$, $y_n = y_0$, $z_n = z_0$, где z_0 – глубина решетки, y_0 – расстояние от источника до линии гидрофонов в горизонтальной плоскости, n_0 – номер ближайшего к источнику элемента, ν – параметр, учитывающий, что перпендикуляр из источника к линии гидрофонов может пересекать эту линию между гидрофонами ($|\nu| \le 0.5$). Используя элементарные соотношения

$$r_n^{(1)} = \sqrt{\rho_n^2 + (z_n - z_s)^2}, \quad r_n^{(2)} = \sqrt{\rho_n^2 + (z_n + z_s)^2}, \quad \rho_n^2 = x_n^2 + y_n^2, \tag{4}$$

вначале находим $z_n = ((r_n^{(2)})^2 - (r_n^{(1)})^2)/4z_s$ и ρ_n. Для определения x_n, y_n можно воспользоваться рекуррентной процедурой определения координат узлов ломаной линии с фиксированным расстоянием между узлами d, получаемой из элементарных геометрических построений:

$$x_{n+1} = \frac{1}{\rho_n^2}(x_n a_{n+1}^2 + y_n b_{n+1}^2), \quad y_{n+1} = \sqrt{\rho_{n+1}^2 - x_{n+1}^2}, \tag{5}$$

где

$$a_{n+1}^2 = \frac{1}{2}(\rho_{n+1}^2 + \rho_n^2 + (z_{n+1} - z_n)^2 - d^2),$$

$$b_{n+1}^2 = \sqrt{(\rho_{n+1}\rho_n)^2 - a_{n+1}^4}.$$

Процедура начинается с номера $n = n_0$, в качестве начального условия берутся $x_{n_0} = -\nu d$, $y_{n_0} = \sqrt{\rho_{n_0}^2 - (\nu d)^2}$; параметр ν находится путем минимизации отклонения найденных $y_n(\nu)$ от константы. Заметим, что процедура весьма критична даже к небольшим случайным ошибкам (выбросам) в каждом из расстояний $r_n^{(1,2)}$, поэтому ее практическое использование требует предварительного сглаживания экспериментальных зависимостей $r_n^{(1)}$, $r_n^{(2)}$ как функций номера n.

В ряде случаев можно предполагать, что для горизонтальных решеток с нейтральной плавучестью основные отклонения профиля от прямолинейного имеют место в вертикальной плоскости, и аппроксимировать профиль в вертикальной плоскости уравнением цепной линии:

$$z_n = A\,\mathrm{ch}\frac{x_n - B}{A} + C, \tag{6}$$

где A, B и C – параметры, подлежащие оцениванию. Вместе с неизвестными параметрами, характеризующими положение источника относительно решетки в горизонтальной плоскости, они могут находиться по минимуму среднеквадратичного отклонения (МСКО) найденных экспериментально расстояний $r_n^{(l)}$, $l = 1, 2, \ldots$ и расстояний, соответствующих (6).

Как уже отмечалось, с использованием найденных оценок положения источника и элементов антенной решетки можно уточнять частотные зависимости коэффициентов передачи K_n, используя (1) и (2), куда подставляются оценки x_n, y_n, z_n, найденные в интервале частот $f_н \ldots f_к$. Заметим, что, в отличие от приведенных выше способов определения средних коэффициентов передачи и профиля решетки, процедура определения частотных зависимостей коэффициентов передачи является более чувствительной к выбранной модели среды.

Описанная методика была использована для диагностики 64-элементных линейных гидроакустических решеток с межэлементным расстоянием $d = 0.19$ м (длина ~12 м), развернутых в верти-

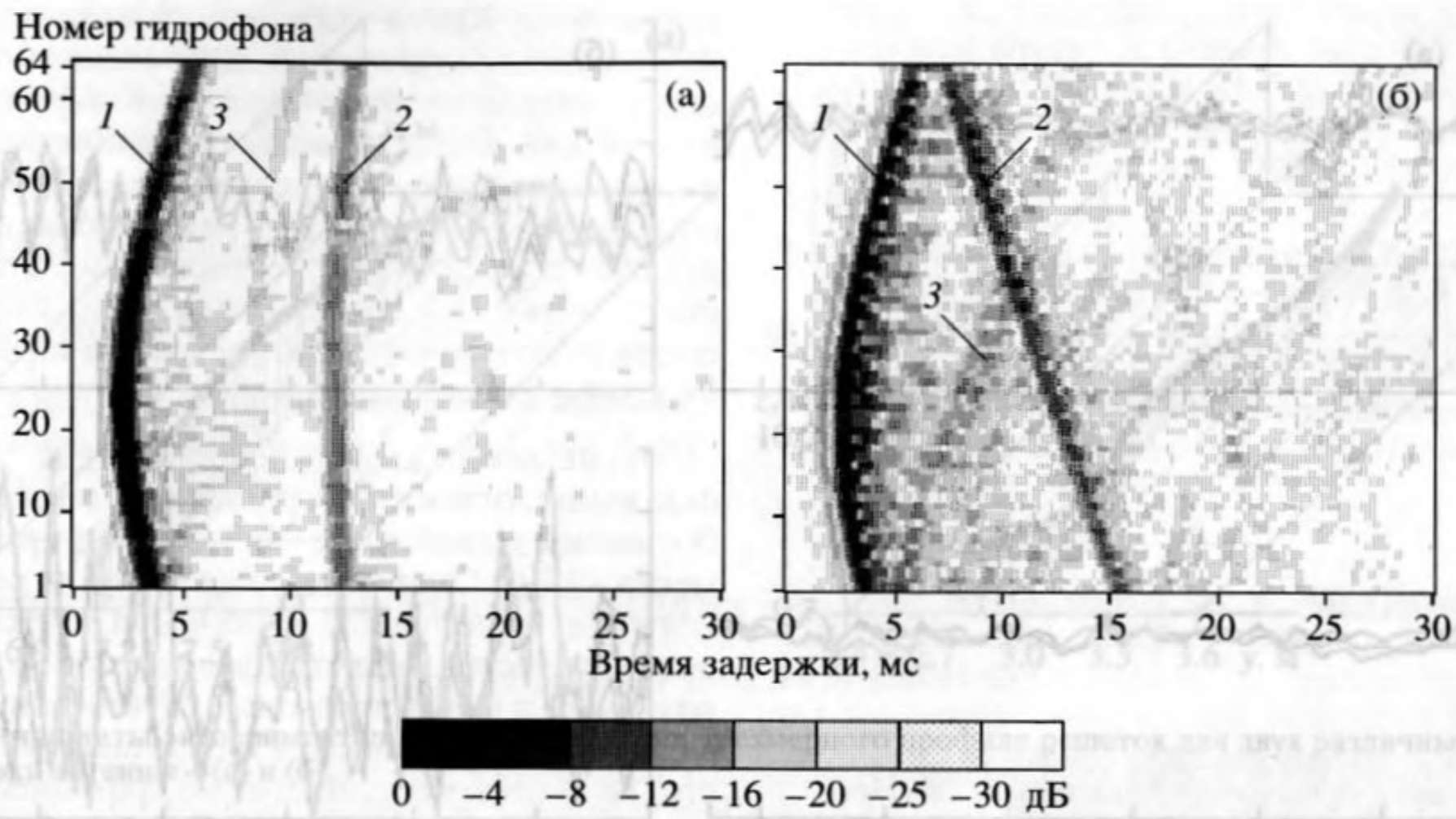

Рис. 2. Амплитуда принятого сигнала в плоскости "время задержки – номер гидрофона": (а) – горизонтальная антенна; (б) – вертикальная антенна. Цифрами *1*, *2* и *3* обозначены соответственно прямой луч, первое отражение от поверхности и первое отражение от дна.

кальном и горизонтальном положениях в озерных условиях. Решетки представляли собой вмонтированные в кабель пьезокерамические гидрофоны с предусилителями; кабель с помощью пенопластовых вставок крепился к дюралюминиевой трубе диаметром 0.05 м для придания системе некоторой жесткости (в целом решетка имела плавучесть, близкую к нейтральной). Эксперименты проводились на оз. Санхар (Владимирская обл.) в 1997–99 гг. Постановки решеток выполнялись при глубинах места ~15 м; дно в окрестности мест постановки было достаточно ровным, грунт представлял собой песок со слоем ила. В разных экспериментах варьировались, в основном, способы постановок и способы крепления решеток в трубе (размеры и число вставок).

В соответствии с вышеприведенной схемой диагностики широкополосный источник звука располагался на расстоянии в несколько метров от решетки; над ним на расстоянии 1 м укреплялся гидрофон 8101 B&K с известным коэффициентом преобразования. Глубина источника выбиралась так, чтобы обеспечить максимальную разность хода между прямым лучом и первыми поверхностными и донными отражениями. В качестве источника использовался либо кольцевой пьезокерамический излучатель с шириной полосы ~0.5 кГц, либо второй гидрофон 8101 B&K в обращенном режиме[3]. Диапазон перестройки частоты составлял ~1…3 кГц.

[3] Пьезокерамический излучатель в полной мере не отвечал условию монопольности: уровень его излучения был выше в вертикальном направлении, чем в горизонтальном. Этот эффект был учтен при соответствующих расчетах.

На рис. 2 представлены примеры зависимостей $Y_{n,k}$, вычисленных с помощью процедуры (*3*) для различных постановок горизонтальной и вертикальной антенных решеток. На обеих зависимостях отчетливо просматриваются времена прихода прямых лучей (*1*) и лучей, соответствующих первому отражению от поверхности (*2*). Первое донное отражение (*3*) выражено менее четко, поскольку коэффициент отражения от дна в условиях данного эксперимента был довольно мал. Заметим, что для горизонтальной решетки линии, соответствующие разным лучам, примерно параллельны, в то время как для вертикальной решетки линии, соответствующие поверхностным и донным лучам, обязательно пересекаются.

Амплитуда и фаза средних по частоте коэффициентов преобразования для двух различных антенных решеток представлены на рис. 3. На каждом из графиков представлены результаты трех независимых измерений, проведенных при различных положениях источника вместе с "эталонным" гидрофоном относительно одной и той же антенной решетки; разброс получаемых значений дает представление о погрешности, связанной прежде всего с неточным учетом коэффициентов передачи акустического поля (см. ниже). Результаты диагностики одного из "неудачных" вариантов компоновки приемной решетки показаны на рис. 3, б: как видно из этого рисунка, амплитуда и фаза коэффициентов преобразования элементов испытывают достаточно сильные периодические (с периодом 3 гидрофона) вариации, которые связаны с особенностями закрепления антенны: в данном случае для соединения антенны с металлической

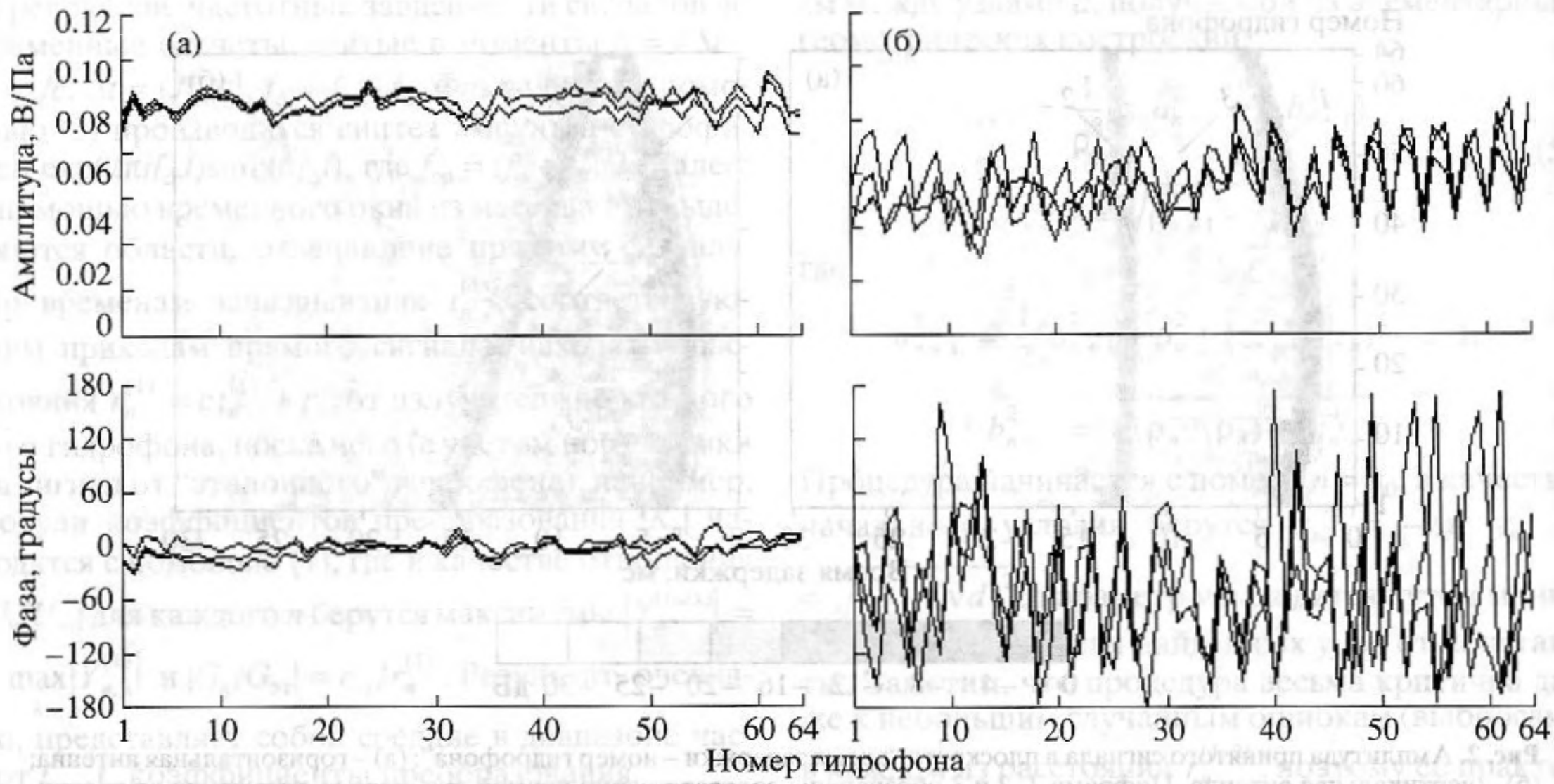

Рис. 3. Амплитуда и фаза коэффициентов преобразования антенных решеток, полученные для двух независимых постановок: а – горизонтальной антенны, б – вертикальной антенны. На каждом из графиков приведены результаты, полученные по трем различным постановкам источника при одной и той же постановке антенной решетки.

трубой были использованы вставки увеличенного размера, располагавшиеся через каждые 3 гидрофона (см. также рис. 2, б). В дальнейшем этот эффект был устранен.

Погрешность определения коэффициентов преобразования вышеописанным способом зависит от многих составляющих. Например, погрешность задания коэффициента преобразования "эталонного" гидрофона или погрешность определения расстояния между источником и "эталонным" гидрофоном могут быть элементарно пересчитаны в результирующую погрешность. Наиболее специфическая для данного способа составляющая погрешности связана с конечным подавлением всех прочих лучей при выделении прямого сигнала, в частности, из-за ограниченной полосы перестройки частоты (к величинам $Y_n^{(\max)}$ добавляются слагаемые, определяемые уровнем боковых лепестков синтезированных импульсов для поверхностного, донного и прочих отражений). Эта составляющая исследовалась путем численного моделирования. В качестве примера приведем результаты расчетов для горизонтальной решетки с длиной $D = H$, где H – глубина места. На рис. 4 представлена усредненная по элементам зависимость среднеквадратичного отклонения (СКО) найденных коэффициентов преобразования от безразмерной полосы перестройки частоты $\xi = f_\Delta D/c$ (числа элементов пространственного разрешения на длине антенны) для разных глубин постановки источника z_s (горизонтальное расстояние между источником, располагавшимся напротив центрального элемента, и решеткой, а также глубина постановки антенны брались равными $0.5H$). Как видно из рис. 4, точность определения коэффициентов преобразования в среднем повышается с увеличением ширины полосы, а оптимальная глубина источника для заданной конфигурации составляет $H/2$: при этом и поверхностный, и донный луч наиболее удалены от прямого.

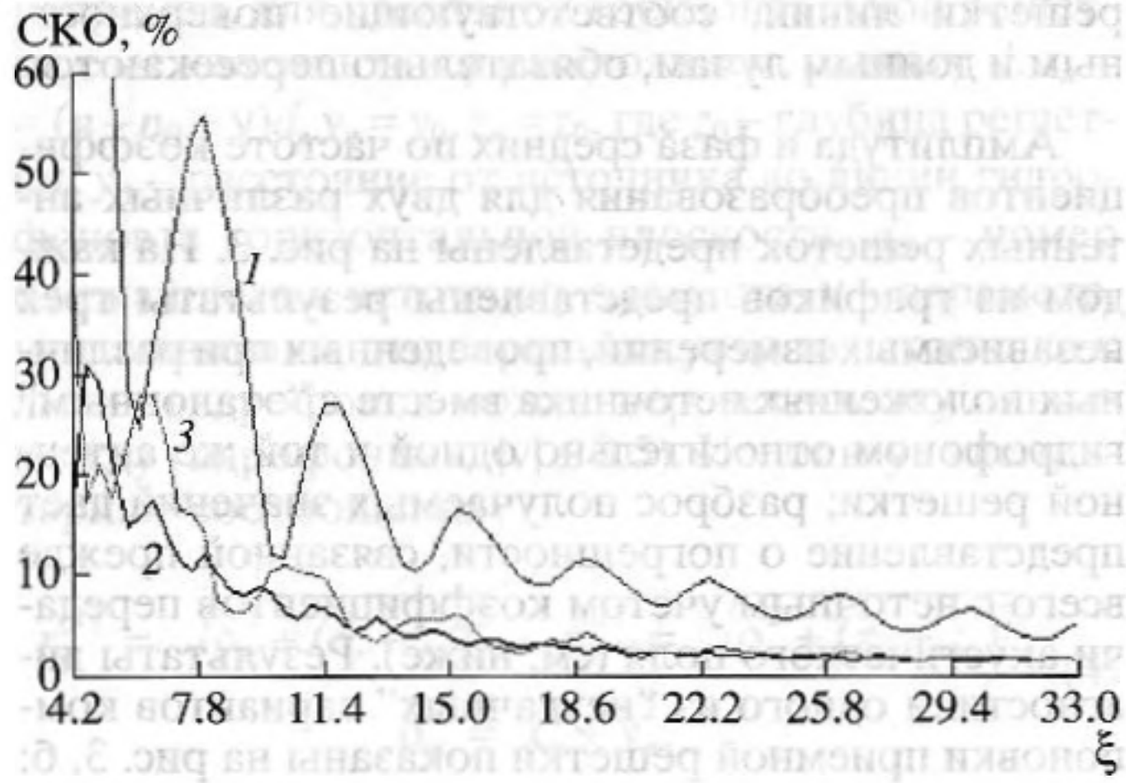

Рис. 4. Относительное среднеквадратичное отклонение вычисленных коэффициентов преобразования от истинного значения в зависимости от безразмерного параметра ξ для трех глубин излучателя: *1* – $0.2H$, *2* – $0.5H$, 3 – $0.8H$. Результат обработки модельных данных.

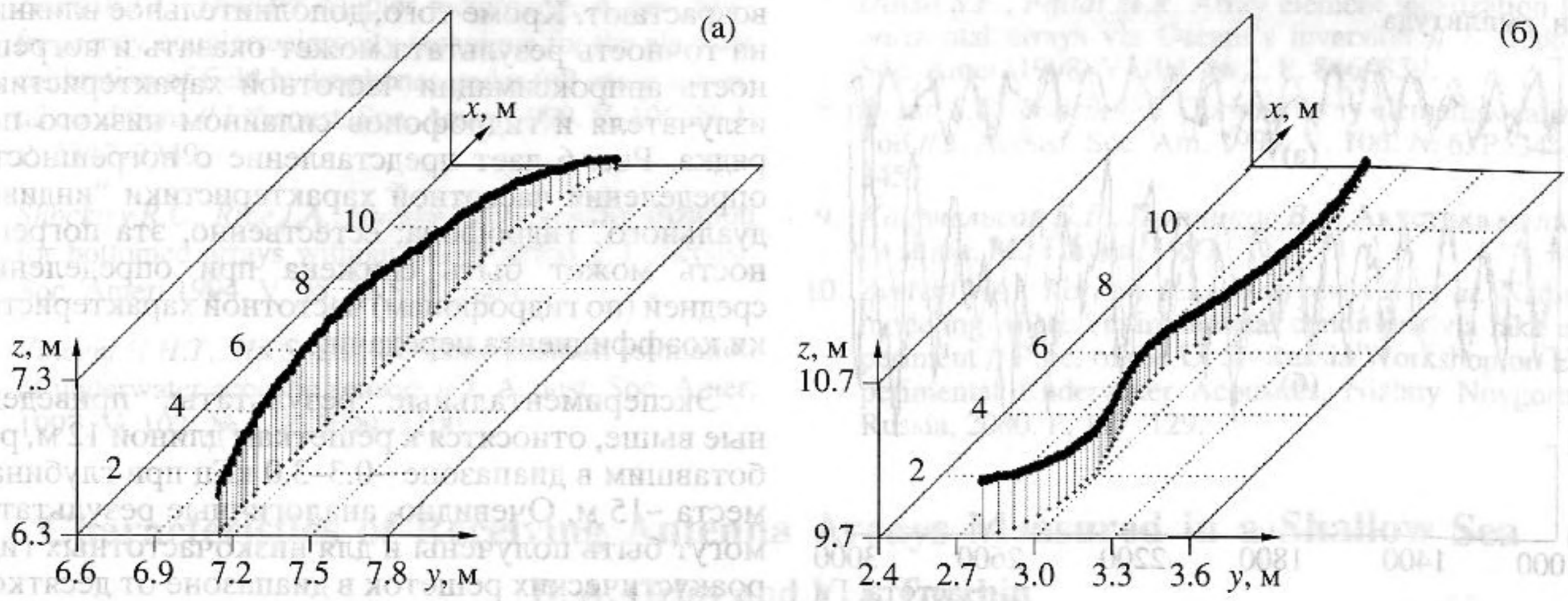

Рис. 5. Результаты экспериментальной реконструкции трехмерного профиля решеток для двух различных способов постановки антенны – (а) и (б).

При перемещении излучателя ближе к поверхности или дну соответственно поверхностный или донный луч приближается к прямому и его боковые лепестки вносят бóльшую погрешность в результаты калибровки. Как следует из рис. 4, для разумных значений диапазона перестройки частоты (ξ = 10…20) погрешность не превышает 5–10%.

Вообще говоря, уменьшить влияние на результат боковых лепестков можно, используя при преобразовании Фурье (3) какое-либо окно, например, косинусное. Однако как было показано, использование таких окон при обработке реальных данных практически не уменьшает уровень фона, имеющегося в зависимости $Y_{n,k}$, поскольку он определяется не только уровнем боковых лепестков, но и ограниченной применимостью модели (2) в реальных условиях. С другой стороны, введение окна понижает временное разрешение, поэтому использование таких окон для определения коэффициентов преобразования, как правило, оказывается нецелесообразным.

Оценить суммарную величину погрешности, наблюдаемой в эксперименте, можно путем сравнения результатов вычисления коэффициентов преобразования одних и тех же антенных гидрофонов при различных постановках излучателя. Соответствующие оценки, полученные по результатам, аналогичным приведенным на рис. 3, а показывают, что эта погрешность составляет примерно 10–15%, причем ее увеличение по сравнению с расчетными данными связано в основном с фазовой компонентой (погрешность амплитуды находится примерно на том же уровне, что и результат численного моделирования).

На рис. 5 продемонстрированы результаты реконструкции профиля горизонтальных антенных решеток для двух способов постановки: (а) с помощью идущих под углом тросов и плавучестей, создающих растягивающее усилие (как показано на рис. 1), и (б) крепления трубы к П-образной вертикальной раме. При реконструкции экспериментальные оценки расстояний $r_n^{(1)}$, $r_n^{(2)}$ предварительно сглаживались кривыми 2-го порядка с одним узлом склейки, после чего использовалась процедура (5). Очевидно, что точность реконструкции профиля целиком определяется точностью акустических измерений расстояний, которая пропорциональна пространственному разрешению $\Delta_r = c/f_\Delta$ (в эксперименте Δ_r = 0.75 м). Поскольку (5) представляет собой нелинейный алгоритм, зависимость погрешности реконструкции профиля от погрешности задания расстояний находилась путем численного моделирования; погрешности задавались как случайные независимые величины с одинаковым СКО σ_r. Для конфигурации решетки и источника, соответствующей эксперименту, было получено, что при σ_r в диапазоне 0.05…0.3 м погрешность реконструкции профиля (СКО) меняется в пределах 0.02…0.1 м, т.е. оказывается сопоставимой с СКО погрешности задания расстояний (при этом максимальные отклонения профиля от заданного превышали СКО в 2.3…2.6 раза)[4]. В эксперименте СКО погрешности определения расстояний оценивались по отклонению экспериментальных значений от аппроксимирующей плавной кривой; оно составляло 0.03…0.09 м (т.е. 4–12% от пространственного разрешения) для разных постановок. Исходя из этих оценок и результатов численного моделирования можно принять, что погрешность реконструкции профилей, приведенных на рис. 5, СКО

[4] При этом учитывалась также небольшая погрешность реконструкции, определяемая аппроксимацией зависимости расстояний от номера элемента.

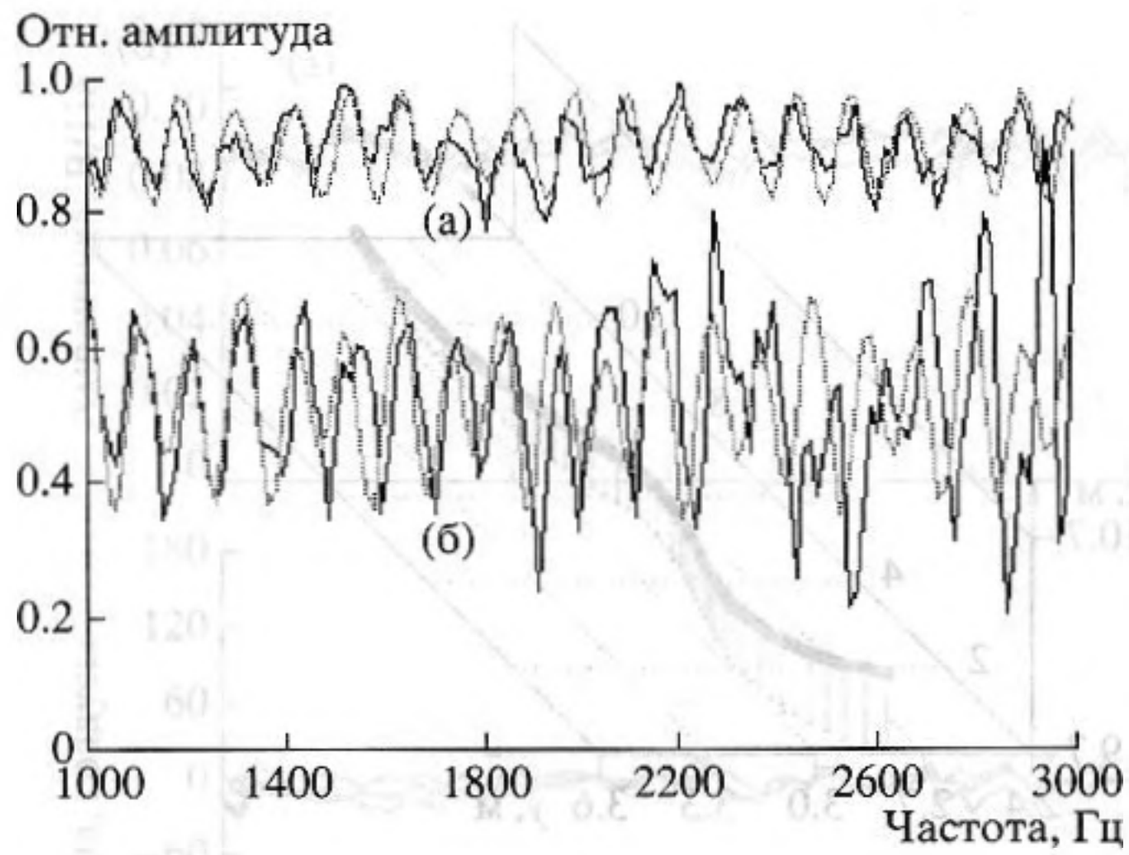

Рис. 6. Сопоставление амплитуд принятого сигнала, нормированного на частотную зависимость, полученную с помощью аппроксимации принятого сигнала сплайном (черная кривая), и моделированного сигнала (серая кривая): (а) – для "эталонного" гидрофона; (б) – для одного из антенных гидрофонов (#30).

составляет 0.03 м. Этот результат подтверждается при сопоставлении результатов реконструкции профиля, полученных при различных постановках излучателя относительно одной и той же антенной решетки.

Чтобы оценить применимость в реальных условиях формулы (2), полученной в рамках модели однородного пространства, ограниченного плоскими поверхностью и дном, проведем следующую операцию. Учитывая достаточно гладкую неравномерность частотной характеристики излучателя, применим сглаживающую аппроксимацию к частотной зависимости сигнала, принятого "эталонным" гидрофоном, а затем нормируем принятый сигнал на полученную плавную зависимость от частоты; результат, как очевидно, может быть сопоставлен с (2). На рис. 6 показан результат такого сравнения для "эталонного" гидрофона (рис. 6, а), а также для одного из антенных гидрофонов (рис. 6, б). Как можно видеть, в случае "эталонного" гидрофона модель (2) достаточно хорошо описывает принятый сигнал: положения интерференционных максимумов и минимумов, а также глубина связанных с интерференцией вариаций амплитуды принятого сигнала хорошо совпадают для модели и принятого сигнала. В случае антенного гидрофона точность модели понижается; основной причиной является, по-видимому, то обстоятельство, что расстояние от антенных гидрофонов до излучателя существенно больше, чем расстояние от "эталонного" гидрофона до излучателя; это ведет к увеличению влияния интерференции на принятый сигнал, а ошибки определения геометрических параметров при этом резко возрастают. Кроме того, дополнительное влияние на точность результата может оказать и погрешность аппроксимации частотной характеристики излучателя и гидрофонов сплайном низкого порядка. Рис. 6 дает представление о погрешности определения частотной характеристики "индивидуального" гидрофона; естественно, эта погрешность может быть снижена при определении средней (по гидрофонам) частотной характеристики коэффициента передачи.

Экспериментальные результаты, приведенные выше, относятся к решеткам длиной 12 м, работавшим в диапазоне ~0.3–3.0 кГц при глубинах места ~15 м. Очевидно, аналогичные результаты могут быть получены и для низкочастотных гидроакустических решеток в диапазоне от десятков до сотен Гц в мелком море с глубинами 100–300 м в силу принципа подобия и хорошей сопоставимости (с соответствующим коэффициентом масштабирования) экспериментальных результатов в озерных и морских условиях [10].

В настоящей работе представлена комплексная методика, позволяющая проводить диагностику приемных гидроакустических линейных антенных решеток после их установки в рабочем положении: определение коэффициентов преобразования приемных элементов, профиля антенной решетки и ее положения относительно поверхности и дна. Дополнительно в рамках описанной методики удается решить практически важный вопрос о том, насколько модель среды, в рамках которой мелкое море представляется как пространство, ограниченное плоскими поверхностью и дном, применима в реальных условиях. Экспериментальная апробация методики показала ее работоспособность и эффективность для диагностики приемных гидроакустических антенн.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИПФ РАН В.В. Пикалеву, П.И. Коротину, Б.М. Салину, В.А. Тютину, И.Ш. Фиксу и др., принимавшим участие в эксперименте и в обсуждении результатов. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 00-02-16438).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Mikhalevsky P.N.* An overview of matched field methods in ocean acoustics // IEEE J. Ocean. Eng. 1993. V. 18. P. 401–424.
2. *Hodgkiss W.S., Ensberg D.E., Murray J.J. et al.* Direct measurement and matched-field inversion approaches to array shape estimation // IEEE J. Ocean. Eng. 1996. V. 21. P. 393–401.
3. *Lazreq Z., Ville J.M.* Acoustic calibration of a pressure–velocity probe // J. Acoust. Soc. Amer. 1996. V. 100. № 1. P. 364–371.

4. *Zalesak J.F.* Transfer coupler reciprocity: A new low-frequency couplerreciprocity technique for the absolute calibration of field hydrophones under full environmental conditions // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105. № 4. P. 2342–2349.

5. *Shockley R.C., Rice J.A., Hursky P.* Element localization for bottomed arrays without transponders // J. Acoust. Soc. Amer. 1994. V. 95. № 5. P. 2809.

6. *Vincent II H.T., Hu S.-L.J.* Geodetic position estimation of underwater acoustic sensors // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 102. № 5. P. 3099–3100.

7. *Dosso S.E., Fallat M.R.* Array element localization for horizontal arrays via Occam's inversion // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 104. № 2. P. 846–859.

8. *Dosso S.E., Sotirin B.J.* Optimal array element localization // J. Acoust. Soc. Am. 1999. V. 106. № 6. P. 3445–3459.

9. *Каценельсон Б.Г., Петников В.Г.* Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997.

10. *Zverev V.A., Korotin P.I., Matveev A.I. et al.* Natural modeling of sea environmental conditions via lake experiment // Proc. of the U. S.–Russia Workshop on Experimental Underwater Acoustics, Nizhny Novgorod, Russia, 2000. P. 117–129.

Characteristics of Receiving Antenna Arrays Measured in a Shallow Sea

D. A. Orlov and V. I. Turchin

A diagnostic technique for receiving hydroacoustic antenna arrays operating in a shallow sea is presented. The technique reconstructs the hydrophone conversion coefficients, the array profile, and its position relative to the surface and the bottom. A stepped-frequency source and a special receiving element with a known conversion coefficient are used. The technique is illustrated by experimental hydroacoustic data. The error in reconstructing each of the parameters is estimated.