

УДК 534.24; 534.6

КАЛИБРОВКА МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

© 1997 г. В. И. Воловов, А. И. Говоров

Акустический институт им. Н.Н. Андреева

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 30.01.96 г.

Рассмотрены методы амплитудной калибровки многоэлементных акустических антенн в натуральных условиях. Определены условия проведения калибровочных работ, оценена их точность. Предложен новый метод калибровки с использованием статистического характера процесса отражения звука от дна. Даны рекомендации по практической реализации калибровочных измерений. Приведены результаты экспериментальных метрологических работ, проведенных в условиях глубокого океана.

Вопросы метрологии гидроакустических преобразователей составляют сложную и специфическую область акустических измерений. Методика градуировки излучателей и приемников хорошо разработана и жестко стандартизирована для лабораторных условий измерений [1, 2]. Однако проведение экспериментальных исследований в океане требует выполнения метрологических работ и в натуральных условиях, в особенности по отношению к крупногабаритным опускаемым, буксируемым и стационарно установленным на судах антенным системам.

В последнее время при исследовании отражения звука от дна океана широко применяются многоэлементные пространственно разнесенные приемные антенны, обеспечивающие отдельный и независимый прием отраженных сигналов на каждый из гидрофонов. Такие антенны предназначены для исследовательских целей, а также для решения прикладных океанологических и навигационных задач [3–5], причем их использование предполагает идентичность характеристик отдельных каналов, состоящих из приемника звука и электрического тракта. Эти характеристики заметно изменяются в процессе эксплуатации, что делает необходимой периодическую калибровку систем в натуральных условиях с последующей коррекцией передаточных характеристик каналов. В ряде случаев речь может идти об относительной калибровке приемных трактов. Традиционно такие измерения осуществляется в соответствии с рис. 1а. С борта судна, находящегося в дрейфе, на глубину h опускается излучатель (1), сигнал с которого одновременно регистрируется на выходе всех каналов приемной антенны (2). Точное расположение излучателя и антенны неизвестно, однако, если h таково, что можно пренебречь разностью хода лучей от излучателя

до каждого из приемников антенны, то чувствительность i -го канала γ_i относительно опорного γ_0 можно оценить как

$$\gamma_{io} = \frac{\gamma_i}{\gamma_0} = \frac{u_i}{u_0}, \quad (1)$$

где u_i и u_0 – напряжения на выходе i -го и опорного каналов соответственно при одновременной регистрации калибровочного сигнала.

Заглубление излучателя определяется, исходя из величины ошибки, обусловленной другими факторами так, чтобы погрешность, обусловленная разностью хода лучей, пришедших из точки излучения на разные приемники антенны, была существенно меньше этой величины. При сферическом расхождении излученной волны применительно к реальным системам типа “Пласт” [3, 6] для погрешности не более 10% глубина h составляет около 200 м.

Специальных требований к взаимному расположению излучателя и приемной антенны, чувствительности и диаграмме направленности калибровочного излучателя не предъявляется. Существенно лишь то, чтобы в пределах сектора, в котором из точки излучения видна антенна (обычно доли градуса), в диаграмме направленности излучателя не наблюдалось существенных неоднородностей, а также чтобы излучатель располагался в пределах рабочих углов отдельных приемников антенны.

Обратимся к результатам измерений, полученным на антенне “Пласт-2” [6] во 2-ом рейсе НИС “Академик Борис Константинов” в открытом океане при средних погодных условиях (волнение 3 балла; скорость ветра 5 м/с). Габариты антенны составляли 3.5×3.5 м; расстояние между ближайшими приемниками 0.48 м. На рис. 2 даны

две числовые матрицы, представляющие собой величины u_i в относительных единицах на различных гидрофонах антенны при соблюдении геометрии их взаимного расположения. Данные были получены при измерениях с помощью дополнительного излучателя 1 по схеме рис. 1а на частоте 12 кГц при длительности посылок 20 мс, следующих с периодом 1 с; временной интервал между представленными матрицами составлял 20 с.

Анализ представленных и аналогичных данных позволил сделать следующие выводы. Во-первых, чувствительность каналов действительно существенно различна (до 3-х и более раз; один гидрофон $u_2 = 0$ находится в нерабочем состоянии) и требует коррекции, хотя все приемники рупорного типа были изготовлены Акустическим институтом в виде малой серии на базе преобразователей 1П2Г $\varnothing 50$ мм, а коэффициенты усиления каналов были одинаковыми. Во-вторых, даже при имевшейся простейшей схеме измерений напряжение на выходе каждого канала изменяется во времени случайным образом (среднеквадратичное отклонение достигает 17% от среднего). В-третьих, эти изменения на различных каналах, взятые через достаточный интервал времени, высококоррелированы (коэффициент корреляции достигает 0.75).

Причинами, вызывающими временные коррелированные изменения выходных напряжений на разных каналах, могут быть качание излучателя и антенны, приводящее к изменению расстояния R между ними и относительному повороту диаграмм направленности излучателя и приемников, нестабильность уровня излучения, флюктуации звука при распространении и т.д. Некоррелированные изменения могут быть вызваны изменением условий приема на каждый гидрофон (пузырьки воздуха, обтекание потоком воды), нестабильностью коэффициента передачи каждого из каналов, влиянием шумовой помехи и т.д.

Факт временного изменения выходных напряжений требует введения в формулу (1) усреднения, что можно осуществить двояко, осредняя отдельно числитель и знаменатель или осредняя частные.

В первом случае имеем

$$\gamma_{i0} = \frac{u_{ij}}{u_{0j}} = \frac{\sum_{j=1}^N u_{ij}}{\sum_{j=1}^N u_{0j}}, \quad (2)$$

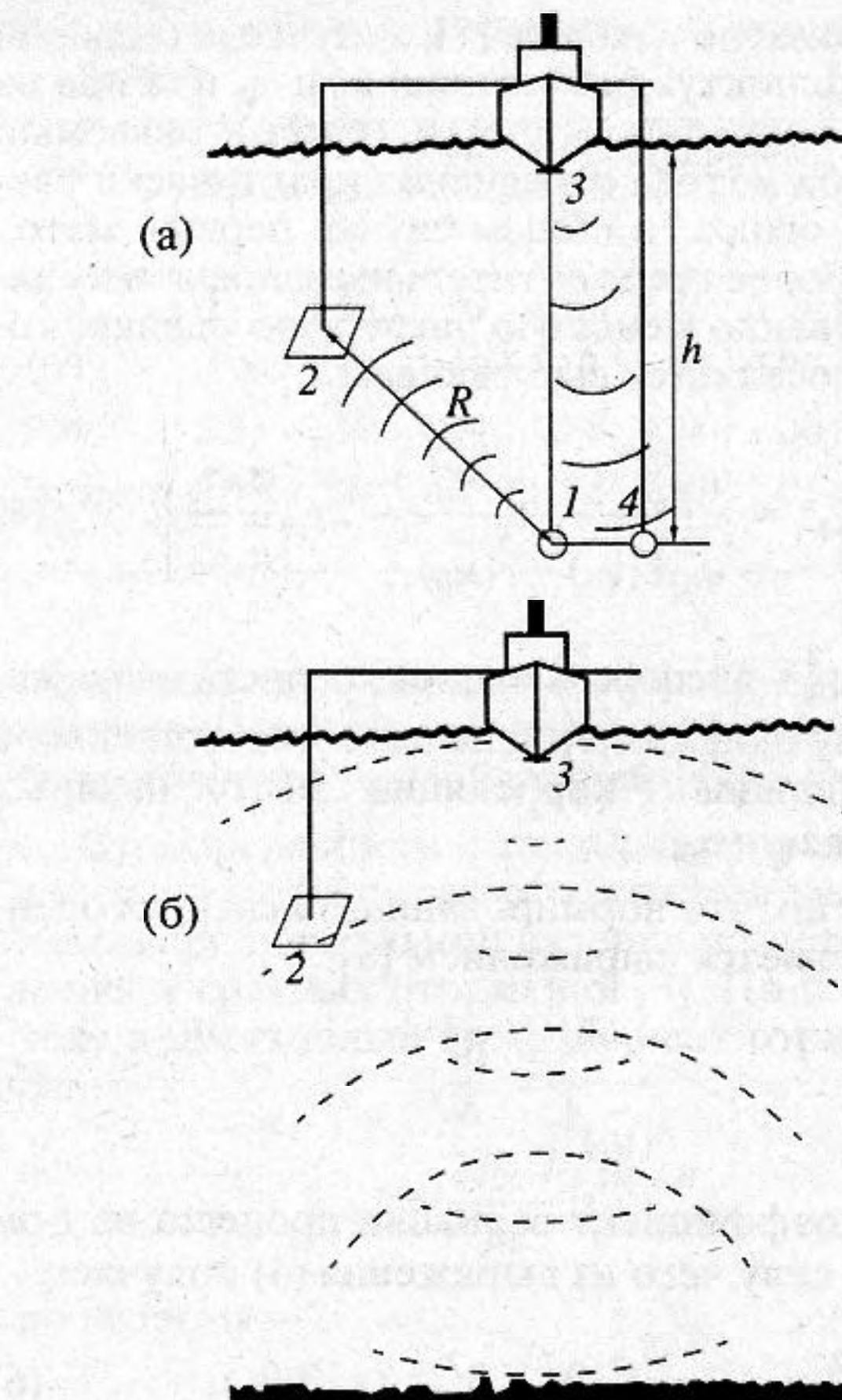


Рис. 1. Схемы калибровки.

(а) по прямому сигналу, (б) по отраженному от дна сигналу.

1 – градуированный излучатель; 2 – многоэлементная антенна; 3 – рабочий излучатель; 4 – градуированный приемник.

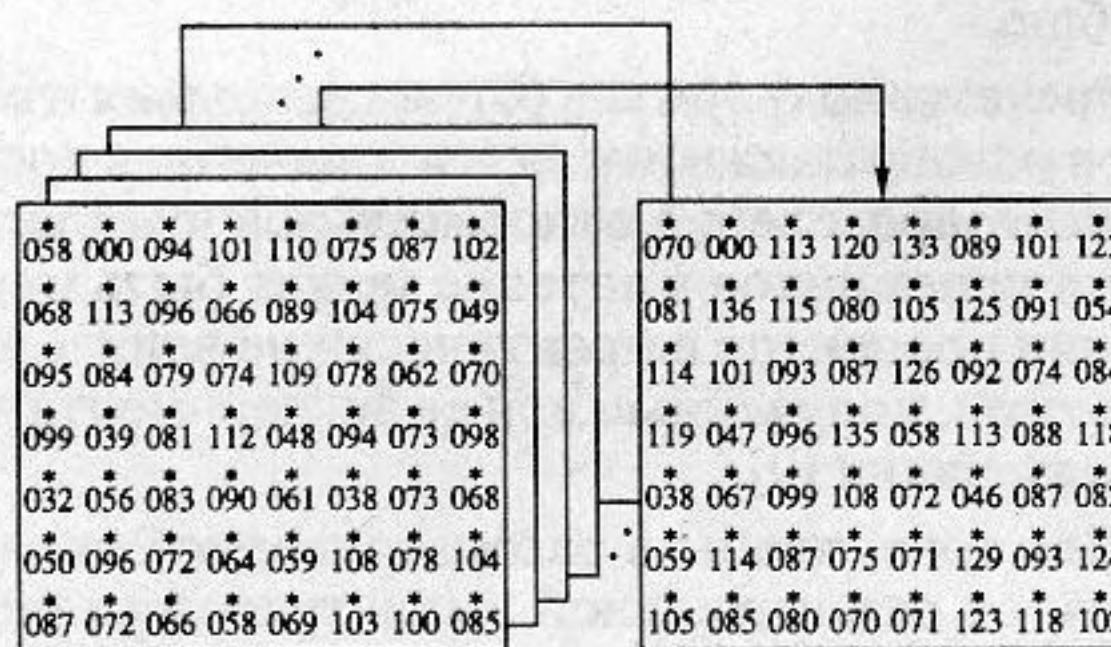


Рис. 2. Матрицы относительных уровней прямых сигналов на плоскости многоэлементной приемной антенны, полученные в разные моменты времени.

во втором –

$$\gamma_{i0} = \overline{\left(\frac{u_{ij}}{u_{0j}} \right)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{u_{ij}}{u_{0j}}, \quad (3)$$

где j – номер посылки; N – общее число посылок.

Как показано в работе [7], в случае небольшой глубины флюктуаций величин u_{ij} и u_{0j} или при их высокой коррелированности (рассматриваемый случай) оба метода осреднения практически равноценны, однако в общем случае первый метод является более предпочтительным, поскольку дает существенно меньшую дисперсию оценки, которая определяется выражением

$$\sigma^2(\gamma_{i0}) = \frac{\overline{u_{ij}^2}}{u_{0j}^2} \left[\frac{\sigma_i^2}{(\overline{u_i})^2} + \frac{\sigma_0^2}{(\overline{u_0})^2} - 2r_{i0} \frac{\sigma_i \sigma_0}{u_i u_0} \right], \quad (4)$$

где σ_i^2 и σ_0^2 — дисперсии оценок среднего напряжения по i -му и опорному каналам соответственно, а r_{ij} — коэффициент корреляции центрированных процессов u_{ij} и u_{0j} .

Известно, что нормированная дисперсия оценки определяется выражением [8]

$$\frac{\sigma_i^2}{(\overline{u_i})^2} = \frac{\beta_i^2}{N}, \quad (5)$$

где β_i — коэффициент вариации процесса на i -ом канале, в силу чего из выражения (4) получаем

$$\sigma^2(\gamma_{i0}) = \frac{S_{i0}}{N} (\beta_i^2 + \beta_0^2 - 2r_{i0} \beta_i \beta_0), \quad (6)$$

где $S_{i0} = \overline{u_{ij}^2} / \overline{u_{0j}^2}$ — отношение мощностей процессов по i -му и опорному каналам.

Как видно, окончательные результаты зависят от степени коррелированности флюктуаций, и в случае 100% корреляции $\beta_i = \beta_0 = \beta$ независимо от величины N , и оценочная ошибка отсутствует вообще.

Расчеты по формуле (6) для реальных измерений в океане показывают, что оценочная погрешность в определении относительной чувствительности приемников в антенне может быть меньше единиц процентов и практически не влиять на результаты, полученные при ее экспериментальной эксплуатации [9].

Для того, чтобы в рассматриваемой схеме перейти от относительной амплитудной калибровки к абсолютной, необходимо использовать стандартный градуированный излучатель, а процедуру калибровки дополнить операцией измерения расстояния R , что осуществляется посредством измерения времени распространения сигнала от излучателя до приемной антенны. В наших измерениях в качестве излучателя использовался преобразователь 1П2Г Ø50 мм, поверенный в секторе акустических измерений Акустического института¹ со средней чувствительностью в диа-

пазоне частот 5–30 кГц около 120 дБ относительно 1 мкПа/В м. В стандартных условиях точность определения чувствительности в соответствии с поверочным паспортом составляла десятые доли дБ, однако в натуральных экспериментах абсолютную точность нельзя считать выше 1.0–1.5 дБ.

Вместе с тем, для некоторых измерений, например, для определения эффективного коэффициента отражения звука от дна [3], необходимо также получить уровень зондирующего сигнала с рабочего излучателя (3) (рис. 1а), приведенного к единичному расстоянию. Поэтому в общем случае схема калибровки должна включать также заглубленный градуированный приемник (4), расположенный вблизи оси диаграммы направленности рабочего излучателя. Заглубление приемника в наших экспериментах составляло 100–200 м для выполнения условий нахождения его в дальней зоне относительно излучателя и относительно небольшого углового его перемещения в пределах диаграммы направленности излучателя. В качестве приемника использовался градуированный преобразователь типа 1П2Г Ø50 мм, снабженный предварительным усилителем. В общих чертах схема на рис. 1а в разных вариантах использовалась для калибровки в натуральных экспериментах до сравнительно недавнего времени [3].

Перейдем теперь к предложенному нами более простому и удобному методу калибровки, при котором используются отраженные от дна сигналы, полученные в режиме, обычном для проведения исследовательских работ по отражению звука от дна при нормальном падении (рис. 1б). Достоинством метода является отсутствие калибровочных излучателя и приемника и возможность его реализации в ходе выполнения экспериментов, в частности, на ходу судна, если антенна жестко соединена с корпусом. Кроме того, метод характеризуется высокой оперативностью и дает возможность практически непрерывного контроля стабильности коэффициентов передачи. Суть метода заключается в получении совокупности последовательных реализаций отраженного сигнала, состоящих из N отсчетов, одновременно зарегистрированных на каждом из приемников антенны (2), усреднении этих отсчетов и сравнении средних значений на каждом из приемников. Относительная чувствительность при этом определяется аналогично формуле (2).

Операция усреднения по времени (пространству) является принципиально необходимой, поскольку в силу существования т.н. тонкой структуры отраженного от дна акустического поля параметры сигнала в точках пространства, разнесенных по горизонтали на расстояние порядка длины волны излучения и более, существенно различны и практически статистически независимы². Необходимым условием выполне-

¹ Работы выполнялись под руководством В.Б. Чернышова.

ния калибровки при этом является движение приемо-излучающей системы в горизонтальной плоскости, обеспечивающее получение ансамбля отсчетов, необходимого для усреднения и(или) использование узкополосного ЧМ-излучения [3].

Метод основывается на прямом использовании эргодической теоремы, в соответствии с которой среднее значение стационарного случайного процесса, полученное путем использования временного ансамбля из каждой реализации процесса, с любой степенью точности может быть приближенно к величине, равной среднему его значению, полученному по ансамблю реализаций процесса в фиксированный момент времени [10]. В рассматриваемом случае отдельной реализацией процесса является амплитуда отраженного сигнала, принятого на каждый из гидрофонов антенны, а временной ансамбль определяется выборками из этого сигнала или нескольких последовательных сигналов. Необходимый объем независимых отсчетов для калибровки можно оценить из формулы (6), считая $r_{i0} = 0$ и задаваясь допустимой дисперсией оценки относительной чувствительности.

Значения коэффициента вариации амплитуды отраженного от дна сигнала на частотах порядка килогерц и выше по обобщенным данным работы [3] изменяются в основном в пределах от 0.30 до 0.80. Исходя из этих значений, для 10% среднеквадратичной погрешности оценки число выборок должно находиться в пределах от 50 до 100. В таблице приведены результаты оценки коэффициентов передачи каналов антенны системы "Пласт-2" [6] при различном количестве отсчетов. В нижней строке таблицы приведены результаты традиционной калибровки по прямому сигналу.

Как видно, результаты калибровки по отраженному сигналу хорошо совпадают с результатами калибровки по прямому сигналу. По результатам измерений при осреднении по 100 отсчетам коэффициент корреляции этих величин примерно равен 0.9, при среднеквадратичном отклонении около 4%. С увеличением числа выборок отличие коэффициентов передачи друг от друга уменьшается. Таким образом, методы калибровки по прямому и отраженному сигналам при достаточной выборке практически равноценны.

При проведении экспериментов по определению эффективного коэффициента отражения от дна можно избежать отдельных абсолютных калибровок чувствительности приемников и давления в излученной волне, а использовать величину $U_0 = p_0 \gamma_0$ (p_0 – амплитуда звукового давления на единичном расстоянии от излучателя, γ_0 – чув-

ствительность приемника) [3]. С применением многоэлементной антенны оценка U_0 может быть проведена с наибольшей эффективностью.

Число отсч.	Номер гидрофона							
	1	2	3	4	5	6	7	8
50	0.81	1.13	0.99	1.10	0.96	0.98	0.95	1.09
100	0.90	1.01	1.01	1.12	0.93	0.97	0.97	1.07
500	0.91	1.02	1.04	1.14	0.91	1.00	1.02	1.04
Прямой сигн.	0.90	1.04	1.05	1.17	0.91	1.03	1.01	1.05

ствительность приемника) [3]. С применением многоэлементной антенны оценка U_0 может быть проведена с наибольшей эффективностью.

Суть предлагаемой калибровки заключается в измерении эффективного коэффициента отражения при нормальном падении по методам сравнения и кратных отражений [3]. По первому методу эффективный коэффициент отражения $V_{эф}$ равен

$$V_{эф} = \frac{2\bar{p}_1 H}{p_0} 10^{0.1\alpha H}, \quad (7)$$

по второму –

$$V_{эф} = \frac{2\bar{p}_2}{\bar{p}_1} 10^{0.1\alpha H}, \quad (8)$$

где \bar{p}_1 и \bar{p}_2 – средние значения давления в однократно и двукратно отраженной дном волне соответственно, α – коэффициент поглощения звука в среде, H – глубина места. Из (7) и (8) получаем

$$p_0 \bar{p}_2 = (\bar{p}_1)^2 H. \quad (9)$$

Проводя осреднение по всем приемникам антенны, средние амплитуды при однократном и двукратном отражениях можно представить в виде

$$\bar{p}_1 = \frac{1}{N\gamma_0} \sum_{i=1}^N \frac{u_i^{(1)}}{\gamma_i/\gamma_0} \quad (10)$$

и

$$\bar{p}_2 = \frac{1}{N\gamma_0} \sum_{i=1}^N \frac{u_i^{(2)}}{\gamma_i/\gamma_0}, \quad (11)$$

где u_i – электрический сигнал на выходе i -го приемника, N – общее число приемников. Из (9), (10) и (11) можно получить

$$U_0 = p_0 \gamma_0 = \frac{H}{N} \left[\left(\sum_{i=1}^N \frac{u_i^{(1)}}{\gamma_i/\gamma_0} \right)^2 / \left(\sum_{i=1}^N \frac{u_i^{(2)}}{\gamma_i/\gamma_0} \right) \right]. \quad (12)$$

² Поскольку в этом случае флуктуации анализируемых процессов заведомо велики, а корреляция практически отсутствует, то способ осреднения должен быть именно таким, каким он предписывается формулой (2), а не (3).

Величина U_0 является постоянной для данной приемо-излучающей системы и имеет физический смысл напряжения на выходе опорного канала при условии расположения опорного приемника на единичном расстоянии от излучателя.

Дисперсия оценки величины U_0 может быть уменьшена, если наряду с пространственным применить временное усреднение, используя n последовательных реализаций, дающих некоррелированные значения амплитуды на каждом из приемников. В этом случае

$$U_0 = \frac{H}{Nn} \sum_{j=1}^n \left[\left(\sum_{i=1}^N \frac{u_{ij}^{(1)}}{\gamma_i/\gamma_0} \right)^2 / \left(\sum_{i=1}^N \frac{u_{ij}^2}{\gamma_i/\gamma_0} \right) \right]. \quad (13)$$

Число некоррелированных выборок амплитуд в реальных случаях может достигать десяти тысяч и более, а потому среднеквадратичное отклонение оценки, пропорциональное $(nN)^{-0.5}$, может быть сделано достаточно малым, чтобы пренебречь им по сравнению с флюктуационной погрешностью относительной калибровки приемных трактов (величины γ_{i0}), необходимой для получения величины U_0 . Подчеркнем, что величина U_0 , полученная таким методом, не содержит систематических ошибок, связанных с учетом поглощения звука, и с данными абсолютных калибровок, которые являются определяющими при абсолютных измерениях.

Предлагаемая схема калибровки не требует специального оборудования и предварительной подготовки места проведения измерений, однако ее качество зависит от выполнения некоторых очевидных условий. Калибровка должна проводиться в дрейфе судна при благоприятных погодных условиях при отсутствии волнения (не более 1 балла), при крене судна менее 2° и скорости дрейфа не более десятых долей узла. Глубина ме-

ста и отражающие свойства дна должны обеспечивать уверенный прием сигнала второй кратности, а рельеф дна в масштабе эхолотного промера должен быть ровным и плоским для обеспечения минимального размера эффективной отражающей площади дна, что является важным условием применимости метода кратных отражений [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боббер Р. Гидроакустические измерения. М.: Мир, 1974. 362 с.
2. Клюкин И.И., Колесников А.Е. Акустические измерения в судостроении. 3-е изд. Л.: Судостроение, 1982. 256 с.
3. Воловов В.И. Отражение звука от дна океана. М.: Наука, 1993. 272 с.
4. Брежовских Л.М., Воловов В.И., Краснобородько В.В., Лысанов Ю.П. Об акустических методах в морской навигации // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 3. С. 413-419.
5. Воловов В.И. О комплексном подходе к решению навигационных и океанологических задач с использованием отраженных от дна сигналов // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 1. С. 142-144.
6. Антокольский Л.М., Воловов В.И., Говоров А.И., Халилуллоев Ш.Ш. Многоэлементная приемная система для исследования отражения звука от дна океана // Судостроительная промышленность. Сер. Акустика. ЦНИИ "Румб". 1988. № 3. С. 27-32.
7. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970. 296 с.
8. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
9. Воловов В.И., Клюев М.С. Точность измерения малого смещения судна и отслеживания его траектории акустическим методом // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 1. С. 72-76.
10. Пугачев В.С. Теория случайных функций. М.: ГИФМЛ, 1962. 884 с.

In-Field Calibration of Multi-Element Acoustic Antenna Arrays

V. I. Volovov and A. I. Govorov

Methods of in-field absolute calibration of multi-element acoustic antennas are considered. Requirements imposed on the calibration procedures are formulated, and the calibration accuracy is estimated. A new calibration method that uses the statistics of bottom-reflected signals is proposed, practical calibration schemes are recommended, and data of deep-ocean experimental measurements are presented.