

Уменьшение погрешности калибровки гидрофонов по полю в отражающем бассейне

А. Е. ИСАЕВ, А. Н. МАТВЕЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: isaev@vniiftri.ru

Рассмотрены вопросы калибровки гидрофонов по полю при непрерывном излучении полосового сигнала в отражающем бассейне с использованием техники скользящего комплексного взвешенного усреднения. Расширение частотного диапазона и уменьшение погрешности калибровки достигнуты благодаря учету дополнительной информации о поведении искомой частотной зависимости передаточного импеданса пары излучатель—приемник и применению многошагового усреднения.

Ключевые слова: измерительный бассейн, свободное поле, калибровка гидрофонов.

The problems of free-field hydrophones calibration at continuous radiation of band-pass signals in reverberate water tank using the moving complex weighted averaging technique are considered. The extension of frequency range and reduction of calibration error are achieved by taking into account of the additional information on behavior of the required transfer impedance frequency dependence of the radiator—receiver pair and by using of multi-step CMWA technique.

Key words: water tank, free field, hydrophone calibration.

Гидроакустический измерительный бассейн — весьма сложное и дорогостоящее сооружение, поэтому возможности измерений в бассейне всегда стремятся использовать как можно полнее, в частности, максимально расширить частотный диапазон калибровки гидрофонов по полю в область низких частот. При этом существуют ограничения традиционных методов калибровки гидрофонов по полю в гидроакустическом бассейне.

Применение метода скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) для калибровки гидрофонов по полю [1] при непрерывном излучении полосовых сигналов в отражающем бассейне позволяет эффективно исключать влияние отражений и достигать высокой точности измерений. Одно из основных ограничений метода — требование к неравномерности искомой частотной характеристики в частотном интервале усреднения. В определенной мере его можно ослабить, если учесть преимущество, которое выгодно отличает метод СКВУ от других методов измерений в поле отражающего бассейна, а именно — возможность привлечения в процедуру обработки дополнительной информации. Ниже обсуждаются способы использования информации об искомой частотной зависимости для повышения точности метода СКВУ.

Исходные данные для обработки методом СКВУ: количество значимых отражений n , временные задержки Δt_i ($i = 1, \dots, n$) отражений в точке приема относительно прямого сигнала излучателя, комплексная частотная зависимость выходного напряжения системы излучатель—приемник (далее — отклика приемника) в поле отражающего бассейна $U'_{PH}(f)$.

Отклик приемника в свободном поле $U_{PH}(f)$ находят, применяя метод СКВУ к отклику $U'_{PH}(f)$ в поле отражающего бассейна. Взвешивающую функцию получают многократной сверткой прямоугольных окон, ширина каждого из них в герцах составляет величину, обратную временной задержке соответствующего отражения в секундах [2]. Одиночное отражение, задержанное на время Δt , вызывает осцилляции от-

клика приемника с периодом $\Delta f = 1/\Delta t$. Частотную зависимость амплитуды осцилляций определяет форма искомого отклика приемника в свободном поле $U_{PH}(f)$:

$$U'_{PH}(f) = U_{PH}(f)(1 + \exp[-j2\pi\Delta f]).$$

Равноточное скользящее комплексное усреднение отклика $U'_{PH}(f)$ в частотном интервале Δf приведет к следующему результату:

$$\tilde{U}_{PH}(f) = \frac{1}{\Delta f} \int_{-\Delta f/2}^{\Delta f/2} U'_{PH}(f - f') df' = U_{PH}(f, \Delta f) + \dot{\epsilon}(f, \Delta f),$$

где $U_{PH}(f, \Delta f) = \frac{1}{\Delta f} \int_{-\Delta f/2}^{\Delta f/2} U_{PH}(f - f') df'$ — искомый отклик прием-

ника в свободном поле, скользяще усредненный в частотном интервале Δf ; $\dot{\epsilon}(f, \Delta f)$ — остаточная осцилляция после скользящего усреднения.

Если отклик приемника в свободном поле слабо зависит от частоты, то одиночное отражение вызовет осцилляции, изменяющиеся по гармоническому закону (с неизменной амплитудой). Нетрудно убедиться, что в этой ситуации результатом равноточного скользящего комплексного усреднения $U'_{PH}(f)$ будет искомый отклик в свободном поле $U_{PH}(f)$, поскольку $U_{PH}(f, \Delta f)$ совпадает с искомой зависимостью $U_{PH}(f)$, а остаточная осцилляция $\dot{\epsilon}(f, \Delta f) = 0$.

Значительная неравномерность искомого отклика в частотном интервале усреднения приводит при его восстановлении методом СКВУ к возникновению двух источников погрешности. Первый обусловлен усреднением собственно искомого отклика $U_{PH}(f, \Delta f) \neq U_{PH}(f)$, а второй — отличной от нуля остаточной осцилляцией $\dot{\epsilon}(f, \Delta f)$. Обе эти погрешности можно уменьшить, если при применении метода СКВУ

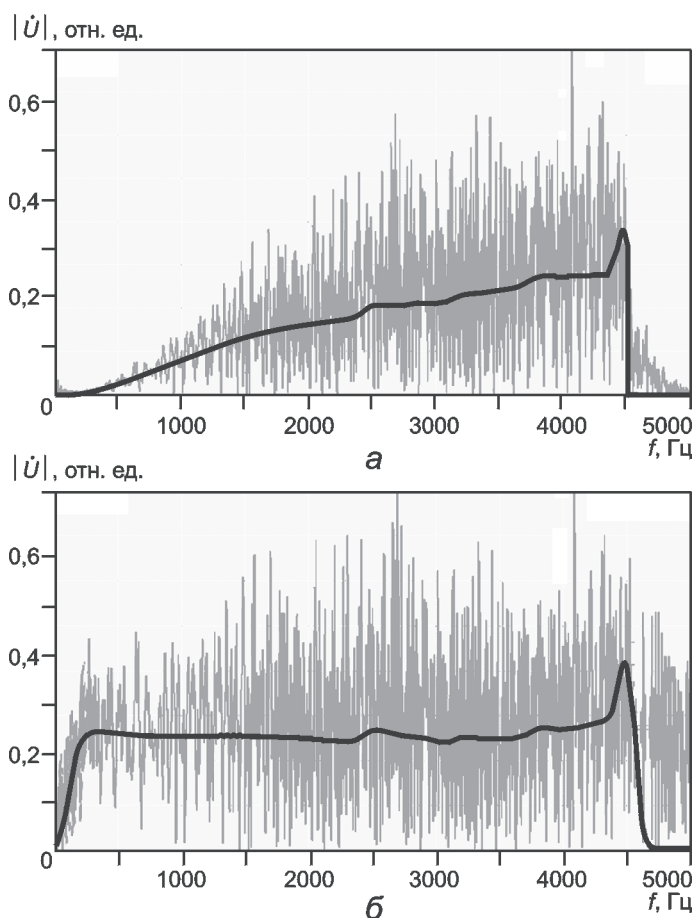


Рис. 1. Частотная зависимость модуля выходного напряжения гидрофона типа ГИ55, полученная методом СКВУ без редактирования (а) и с редактированием (б) исходной частотной зависимости (показана серым цветом); полуширная кривая — результат применения метода СКВУ

удастся обеспечить условия малой неравномерности искомого отклика приемника в свободном поле.

Задачу уменьшения погрешностей будем трактовать как задачу уменьшения частотной неравномерности искомого отклика приемника. Рассмотрим способ ее решения, основанный на предварительной обработке данных, которая позволяет исключить влияние неравномерности отклика в свободном поле при измерениях на низких частотах.

Особенность низкочастотной калибровки по свободному полю типового гидрофона состоит в том, что поведение измеряемых частотных зависимостей (крутизна наклона отклика системы излучатель—приемник) определяется характеристиками применяемых электронных трактов эталонной установки и эталонных преобразователей (излучателя и обратимого преобразователя) в значительно большей степени, чем поведением характеристики чувствительности собственно калибруемого гидрофона. Излучатели, применяемые в установках для калибровки гидрофонов, обычно являются обратимыми. Это позволяет использовать результаты исследований эталонной измерительной установки, в частности, частотные зависимости тока возбуждения излучателя $I_p(f)$ и данные калибровки излучателя на прием в камере малого объема $M_p(f)$ для прогнозирования поведения искомого отклика системы излучатель—приемник в свободном

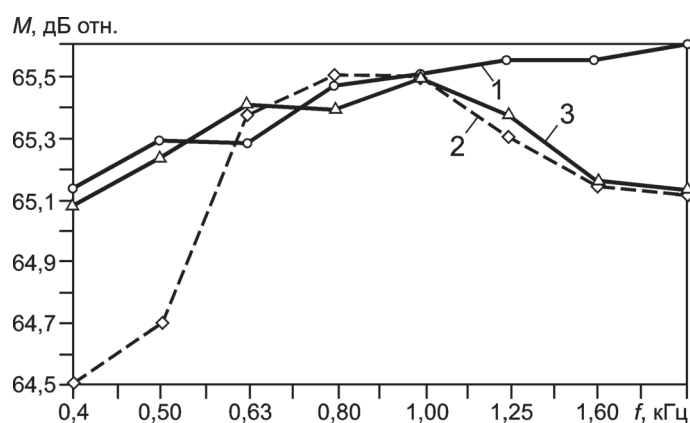


Рис. 2. Результаты калибровки гидрофона типа ГИ55:

1 — по давлению в камере малого объема; 2 — в свободном поле в отражающем бассейне с использованием соответственно одношаговой и многошаговой процедур; M — чувствительность относительно 1 мкВ/Па

поле, и привлечь полученные данные для повышения точности метода СКВУ.

Частотная зависимость в свободном поле выходного напряжения приемника, удаленного от излучателя на расстояние d_{PH} , выражается формулой

$$U_{PH}(f) = I_p(f)M_p(f)M_H(f)/(J(f)d_{PH}), \quad (1)$$

где $J(f) = [2d_0/(p f)] \exp(jkd_0 - \pi/2)$ — зависимость параметра взаимности от частоты; k — волновое число; d_0 — опорное расстояние; p — плотность воды; $M_p(f)/J(f) = S_p(f)$ — частотная зависимость чувствительности (излучателя) к излучению; $M_H(f)$ — чувствительность гидрофона.

Приняв во внимание слабую частотную зависимость чувствительности типового измерительного гидрофона на низких частотах, положим $M_H(f) = \text{const}$. Тогда, измерив частотные зависимости $I_p(f)$ и $M_p(f)$, по (1) нетрудно с точностью до малых изменений $M_H(f)$ на низких частотах оценить крутизну наклона частотной зависимости выходного напряжения приемника в свободном поле и аппроксимировать ее комплексной функцией $X_{PH}(f)$. Полученную аппроксимирующую функцию используем для редактирования отклика $U'_{PH}(f)$ перед обработкой методом СКВУ. Для каждой частоты f_m редактирование заключается в умножении $U'_{PH}(f_m)$ на $X_{PH}^{-1}(f_m)$:

$$U''_{PH}(f_m) = U'_{PH}(f_m)X_{PH}^{-1}(f_m).$$

После такой предварительной обработки отклика получим частотную зависимость $U''_{PH}(f_m)$, в значительной степени приближенную к ситуации, как если бы отклик приемника в свободном поле слабо зависел от частоты. Результатом обработки $U''_{PH}(f_m)$ будет зависимость $\tilde{U}_{PH, X}(f)$, в значительно меньшей степени искаженная вследствие усреднений и остаточной осцилляции в сравнении с результатом нереданного отклика $U'_{PH}(f_m)$.

Оценку искомого отклика приемника в свободном поле $\tilde{U}_{PH}(f)$ получим умножением $\tilde{U}_{PH, X}(f)$ на редактирующую функцию $X_{PH}(f)$:

$$\tilde{U}_{PH}(f) = \tilde{U}_{PH, X}(f) X_{PH}(f).$$

Несколько значимых отражений существенно не меняют алгоритм обработки исходной частотной зависимости и остаются в силе все изложенное выше с той лишь разницей, что вместо равноточного применяют взвешенное скользящее комплексное усреднение [2].

На рис. 1 и 2 приведены зависимости, полученные в результате низкочастотной калибровки в бассейне ВНИИФТРИ гидрофона ГИ55 на дополнительных сличениях COOMET.AUV.W-S1. На рис. 1, а представлены частотная зависимость выходного напряжения гидрофона ГИ55 (показана серым цветом), измеренная при излучении линейно-частотно-модулированных сигналов в отражающем бассейне, и частотная зависимость выходного напряжения гидрофона в свободном поле, полученная методом СКВУ (полужирная кривая). На рис. 1, б представлены отредактированная частотная зависимость (показана серым цветом) и результат ее обработки (полужирная кривая).

На рис. 2 приведены частотная характеристика чувствительности гидрофона ГИ55 по давлению, измеренная в камере малого объема (кривая 1); частотные характеристики чувствительности гидрофона ГИ55 в свободном поле, полученные методом СКВУ без редактирования (кривая 2) и с редактированием отклика гидрофона в поле отражающего бассейна (кривая 3). В диапазоне частот 400 — 1000 Гц кривые 1 и 2 отличаются на 0,65 дБ, а кривые 1 и 3 — меньше чем на 0,15 дБ. Привлечение дополнительной информации о поведении искомой характеристики и использование ее в методе СКВУ для редактирования исходной экспериментальной зависимости позволили уменьшить погрешность измерений на величину, значимую для прецизионных калибровок.

Применение многошаговой процедуры метода СКВУ при калибровке гидрофона в отражающем бассейне на высоких частотах. Повышения точности калибровки гидрофона на высоких частотах также можно добиться, применив редактирование подлежащей обработке частотной зависимости. Однако способ получения редактирующей функции в этом случае несколько изменяется. На высоких частотах чувствительность калибруемого гидрофона нельзя считать слабо зависящей от частоты. Характеристика излучения на высоких частотах также имеет более сложную частотную зависимость. Поэтому построить удовлетворительную редактирующую функцию аналогично тому, как это предложено выше для низких частот, оказывается значительно труднее.

В такой ситуации целесообразной оказывается многошаговая процедура метода СКВУ, в которой в качестве первого приближения редактирующей функции используют аппроксимацию частотной зависимости, полученной применением СКВУ непосредственно к исходному отклику гидрофона в поле отражающего бассейна. При этом аппроксимация высоких порядков нежелательна [3]. Оценку отклика гидрофона получают повторным применением СКВУ к отредактированной частотной зависимости.

Если повторить изложенную процедуру (получить новую редактирующую функцию, осуществить двойное редактирование исходного отклика, выполнить процедуру СКВУ отредактированной зависимости, скорректировать полученный результат с помощью двух редактирующих функций), то можно уточнить оценку искомого отклика гидрофона в свободном поле. По данным экспериментальных исследований редко требуется применять многошаговую процедуру СКВУ с числом шагов больше трех.

Чтобы сравнить результаты, полученные при одношаговой (без редактирования) и многошаговой (с редактированием) процедурах СКВУ на высоких частотах, был проведен эксперимент в бассейне ВНИИФТРИ. В качестве опорной при сравнении была принята частотная характеристика, полученная традиционным методом временной селекции тонального импульса. Результаты применения одношаговой процедуры метода СКВУ отличаются на 0,4 дБ от частотной характеристики, определенной традиционным методом. Использование многошаговой процедуры позволило снизить погрешность калибровки гидрофона на 0,13 — 0,17 дБ. Эти различия оказываются весомыми в случае прецизионных измерений. В то же время, если частотные характеристики преобразователей, используемых при калибровке гидрофона, изменяются плавно и незначительно, то одношаговая процедура достаточно эффективна при рутинных калибровках.

Выводы. Таким образом, результаты калибровки гидрофона по полю на низких частотах либо в области существенной неравномерности частотной зависимости передаточно-го импеданса пары излучатель—приемник можно улучшить применением многошаговой процедуры, использовав оценку искомой частотной зависимости, полученную методом СКВУ на текущем шаге, для редактирования исходной частотной зависимости.

Привлечение дополнительной информации о поведении искомой частотной зависимости при обработке результатов дает возможность повысить точность измерений и уменьшить погрешность калибровки, в частности, на низких частотах.

Л и т е р а т у р а

1. **Исаев А. Е., Матвеев А. Н.** Два подхода к градуировке гидрофонов по полю при непрерывном излучении в заглушенном бассейне // Измерительная техника. 2008. № 12. С. 47—51; **Isaev A. E., Matveev A. N.** Two approaches to hydrophone free-field calibration at continuous radiation in non-anechoic water tank // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 12. P. 1329—1336.
2. **Исаев А. Е., Матвеев А. Н.** Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в ревербирующем бассейне // Акустический журнал. 2009. Т. 55. № 6. С. 727—736.
3. **Исаев А. Е., Матвеев А. Н.** Применение метода скользящего комплексного взвешенного усреднения для восстановления неравномерной частотной характеристики приемника // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 4. С. 1—5.

Дата принятия 13.09.2012 г.