

Калибровка в лабораторном бассейне рекордера с вынесенным гидрофоном

А. Е. ИСАЕВ, А. С. НИКОЛАЕНКО

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

Предложен способ уменьшения искажения формы частотной зависимости чувствительности гидроакустического рекордера при его калибровке. Способ основан на коррекции характеристики пропускания пространственного фильтра, реализуемого обработкой методом скользящего комплексного взвешенного усреднения. Эффективность способа подтверждена результатами контрольных измерений тонально-импульсным методом.

Ключевые слова: калибровка по свободному полю, лабораторный бассейн, гидроакустический рекордер, метод скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ).

The technique that allows to reduce distortions in the form of the frequency response of an underwater sound recorder caused by using the method of complex moving weighted averaging for calibration is discussed. The technique based on correction of the spatial filter transmission characteristic realized by considered method. The efficiency of technique was confirmed by the results of control measurements using tone-burst method.

Key words: free-field calibration, laboratory water tank, underwater sound recorder, method of complex moving weighted averaging (CMWA).

В течение последних лет Европейским Союзом, США и международными организациями принят ряд деклараций и нормативных документов, в которых повышены требования к точности измерения уровней подводного шума (УПШ) [1–3]. Сейчас при калибровке гидрофонов и гидроакустических приёмников (рекордеров) по полю в условиях незаглушённого бассейна успешно применяют метод скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) [4]. Метод предполагает измерение комплексной частотной зависимости пары излучатель–приёмник при непрерывном излучении широкополосного сигнала. Под влиянием отражённых от стенок бассейна звуковых волн возникают искажения экспериментальной частотной зависимости, которые устраняют методом СКВУ. Усреднение выполняют в частотных интервалах, рассчитываемых по временным задержкам отражённых сигналов. Недостатком метода СКВУ является сглаживание искомой частотной зависимости в результате скользящего усреднения. Такое сглаживание вносит пренебрежимо малые искажения в результаты калибровки гидрофона, что объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, достаточно совершенная конструкция современных гидрофонов обеспечивает гладкую (медленно изменяющуюся с изменением частоты) частотную зависимость чувствительности гидрофона. Во-вторых, при калибровке гидрофона стенки бассейна находятся на таком удалении от точки приёма, что достаточно большие временные задержки отражённых сигналов обеспечивают малый эффективный частотный интервал усреднения СКВУ (в бассейне размером 6×6×10 м интервал немного шире 250 Гц). Расширенная неопределённость калибровки опорных гидрофонов с использованием метода СКВУ не превышает 0,5 дБ, что было подтверждено итогами международных сличений [5, 6]. При этом составляющая неопределённости, обуслов-

ленная собственно обработкой методом СКВУ, не превышает десятой доли децибела.

При мониторинге антропогенного подводного шума морской акватории широко применяют гидроакустические рекордеры с гидрофоном, расположенным вне корпуса рекордера. В частотной зависимости чувствительности данного рекордера (в отличие от такой зависимости гидрофона) присутствуют значительные осцилляции, порождаемые отражениями звуковой волны от корпуса рекордера. При расположении гидрофона вблизи корпуса размах осцилляций может достигать 18 дБ (рекордер типа «AURAL» [7]). Период осцилляций составляет несколько килогерц, что много больше частотного интервала усреднения СКВУ. Вследствие этого, усреднение слабо скажется на размахе осцилляций получаемой частотной зависимости. Поскольку неопределённость измерений УПШ рекордером будет определяться размахом осцилляций, то даже при большом размахе влияние СКВУ внесёт сравнительно малый вклад в общую неопределённость измерений УПШ.

Чтобы уменьшить размах осцилляций, гидрофон относят от корпуса рекордера на значительное расстояние, однако при этом сокращается период осцилляций. Если период осцилляций становится сопоставимым с частотным интервалом усреднения СКВУ, то усреднение дополнительно уменьшает размах осцилляций относительно его действительного значения. Это уменьшение тем сильнее, чем дальше гидрофон отнесён от корпуса. В результате оценка неопределённости измерения УПШ оказывается занижена.

Данное обстоятельство не является единственным недостатком метода СКВУ. Технология измерений с использованием СКВУ объединяет ряд способов, направленных на устранение недостатков рассматриваемого метода: предварительное редактирование экспериментальной частотной зависимости

на основе априорной информации; апостериорное редактирование; измерения в реверберационном звуковом поле шумового сигнала; излучение непрерывного линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала в диапазоне, симметричном относительно нуля на оси частот; использование передаточной функции бассейна и др. [8, 9]. Для усовершенствования данной технологии измерений предложен способ уменьшения искажения формы получаемой частотной зависимости в результате коррекции характеристики пропускания пространственного фильтра, реализуемого обработкой методом СКВУ.

При обработке методом СКВУ характеристика пропускания пространственного фильтра представляет произведение характеристик пропускания фильтров одиночных отражений, описываемых функцией вида $\sin(x)/x$ [4]. Функция коррекции фильтра i -го отражения, приходящего с задержкой τ_i относительно прямой волны излучателя, построена на основе функции пропускания резонансного контура второго порядка и имеет вид

$$A(\tau) = \left(\left\{ 1 - [\tau/(a\tau_i)]^2 \right\}^2 + [\tau/(b\tau_i)]^2 \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

где τ – переменная, имеющая размерность времени; a, b – безразмерные параметры.

На рис. 1 приведены функция пропускания фильтра, подавляющего одиночное отражение, корректирующая функция и скорректированная функция пропускания.

Размеры калибруемого приёмника, как правило, существенно меньше размеров бассейна. При этом временная задержка первого отражения от стенок бассейна всегда существенно больше задержки отражения от элемента конструкции приёмника, наиболее удалённого от точки расположения гидрофона. В этой ситуации форма скорректированной характеристики пропускания на участке, примыкающем слева к положению её первого нуля [4], не имеет практического значения. Параметры a, b подбирают так, чтобы поведение функции $A(\tau)$ было близким к поведению функции $[\sin(x)/x]^{-1}$, в интервале $0 \leq \tau \leq 0,8\tau_i$. При этом максимум корректирующей функции будет расположен левее первого нуля функции пропускания фильтра одиночного отражения. Это обеспечивает близкую к плоской форму вершины и крутой спад скорректированной функции пропускания.

Итоговую корректирующую функцию для n фильтров одиночных отражений получают как произведение n корректирующих функций. При использовании метода СКВУ обычно подавляют три отражения ($n=3$). Заметим, что значения параметров a, b не зависят от положения нуля корректируемой функции пропускания, поэтому в эксперименте они были общими для всех корректирующих функций. Исходя из практической целесообразности критерием оптимальности при подборе параметров a и b служила минимальная неравномерность скорректированной итоговой функции пропускания в области задержек, меньших $2/3$ задержки первого отражения. В описываемом эксперименте $a=0,805$; $b=2,672$. На рис. 2 представлены итоговая функция пропускания при подавлении трёх отражений с применением обработки методом СКВУ и скорректированная итоговая функция пропускания.

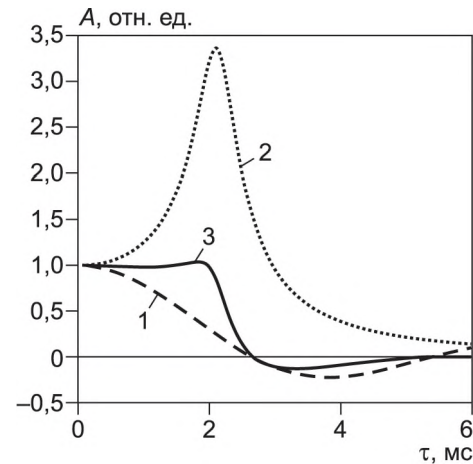


Рис. 1. Применение корректирующей функции: 1 – функция пропускания фильтра одиночного отражения; 2 – корректирующая функция; 3 – скорректированная функция пропускания

Рассмотренный способ коррекции был опробован при калибровке массогабаритной модели рекордера с цилиндрическим корпусом диаметром 150 мм и длиной 400 мм. Гидрофон был установлен на расстоянии 830 мм от торца корпуса по оси цилиндра. В процессе калибровки рекордера гидрофон был направлен в сторону излучателя. Измерения проводили в незаглушённом бассейне размером $6 \times 6 \times 10$ м, задержка первого отражения составляла 2,9 мс. Использовали ЛЧМ-излучение. Контрольные измерения выполняли тонально-импульсным методом.

Частотную зависимость чувствительности, полученную обработкой методом СКВУ, скорректировали следующим образом. По задержкам отражений, подавленных указанной обработкой, рассчитали функции коррекции фильтров одиночных отражений, по которым определили итоговую функцию коррекции. С помощью преобразования Фурье вычислили

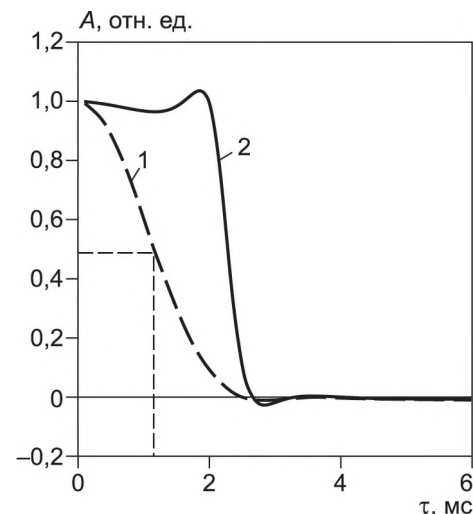


Рис. 2. Функции пропускания фильтра трёх отражений: 1, 2 – обработанная методом СКВУ и скорректированная, соответственно

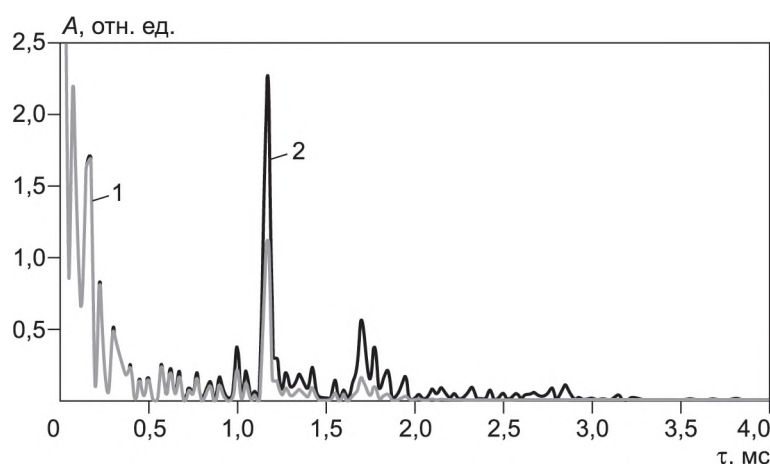


Рис. 3. Кепстр частотной характеристики чувствительности рекордера: 1, 2 – обработанный методом СКВУ и скорректированный, соответственно

кепстр частотной зависимости и умножили его на итоговую корректирующую функцию. Искомую частотную зависимость получили обратным преобразованием Фурье скорректированного кепстра.

На рис. 3 изображены результат преобразования Фурье (кепстр) частотной характеристики чувствительности рекордера, полученной в результате подавления первых трёх отражений от границ бассейна, и скорректированный кепстр. На зависимостях выделяется пик, положение которого на оси абсцисс соответствует периоду осцилляции, а высота – размаху A осцилляции частотной характеристики чувствительности рекордера. Осцилляция обусловлена отражением звука от обращённого к гидрофону торца корпуса рекордера. Задержка отражения составляет 1,17 мс, что соответствует разности хода 1,7 м (расстояние от гидрофона до торца корпуса 830 мм, разность хода 1,66 м). В результате обработки методом СКВУ размах осцилляции оказался уменьшен примерно в 2 раза (см. рис. 2, пунктирные прямые).

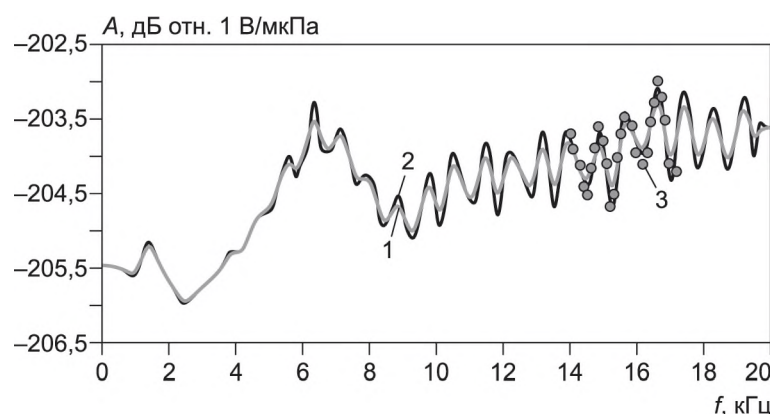


Рис. 4. Частотная характеристика чувствительности рекордера: 1 – полученная с использованием метода СКВУ; 2 – восстановленная после коррекции; 3 – результаты, полученные тонально-импульсным методом

С целью точного учёта влияния корпуса рекордера при его калибровке, необходимо восстановить размах осцилляций, уменьшенный при обработке методом СКВУ. На рис. 4 приведены частотные характеристики чувствительности, полученные с использованием метода СКВУ при калибровке рекордера в бассейне (кривая 1) и после коррекции (увеличение примерно в два раза) размаха осцилляций (кривая 2). Точками 3, положение которых практически совпадает с кривой 2, показаны результаты, полученные тонально-импульсным методом. Разброс кривых 1, 2 достигает 0,5 дБ. Это означает, что при оценке инструментальной погрешности измерений УПШ с использованием кривой 1, составляющая, обусловленная осцилляцией частотной характеристики чувствительности, была бы занижена на 0,5 дБ. Это сравнимо с требованиями к общей неопределённости калибровки рекордера, предназначенного для измерений УПШ.

Калибровку гидрофонов по полю в бассейне выполняют на дискретных частотах третьооктавного ряда тонально-импульсным методом измерений. В отличие от гидрофона при калибровке рекордера требуются подробные частотные характеристики, при этом трудоёмкость измерений тонально-импульсным методом многократно возрастает. По указанным характеристикам определяют необходимую при измерениях УПШ «энергетическую» чувствительность приёмника в полосах частот. Для определения инструментальной погрешности по размаху осцилляций также необходимо выявить положения экстремумов частотной характеристики по результатам многократных измерений с малым шагом по частоте. Правильность этих результатов удаётся оценить только в конце эксперимента по форме полученной частотной характеристики.

Поясним это на примере эксперимента с рекордером. При измерениях тонально-импульсным методом на осциллограмме выходного напряжения приёмника выбирают участок, который используют для оценки амплитуды напряжения. Обычно критерием выбора этого участка является установление значения выходного напряжения (неизменность его амплитуды).

В эксперименте с рекордером этот критерий требует существенного уточнения. На осциллограмме выходного напряжения есть два участка установившегося напряжения. На первом участке, расположенном в пределах 1,17 мс от начала приёма, присутствует сигнал, обусловленный только прямой волной излучателя. Амплитуда напряжения на этом участке содержит информацию о частотной характеристике собственно гидрофона. Второй участок расположен в пределах последней миллисекунды перед приходом волны, отражённой ближайшей стенкой бассейна. В течение этого интервала на гидрофон падают прямая волна излучателя и волна, отражённая корпусом рекордера. По амплитуде напряжения на втором участке можно оценить чувствительность рекордера, поэтому при контрольных измерениях выбрали данный участок. Положение второго участка определяли не по осциллограмме принятого тонального импульса, а по кепстру частотной зави-

симости, измеренной с использованием ЛЧМ-сигнала. Участок кепстра в интервале задержек 1,5–2 мс содержит отражение от тыльного торца рекордера, влияние которого также должно быть учтено. Таким образом, чтобы выбрать участок осциллограммы, пригодный для измерений тонально-импульсным методом, необходимо использовать кепстр частотной зависимости, измеренной либо при непрерывном изменении частоты сигнала излучателя, либо при малых приращениях частоты.

При калибровке сложных объектов увеличивается неопределённость, вносимая усреднением методом СКВУ. Примером такого объекта является рассмотренный в настоящей работе рекордер с гидрофоном, отнесённым от корпуса рекордера. В ситуации, когда гидрофон настолько удалён от корпуса рекордера, что расстояние до отражающей звуковую волну элемента корпуса рекордера сопоставимо с расстоянием до отражающей стенки бассейна, требуется коррекция искажений, вносимых усреднением по методу СКВУ. Изложенный выше способ коррекции является эффективным, что подтверждает близкое совпадение результатов предложенного и тонально-импульсного методов.

Заключение. При измерениях тонально-импульсным методом реализуют прямоугольное временное окно. В этом смысле тонально-импульсный метод можно принять за эталонный метод измерений. Предложенный способ коррекции характеристики пропускания пространственного фильтра, реализуемый обработкой методом СКВУ, позволяет приблизить форму характеристики пропускания к прямоугольной. Это даёт возможность при калибровке таких сложных объектов, как рекордер получать результаты, близкие к результатам тонально-импульсного метода, и одновременно обеспечивать измерения непрерывных частотных зависимостей.

Для рутинных калибровок рекордера предпочтительнее выполнять обработку методом СКВУ, а для проверки правильности выполненной коррекции – проводить измерения на контрольных частотах тонально-импульсным методом. При выборе контрольных частот следует опираться на характер непрерывных частотных зависимостей, полученных методом СКВУ. Таким образом, при калибровке рекордера с вынесенным гидрофоном целесообразно использовать оба метода, чтобы достоинства одного метода перекрывали недостатки другого.

Л и т е р а т у р а

1. **Directive 2008/56/EC** of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive).
2. **ANSI/ASA S12.64-2009/Part 1 (R2014)** Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships. Pt. 1: General Requirements // Acoustic. Soc. Am., 2009.
3. **Euramet tc-auv roadmap: underwater acoustics.** Underwater acoustical metrology to support marine technology and sustain the marine environment.
4. **Исаев А. Е.** Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008.
5. **Chen Y. et al.** The COOMET Pilot Comparison 473/RU-a/09: Comparison of hydrophone calibrations in the frequency range 250 Hz to 200 kHz // Metrologia Tech. Suppl. 2011. V. 48. 09004.
6. **Маларкоди А., Лата Г., Атмананд М. А., Исаев А. Е., Матвеев А. Н., Щерблюк Н. Г., Манн Ф., Янсен С., Милкерт Д.** Межлабораторные сличения национальных эталонов в области гидроакустических измерений в частотном диапазоне 3–500 кГц // Измерительная техника. 2016. № 1. С. 69–71.
7. **Hayman G., Robinson St., Lepper P.** Methodologies for the calibration and characterization of autonomous underwater recorders// 40th Anniversary Conf. Institute of Acoustics, Birmingham, UK, 15 October, 2014.
8. **Исаев А. Е., Матвеев А. Н., Некрич Г. С., Поликарпов А. М.** Градуировка приемника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ сигнала // Акустический журнал. 2013. Т. 59. № 6. С. 773–781.
9. **Исаев А. Е., Николаенко А. С.** Лабораторная калибровка гидроакустического приёмника по полю на низких частотах // Измерительная техника. 2018. № 1. С. 54–59.

Дата принятия: 09.06.2017.