

Определение фазочастотной характеристики гидрофона по амплитудно-частотной характеристике

Александр Евгеньевич Исаев^{1✉}, Булат Ильгизович Хатамтаев²

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹isaev@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-0718-5234>

²bulat_3004@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена одна из задач пилотных сличений КОOMET 786/RU/19 – проверка корректности предложенной во ВНИИФТРИ модели гидрофона, состоящей из линии опережения и минимально-фазовой части. Модель учитывает влияние дифракции звука и резонансные свойства активного элемента и позволяет использовать преобразование Гильберта для получения фазочастотной характеристики по амплитудно-частотной характеристике, а также для обратной операции. Представлены результаты измерительных экспериментов, выполненных на установках Государственного первичного эталона единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017. Показано, что для многих практических задач не требуется получать фазочастотную характеристику относительно акустического центра приёмника и достаточно значительно менее трудоёмкими способами определять форму фазочастотной характеристики.

Ключевые слова: комплексная чувствительность гидрофона по свободному полю, фазовая калибровка гидрофона, линия опережения, минимально-фазовая частотная характеристика, преобразование Гильберта

Для цитирования: Исаев А. Е., Хатамтаев Б. И. Определение фазочастотной характеристики гидрофона по амплитудно-частотной характеристике // Измерительная техника. 2021. № 7. С. 48–53. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-48-53>

Determination of the hydrophone phase-frequency response by its amplitude-frequency response

Alexander E. Isaev^{1✉}, Bulat I. Khatamtaev²

^{1, 2} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI), Mendeleev, Moscow Region, Russia

¹isaev@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-0718-5234>

²bulat_3004@mail.ru

Abstract. One of the tasks of the COOMET 786/RU/19 pilot comparisons is to check the correctness of the hydrophone model proposed in VNIIFTRI, consisting of an advance line and a minimum-phase part, including the effect of sound diffraction and resonance properties of the active element. This model makes it possible to use the Hilbert transform to obtain the phase-frequency response from the amplitude-frequency response as well as for inverse operation. The results of measuring experiments performed using facilities of the State Primary Standard GET 55-2017 are presented. For many practical tasks, it is not necessary to obtain the phase-frequency response for an acoustic center of the receiver. It is enough to determine the shape of the phase-frequency response using much less laborious methods. The question of which of the characteristics is expedient to determine during calibration – for an acoustic center, or for a point on the surface of an active element, deserves a discussion among specialists performing acoustic measurements.

Keywords: hydrophone free-field complex frequency response, hydrophone phase calibration, advance line, minimum-phase frequency response, Hilbert transform

Введение. Международные пилотные сличения КОOMET 786/RU/19, участником которых является ВНИИФТРИ, начаты в 2020 г., завершить сличения планируется в 2022 г. В рамках этих сличений предусмотрены измерения амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик чувствительности опорных гидрофонов (далее – АЧХ и ФЧХ гидрофонов соответственно). Это позволит участникам сличений подтвердить корректность методик, применяемых для амплитудно-фазовых

калибровок гидрофонов по полю, а также сравнить бюджеты неопределённостей результатов измерений АЧХ и ФЧХ. Сопоставление бюджетов неопределённостей измерений двух разнородных величин предоставит дополнительные возможности, поскольку эти бюджеты содержат как общие, так и различающиеся составляющие.

В последней редакции стандарта МЭК 60500-2017 «Гидроакустика. Гидрофоны. Свойства гидрофонов в полосе

частот от 1 Гц до 500 кГц» дано определение комплексной чувствительности в свободном поле. Так же, как и традиционно измеряемая чувствительность гидрофона, комплексная чувствительность определена для опорного центра гидрофона, заданных частоты и направления падения плоской звуковой волны в невозмущённом свободном поле (в отсутствие гидрофона). Модуль этой величины $|\dot{M}_r(f)| = M_r(f)$ – традиционно измеряемая чувствительность, её зависимость от частоты – АЧХ гидрофона. Аргумент $\varphi_r(f) = \arg(\dot{M}_r(f))$ – фазовый угол комплексной чувствительности – разность фаз между напряжением холостого хода на выходе кабеля гидрофона и звуковым давлением в точке расположения опорного центра гидрофона.

Исходя из практических соображений это определение применимо к измерениям гармонических сигналов. Заметим, что в определении комплексной чувствительности фазовый угол является аргументом комплексной чувствительности, т. е. для его нахождения не обязательно измерять разность фаз, используя гармонические сигналы.

Цель настоящей работы – предложить способ получения по АЧХ гидрофона его ФЧХ как частотной зависимости аргумента комплексной чувствительности гидрофона, при этом справедлива и обратная операция.

Проблемы амплитудно-фазовой калибровки гидрофона. Процедура абсолютной комплексной калибровки гидрофона стандартизована (МЭК 60565-1(2020) «Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка гидрофонов. Часть 1. Процедуры калибровки гидрофонов по свободному полю») и основана на методе взаимности. АЧХ и ФЧХ гидрофона получают одновременно в результате совокупных измерений с использованием трёх преобразователей. В процессе измерений определяют расстояния между преобразователями. В современных эталонах погрешность расстояния между преобразователями не входит в число преобладающих составляющих бюджета неопределённостей измерения АЧХ чувствительности. При измерениях ФЧХ погрешность измерения расстояния становится доминирующей, а для вычисления фазовых набегов звуковой волны необходимо точно определять скорость звука.

Для уменьшения методической погрешности фазовой калибровки преобразователи располагают по схеме Люкера-Ван Бюрена [1, 2]. Недостаток такого размещения – необходимость поворачивать калибруемый гидрофон на 180°. Чтобы при развороте акустический центр гидрофона не смещался относительно исходного положения, центр должен лежать на оси вращения. Калибруемый гидрофон обычно закрепляют на штанге, длина которой обусловлена глубиной погружения гидрофона. Вследствие смещений штанги при её развороте относительно оси вращения исходное расположение преобразователей нарушается. В результате фазовый угол чувствительности получают не для опорного центра гидрофона, а для некоторой неподвижной точки, лежащей на пересечении прямой, вдоль которой расположены преобразователи, и оси вращения. Для уменьшения влияния этого недостатка положение калибруемого гидрофона юстируют по лучу лазера с помощью

прецизионной 3D-системы позиционирования [1, 2]. Помимо того, что такой подход существенно усложняет процедуру калибровки, его невозможно применить в бассейне с оптически непрозрачными стенками. Отметим также, что юстировка положения калибруемого гидрофона не гарантирует точного результата, если не совпадают акустический и геометрический центры гидрофона, например, из-за технологических причин [1, 2]. Смещение положения акустического центра от опорной точки на 1 мм приводит к частотно-зависимой погрешности измеренной ФЧХ порядка 18° на частоте 150 кГц.

Для существенного уменьшения разброса результатов и его зависимости от частоты специалистами ВНИИФТРИ предложены связанные с условиями эксперимента способы определения положения геометрического центра акустическим методом (с учётом поправок на размеры активных элементов излучателя и приёмника) и получения фазового угла чувствительности для акустического центра гидрофона либо смещения акустического центра относительно неподвижной опорной точки [3]. Однако данные способы значительно усложняют как саму процедуру калибровки, так и возможность её автоматизации. 3D-позиционирование по лучам лазера чувствительно к малейшим толчкам и вибрациям и, по сути, осуществляется «на глаз». Комплексная калибровка гидрофона трудоёмка, в значительно меньшей степени отработана в методическом плане по сравнению с калибровкой традиционной, в силу чего её результаты в значительной мере зависят от искусства экспериментатора. Перечисленные причины побуждают искать новые подходы к получению ФЧХ гидрофона. Для этого целесообразно уточнить понятие комплексной чувствительности гидрофона применительно к решаемой задаче измерений.

Минимально-фазовая модель сферического гидрофона. Типовая модель сферического гидрофона представляет собой совокупность уравнений, описывающих поведение RLC-колебательных контуров и дифракцию звука на активном элементе [4]. Уравнение дифракции описывает уменьшение амплитуды при возрастании частоты и соответствующую этому уменьшению задержку по фазе среднего звукового давления на поверхности гидрофона относительно амплитуды и фазы звукового давления в свободном поле (т. е. в отсутствие гидрофона) в месте расположения опорной точки гидрофона. В теории электрических цепей подобные зависимости характерны для фильтра нижних частот.

Например, дифракцию звука на сферическом активном элементе описывают комплексной функцией [5]:

$$D_{\text{сф}}(f) = \frac{1}{\sqrt{1+(ka)^2}} \exp[-jatg(ka)], \quad (1)$$

где a – радиус сферы, $k=2\pi f/c$ – волновое число; c – скорость звука.

Выражение (1) в виде комплексной дробно-рациональной функции имеет единственный действительный полюс, расположенный слева от нуля на комплексной плоскости. Следовательно, функцию дифракции (1) можно рассматривать

как комплексную передаточную функцию линейной системы, которую в теории линейных систем принято называть минимально-фазовой системой [6]. Передаточная функция системы из колебательных RLC -контуров не имеет нулей и полюсов в правой части комплексной плоскости и также относится к классу линейных минимально-фазовых систем.

Обычно минимально-фазовую модель применяют для описания систем с сосредоточенными параметрами. В методе взаимности гидрофон также представляют точкой, совпадающей с его акустическим центром. Условия, при котором такое представление допустимо, называют дальним полем, когда размер гидрофона много меньше радиуса падающей на него сферической волны. Такое представление основано на уменьшении звукового давления обратно пропорционально радиусу сферической волны и используется для определения АЧХ гидрофона.

Поскольку гидрофон имеет физический размер, его реакция опережает момент прихода звуковой волны в точку расположения центра сферы. ФЧХ гидрофона получает дополнительную составляющую, равную набегу фазы при распространении звуковой волны на расстояние, равное радиусу a гидрофона. Эффект, порождающий эту составляющую ФЧХ, по аналогии с используемым в радиотехнике термином «линия задержки», будем называть линией опережения. Формально, такое опережение реакцией вызвавшего её воздействия противоречит принципу казуальности, который является одним из неперенных условий минимально-фазовости системы [6]. В то же время линия опережения, как и идеальная линия задержки, не искажает форму принимаемого сигнала, а вызывает лишь его смещение по времени. Это обстоятельство позволяет использовать модель, состоящую из двух частей: минимально-фазовой части (дифракция на сфере и набор колебательных контуров) и линии опережения. Введение линии опережения не изменяет АЧХ гидрофона $M_r(f)$, в то время как ФЧХ гидрофона $\varphi_r(f)$ представляют суммой фазового набега на линии опережения ka и ФЧХ минимально-фазовой части модели $\tilde{\varphi}_r(f)$. Чтобы отличать $\tilde{\varphi}_r(f)$ от ФЧХ гидрофона $\varphi_r(f) = \tilde{\varphi}_r(f) + ka$, будем

называть $\tilde{\varphi}_r(f)$ минимально-фазовой частотной характеристикой (МФЧХ).

Применение математического аппарата преобразования Гильберта. Использование предложенной модели позволяет применить при определении МФЧХ гидрофона свойство минимально-фазовой системы: ФЧХ и АЧХ минимально-фазовой системы связаны через преобразование Гильберта $\mathcal{H}(\cdot)$.

Преобразование Гильберта натурального логарифма АЧХ гидрофона, заданной с точностью до постоянного множителя, даёт МФЧХ:

$$\tilde{\varphi}_r(f) = \mathcal{H}\{\ln[G_r(f)]\},$$

где $G_r(f) \sim M_r(f)$.

Экспонента с преобразованием Гильберта МФЧХ в показателе степени является АЧХ гидрофона с точностью до коэффициента пропорциональности:

$$\exp\{\mathcal{H}[\tilde{\varphi}_r(f)]\} \sim M_r(f).$$

Задание АЧХ гидрофона с точностью до постоянного множителя означает, что для получения МФЧХ не требуется знать частотную характеристику чувствительности гидрофона в силу её избыточности. Достаточно использовать зависимость, которая повторяет поведение АЧХ с точностью до коэффициента пропорциональности. Такую зависимость можно получить, например, исключив расстояния между преобразователями в формуле чувствительности гидрофона, определяемой методом взаимности.

Преобразование Гильберта позволяет получить точное теоретическое решение для зависимостей, определённых на бесконечном интервале, в то время как АЧХ и ФЧХ измеряют в ограниченном диапазоне частот. В связи с этим важно знать, насколько это ограничение может влиять на результаты обработки частотных зависимостей.

В общем случае, чем шире частотный диапазон экспериментальных АЧХ и ФЧХ, тем точнее должен быть результат преобразования Гильберта. Гидрофон не является приёмником статического давления и его чувствительность на самых низких частотах мала. Чувствительность гидрофона будет также мала на частотах, значительно превышающих верхнюю границу его диапазона. И в том и другом случае на результаты измерений повлияет шумовая помеха. Поэтому частотные характеристики необходимо измерять в таком диапазоне частот, чтобы можно было надёжно экстраполировать характеристики за его пределы. В сторону низких частот зависимость экстраполируют до нуля герц. На рис. 1 (кривая 1) приведена АЧХ гидрофона TC4033 (Teledyne RESON A/S, Дания) со сферическим активным элементом, измеренная на установке Государственного первичного эталона единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017 и экстраполированная на низкие частоты. Участок частотной зависимости выше резонансной частоты также необходим для надёжной экстраполяции данных.

На рис. 2 изображены экспериментально измеренная ФЧХ (кривая 1) и расчётные ФЧХ (кривые 2–4), найденные суммированием фазового набега на «линии опережения» и минимально-фазовой частотной зависимости, которая получена из экспериментальной АЧХ преобразованием Гильберта.

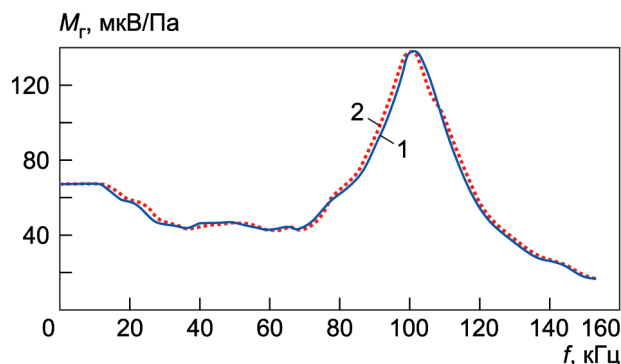


Рис. 1. Экспериментальная (1) и расчётная (2) амплитудно-частотные характеристики гидрофона TC4033

Fig. 1. Amplitude-frequency characteristics of the hydrophone TC4033, experimental (1), calculated (2)

При резонансной частоте гидрофона 100 кГц диапазона АЧХ 0–150 кГц должно быть вполне достаточно для получения ФЧХ. Однако, если к АЧХ в указанном диапазоне применить преобразование Гильберта, то расчётная ФЧХ (см. рис. 2, кривая 2) будет сильно отклоняться от экспериментальной. Для получения приемлемых результатов обработки следует экстраполировать АЧХ на высокие частоты. Более того, обрабатываемая зависимость не должна содержать разрывов и резких изломов. Примером такого излома служит поведение АЧХ вблизи нуля оси частот. В результате экстраполяции АЧХ на высокие частоты отклонения расчётной ФЧХ (см. рис. 2, кривая 3) от экспериментальной существенно уменьшились. Зависимости, представленные на рис. 2 кривыми 1, 3, схожи по характеру, но различаются по наклону. Если различие в наклонах устранить внесением в кривую 3 дополнительного, пропорционального частоте фазового набега (кривая 5), то получим кривую 4, которая практически совпадает с кривой 1. Аналогичный результат можно получить, если перед обработкой экстраполировать данные на более высокие частоты. Расчётная АЧХ (см. рис. 1, кривая 2), полученная из МФЧХ операцией $\exp\{\mathcal{H}[\tilde{\varphi}_r(f)]\}$, практически повторяет экспериментальную АЧХ.

Причина различий наклонов экспериментальной и расчётной ФЧХ состоит в способе экстраполяции в сторону высоких частот экспериментальной АЧХ при её подготовке к обработке преобразованием Гильберта. Чем ближе обрабатываемая АЧХ к реальной АЧХ гидрофона на участке экстраполяции, тем меньше разница наклонов экспериментальной и расчётной ФЧХ. Рассмотрим этот факт более подробно.

Для уменьшения различия наклонов расчётной и реальной ФЧХ требуется привлекать экспериментальные данные о поведении АЧХ гидрофона на всё более и более высоких частотах. Однако полностью устранить различие наклонов не удаётся. С одной стороны, диапазон измерений по частоте всегда ограничен, с другой стороны – экстраполяция в область высоких частот требует надёжных экспериментальных данных, в то время как при увеличении частоты они всё более отягощены шумовой помехой.

Точно восстановить наклон ФЧХ важно, например, при сличениях результатов фазовых калибровок, когда сравнивают значения ФЧХ. Если при расчёте фазового набега на линии опережения принять радиус a равным нулю, то ФЧХ изменит свой наклон и в рамках предложенной модели будет соответствовать МФЧХ, т. е. ФЧХ точечного приёмника на поверхности активного элемента гидрофона. Таким образом, точка приёма окажется не в акустическом центре, а на поверхности активного элемента гидрофона. Если варьировать радиус a , то точка приёма будет смещаться в ту или иную сторону по оси «излучатель – приёмник», при этом не изменятся свойства гидрофона и описывающие их поведение ФЧХ. Это относится к любому пропорциональному частоте фазовому набегу, включая набег, обусловленный способом экстраполяции экспериментальной зависимости. Для задач обработки сдвиг сигнала по оси времени идентичен сдвигу точки приёма и его можно

не учитывать, если важна форма сигнала, а не его задержка. Это же относится к ситуации, когда необходимо оценить свойства гидрофона.

Заметим, что недостаточная подробность подвергаемых преобразованию Гильберта экспериментальных данных также ухудшает результат. При подготовке экспериментальных данных к обработке возникает вопрос о выборе

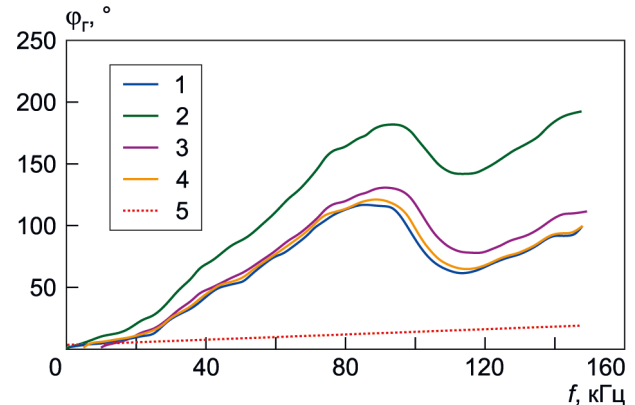


Рис. 2. Экспериментальная (1) и расчётные (2–4) фазочастотные характеристики гидрофона TC4033

Fig. 2. Phase-frequency characteristics of the TC4033 hydrophone, experimental (1), calculated (2–4)

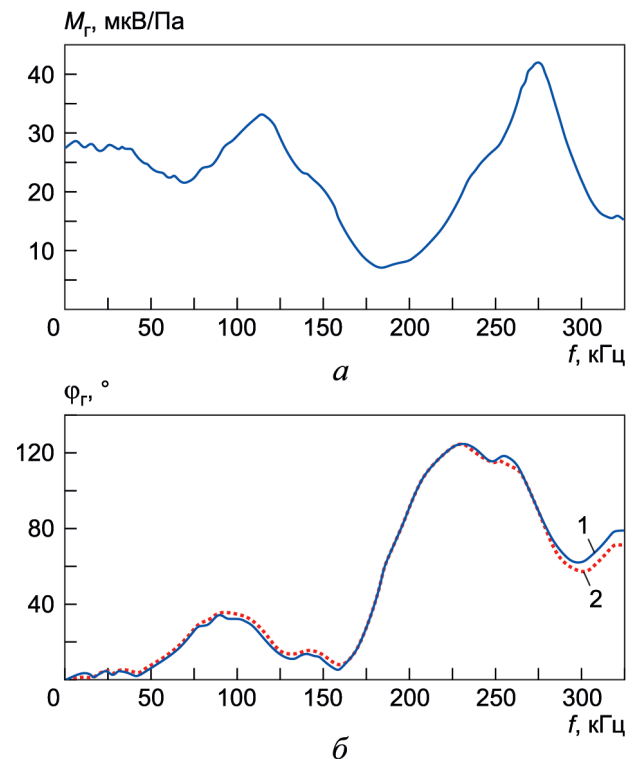


Рис. 3. Амплитудно-частотная (а), экспериментальная (1) и расчётная (2) фазочастотные (б) характеристики гидрофона B&K 8103

Fig. 3. Amplitude-frequency characteristic (a), experimental (1) and calculated (2) phase-frequency characteristics (b) of the hydrophone B&K 8103

критерия необходимой подробности. Для ответа на этот вопрос рационален следующий подход. Преобразование Гильберта можно рассматривать как обратное преобразование Фурье сдвинутого по фазе на $\pi/2$ спектра прямого преобразования Фурье, а обрабатываемые зависимости (АЧХ и ФЧХ) – как сигналы, подвергаемые преобразованию Фурье. При таком подходе степень подробности будет определяться крутизной изломов, наклонов и перегибов экспериментальной зависимости. Чем больше крутизна наклонов, тем выше должна быть частота Найквиста для получения спектра этой зависимости и, соответственно, тем подробнее должна быть измерена экспериментальная зависимость. Противоположная ситуация возникает при непрерывном излучении сигналов с распределённой в полосе частот мощностью [7]. Избыточную подробность полученных данных устраняют прореживанием.

С целью проверки корректности предлагаемой модели для гидрофонов с цилиндрическим активным элементом выполнена комплексная калибровка гидрофона B&K 8103 (Briel & Kjaer, Дания). В качестве опорной принята точка на оси симметрии активного элемента на половине его высоты. На рис. 3 приведены экспериментальная АЧХ, а также экспериментальная (кривая 1) и расчётная (кривая 2) ФЧХ гидрофона. Отклонения кривой 2 от кривой 1 не превышают $2,5^\circ$ на частотах ниже 250 кГц, возрастают до 7° с увеличением частоты от 250 кГц до 350 кГц, что свидетельствует о корректности предложенной модели для гидрофона с активным элементом, отличным от сферического.

Частотные зависимости среднего квадратического отклонения (СКО) прямых измерений ФЧХ продемонстрировали увеличение разброса результатов прямых измерений с увеличением частоты как для гидрофона TC 4033, так и для гидрофона B&K 8103. Это можно объяснить влиянием погрешности юстировки опорных точек гидрофонов. Для СКО расчётных ФЧХ обоих гидрофонов такое увеличение отсутствует, что свидетельствует об устойчивости к погрешностям юстировки положений гидрофона как результатов измерений АЧХ, так и полученных по ним ФЧХ. Таким образом, уменьшение СКО при расчёте ФЧХ по АЧХ позволит облегчить задачу контроля ФЧХ при подборе преобразователей антенной решётки.

Эксперименты по оценке и сопоставлению частотных зависимостей СКО были выполнены на частотах 0–160 и 0–300 кГц для гидрофонов TC 4033 и B&K 8103 соответственно. Однако можно предположить, что отмеченные тенденции в характере зависимостей сохраняются и на более высоких частотах. Следовательно, когда прямые измерения ФЧХ либо невозможны, либо отягощены большой погрешностью, ФЧХ может быть получена расчётом по АЧХ. Примеры такой ситуации – фазовая калибровка точечного, мембранного и игольчатого гидрофонов на мегагерцевых частотах [8–10].

Заключение. Предложенный подход к получению ФЧХ гидрофона, основанный на использовании свойств минимально-фазовой системы, а также представление гидрофона моделью в виде линии опережения и минимально-фазовой

части позволяют получать ФЧХ значительно менее трудоёмким способом, чем прямые измерения – по АЧХ путём преобразования Гильберта. Погрешность измерения расстояния между опорными центрами излучателя и приёмника входит в число доминирующих составляющих погрешности прямых измерений ФЧХ, однако не оказывает влияния при получении ФЧХ по АЧХ. Лучший способ отработать предложенный способ получения ФЧХ – пилотные сличения KOOMET 786/RU/19, на которых одновременно и с наивысшей точностью будут измерять ФЧХ и АЧХ опорных гидрофонов.

Практический интерес представляют исследования применимости предложенной модели гидрофона к приёмникам со значительным влиянием рассеяния звука элементами конструкции, излучателям, приёмникам векторных величин звукового поля, гидрофонам с плоским активным элементом, микрофонам. Для многих практических задач нет необходимости получать ФЧХ относительно акустического центра приёмника, а достаточно определять форму ФЧХ. Вопрос о том, какую из характеристик целесообразно определять при калибровке – ФЧХ для акустического центра, либо МФЧХ для точки на поверхности активного элемента, заслуживает обсуждения в кругу специалистов, выполняющих акустические измерения.

Список литературы

1. Hayman G., Robinson S., Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method, *Proceeding 11th Europ. Conf. on Underwater Acoustics*, Edinburgh, 2012, pp. 1437–1444.
2. Hayman G., Wang Y., Robinson S. P., A comparison of two methods for phase response calibration of hydrophones in the frequency range 10–400 kHz, *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, vol. 133 (2), pp. 750–759.
3. Исаев А. Е., Матвеев А. Н., Поликарпов А. М., Щерблюк Н. Г. Измерение фазочастотной характеристики чувствительности гидрофона по полю методом взаимности // *Измерительная техника*. 2013. № 6. С. 56–58.
4. Справочник по гидроакустике. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. А. Е. Колесникова. Л.: Судостроение, 1988.
5. Лепендин Л. Ф. Акустика: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1978. 448 с.
6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров. Изд 12-е, испр. и доп. М.: Юрайт, 2014. 701 с.
7. Исаев А. Е., Матвеев А. Н. Два подхода к градуировке гидрофона по полю при непрерывном излучении в незаглушенном бассейне // *Измерительная техника*. 2008. № 12. С. 47–51.
8. Harris G. R., Time-delay spectrometry measurement of magnitude and phase of hydrophone response, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2011, vol. 58 (11), pp. 2325–2333.
9. Cooling M. P., Humphrey V. F., A nonlinear propagation model-based phase calibration technique for membrane hydrophones, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2008, vol. 55, pp. 84–93.
10. Umchid S., Gopinath R., Srinivasan K., Lewin P. A., Daryoush A. S., Bansal L., El-Sherif M., Development of calibration

techniques for ultrasonic hydrophone probes in the frequency range from 1 to 100 MHz, *Ultrasonics*, 2009, vol. 49, pp. 306–311.

Reference

1. Hayman G., Robinson S., Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method, *Proceeding 11th Europ. Conf. on Underwater Acoustics*, Edinburgh, 2012, pp. 1437–1444.
2. Hayman G., Wang Y., Robinson S. P., A comparison of two methods for phase response calibration of hydrophones in the frequency range 10–400 kHz, *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, vol. 133 (2), pp. 750–759.
3. Isaev A. E., Matveev A. N., Polikarpov A. M., Shcherblyuk N. G., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 706–711. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0269-z>
4. *Spravochnik po gidroakustike*, 2nd ed., ed. by A. E. Kolesnikova Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988. (In Russ.)
5. Lependin L. F., *Acoustics: training manual for knots*, Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978, 448 p. (In Russ.)

6. Bessonov L. A., *Teoreticheskie osnovy ehlektrotekhniki. Ehlektricheskie tsepi: uchebnik dlya bakalavrov*, 12th ed., corrected and additional, Moscow, Yurite Publ., 2014, 701 p. (In Russ.)

7. Isaev A. E., Matveev A. N., *Measurement Techniques*, 2008, vol. 51, no. 12, pp. 1329–1336.

<https://doi.org/10.1007/s11018-009-9211-9>

8. Harris G. R., Time-delay spectrometry measurement of magnitude and phase of hydrophone response, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2011, vol. 58 (11), pp. 2325–2333.

9. Cooling M. P., Humphrey V. F., A nonlinear propagation model-based phase calibration technique for membrane hydrophones, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2008, vol. 55, pp. 84–93.

10. Umchid S., Gopinath R., Srinivasan K., Lewin P. A., Daryoush A. S., Bansal L., El-Sherif M., Development of calibration techniques for ultrasonic hydrophone probes in the frequency range from 1 to 100 MHz, *Ultrasonics*, 2009, vol. 49, pp. 306–311.

Статья поступила в редакцию 11.03.2021; принята к публикации 01.06.2021.