534.6

Измерение фазочастотной характеристики чувствительности гидрофона по полю методом взаимности

А. Е. ИСАЕВ, А. Н. МАТВЕЕВ, А. М. ПОЛИКАРПОВ, Н. Г. ЩЕРБЛЮК

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

Рассмотрены новые решения по фазовой градуировке гидрофона методом взаимности. Описаны реализации метода, позволяющие измерять фазовый угол чувствительности для геометрического и акустического центров гидрофона и определять положение акустического центра по его смещению относительно геометрического. Приведены результаты экспериментальной проверки рассмотренных методов.

Ключевые слова: *акустический приемник, метод взаимности, фазовый угол чувствительности, геометрический и акустический центры.*

Some new approaches for hydrophone phase calibration by the reciprocity method are considered. The realizations of the reciprocity method allowing to measure the phase angle of sensitivity for geometric and acoustic centers of the hydrophone and to determine the location of the hydrophone acoustic center by its shift relative to the hydrophone geometric center are described. The results of experimental validation of considered methods are shown.

Key words: *acoustic receiver, reciprocity method, phase angle of sensitivity, geometric and acoustic centers.*

Бурное развитие гидроакустических технологий выдвигает на первый план проблемы измерений фазочастотной характеристики (ФЧХ) гидроакустических преобразователей. Измерение ФЧХ гидрофона включено в [1]. Национальные эталоны стран, лидирующих в области гидроакустических измерений, обеспечивают возможности либо фазовой, либо комплексной градуировки акустических преобразователей и подтверждают эти возможности международными сличениями [2]. В последнее время во ВНИИФТРИ прилагают усилия, направленные на решение проблемы фазовой градуировки гидроакустических приемников на уровне первичного эталона. Создание такого эталона требует использования абсолютных методов фазовой градуировки. Однако целесообразнее применять методы, изложенные в [3], что обеспечивает сопоставимость результатов и возможность подтверждения международными сличениями метрологических характеристик будущего эталона. В [3] ФЧХ гидроакустического приемника называют частотную зависимость аргумента (фазового угла) его комплексной чувствительности.

Фазовая калибровка гидрофона по свободному полю методом взаимности. Фазовый угол чувствительности гидрофона по свободному полю (на данной частоте для плоской синусоидальной бегущей звуковой волны, падающей на гидрофон с определенного направления) есть разность фаз между напряжением холостого хода гидрофона и звуковым давлением в точке расположения его акустического центра до помещения гидрофона в звуковое поле. Аналитически фазовый угол чувствительности представляют в виде фазового множителя (аргумента) $\arg\left(\dot{M}_H\right)$ в записи комплексной чувствительности гидрофона по свободному полю $\dot{M}_H = \mathrm{mod}\left(\dot{M}_H\right)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\arg\left(\dot{M}_H\right)}$. Его можно определить методом взаимности, если, в отличие от традиционного измерения модулей передаточных импедансов пар излучатель—приемник, в стандартную процедуру градуировки гидрофона добавить измерение фазовых углов. Из формулы вычисления комплексной чувствительности гидрофона при градуировке методом взаимности [3] нетрудно получить выражение для фазового угла чувствительности

$$\arg\left(\dot{M}_H\right) = 0{,}5\left[\varphi_{PH} + \varphi_{TH} - \varphi_{PT} + k\left(d_{PH} + d_{TH} - d_{PT}\right)\right] - \pi/4, \quad (1)$$

где $\varphi_{PH} = \arg\left(\dot{Z}_{PH}\right)$, $\varphi_{TH} = \arg\left(\dot{Z}_{TH}\right)$, $\varphi_{PT} = \arg\left(\dot{Z}_{PT}\right)$ — фазовые углы комплексных передаточных импедансов пар излучатель—гидрофон $\dot{Z}_{PH}$, обратимый преобразователь—гидрофон $\dot{Z}_{TH}$ и излучатель—обратимый преобразователь $\dot{Z}_{PT}$; kd_{PH}, kd_{TH}, kd_{PT} — фазовые набеги звуковой волны при ее распространении от излучателя к приемнику [2]; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны; d_{PH}, d_{TH}, d_{PT} — расстояния между акустическими центрами излучателя и приемника.

Фазовый угол комплексного передаточного импеданса получают как разность фаз между напряжением на выходе приемника и током излучателя, измеряя только электрические величины. При измерениях разности фаз трудностей принципиального характера не возникает. В случае вычисления фазовых набегов звуковой волны необходимо точно определить скорость звука, кроме того, неизбежно возникает проблема точного измерения расстояний между акустическими центрами гидрофона, обратимого преобразователя и излучателя, поскольку преобразователи представляют собой физические тела определенных размеров и формы, а не геометрические точки.

Метод неподвижной опорной точки. В литературе описан ряд методов, позволяющих уменьшить методическую

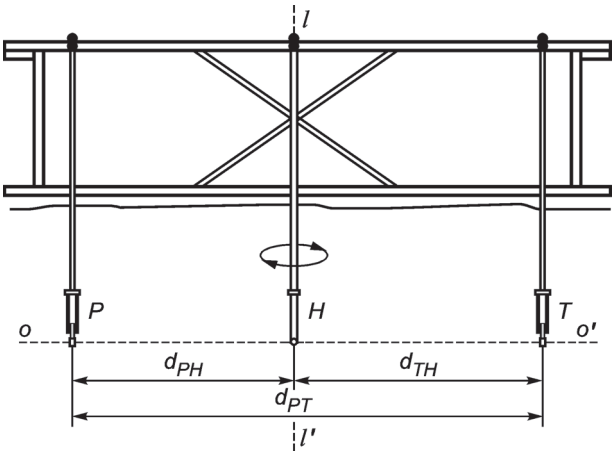

Рис. 1. Расположение преобразователей по схеме Люкера—Ван Бюрена

погрешность фазовой градуировки гидрофона. В частности, метод Люкера — Ван Бюрена [2, 3] позволяет преодолеть проблемы, связанные с необходимостью точно измерять скорость звука и расстояния между акустическими центрами преобразователей. При этом излучатель, гидрофон и обратимый преобразователь должны находиться на одной прямой так, чтобы гидрофон был между излучателем и обратимым преобразователем. Такое расположение (рис. 1) гарантирует выполнение условия: сумма расстояний между акустическими центрами пар излучатель — гидрофон и обратимый преобразователь — гидрофон равна расстоянию для пары излучатель — обратимый преобразователь, выражаемого равенством $d_{PH} + d_{TH} - d_{PT} = 0$. При этом формула (1) упрощается:

$$\arg\left(\dot{M}_H\right) = 0{,}5\left[\varphi_{PH} + \varphi_{TH} - \varphi_{PT}\right] - \pi/4, \qquad (2)$$

поскольку расстояния между акустическими центрами и скорость звука не входят явно в правую часть (2).

Заметим, что само по себе применение схемы Люкера — Ван Бюрена не гарантирует измерение фазового угла чувствительности для акустического центра гидрофона. Причина этого в том, что градуировка методом взаимности предполагает обязательное ориентирование градуируемого гидрофона на обратимый преобразователь при измерениях φ_{TH} и на излучатель при измерениях φ_{PH}, что требует разворота гидрофона на 180° (указанный разворот на рис. 1 показан круговой стрелкой). Для точного измерения фазового угла необходимо, чтобы акустический центр лежал на оси его подвеса (оси вращения) и не смещался относительно исходного положения при развороте гидрофона. В противном случае фазовый угол чувствительности будет определен не для акустического центра, а для некоторой опорной точки пересечения оси вращения гидрофона с прямой расположения преобразователей (см. рис. 1, оси $l - l'$ и $o - o'$), т. е. такой точки, положение которой остается неизменным при развороте гидрофона.

Примером удачной реализации измерений с использованием схемы Люкера — Ван Бюрена в предположении, что акустический центр градуируемого приемника совпадает с его геометрическим центром, является эталонная установка Национальной физической лаборатории Великобритании (НФЛ) [2]. Неизменность положения геометрического центра градуируемого гидрофона обеспечивают при помощи луча лазера и системы позиционирования с малым шагом перемещения.

В более общем виде этот подход был применен в свое время во ВНИИФТРИ и получил название метода неподвижной опорной точки. При развороте приемника обеспечивали неподвижность опорной точки, расположенной вне приемника, что в последующем гарантировало точность сборки многоэлементной приемной системы. Используя схему на рис. 1, получали фазовый угол для опорной точки, которая лежала вне приемника, но положение которой одинаково для всех элементов приемной системы.

Альтернативой методу неподвижной опорной точки может стать описываемый ниже метод фазовой градуировки акустических приемников [3], в котором также применяется схема Люкера — Ван Бюрена.

Фазовая градуировка для акустического центра гидрофона. Замечательная особенность метода взаимности заключается в том, что для широкого класса акустических приемников он позволяет измерять фазовые углы чувствительности для акустического центра приемника без привлечения информации о расстоянии между ним и акустическим центром излучателя. Требование измерять это расстояние предполагает, как минимум, наличие акустического центра у каждого преобразователя. Говоря об акустическом центре, обычно не упоминают, что при градуировке акустические сигналы излучают и принимают только в опорном направлении. Ужесточим требование к градуируемому гидрофону, наложив следующее ограничение: положение акустического центра градуируемого гидрофона относительно его геометрического центра остается неизменным при изменении направления приема с опорного на противоположное.

На первый взгляд, это ограничение абсурдно, поскольку сферический волновой фронт при излучении и сферическая характеристика направленности при приеме, используемые в определении акустического центра, подразумевают все направления излучения и приема. При измерениях сферичность волны важна только в окрестности приемника. Например, к конденсаторному микрофону и электродинамическому излучателю применимо понятие акустического центра, но они не удовлетворяют наложенному ограничению в силу своих конструктивных особенностей. В то же время, данному ограничению удовлетворяет широкий класс гидроакустических преобразователей с симметричным активным элементом: приемники векторных величин акустического поля (колебательной скорости, градиента звукового давления и т. д.), измерительные гидрофоны со сферическим — монопольного типа и цилиндрическим — дипольного типа (в опорном направлении, ортогональном оси симметрии цилиндра) активными элементами.

При использовании временной селекции тонального импульса процедура фазовой градуировки методом взаимности для акустического центра гидрофона состоит в следующем. Измерив разность фаз между выходным напряжением гидрофона $\dot{u}_{PH}(t)$ и током возбуждения излучателя $\dot{i}_P(t)$, получим фазовый угол передаточного импеданса φ_{PH}. Для измерения φ_{TH} градуируемый гидрофон необходимо повернуть на 180° (опорным направлением на обратимый преобразователь). Перед тем как повернуть гидрофон, запи-

сывают осциллограмму напряжения $\dot{u}_{PH}(t)$. Повернув гидрофон, вновь принимают сигнал излучателя и записывают его осциллограмму $\dot{u}'_{PH}(t)$. По этим осциллограммам оценивают изменение временной задержки между излучением и приемом сигнала при изменении направления приема гидрофоном. Это можно сделать, измерив либо временные задержки обеих осциллограмм, либо разность временных задержек по характерным точкам на осциллограммах или методами корреляционного анализа. Разберем две возможные ситуации.

Первая (тривиальная) ситуация — временная задержка не изменилась. Это говорит о том, что в результате разворота градуируемого гидрофона положение его акустического центра относительно излучателя и обратимого преобразователя не изменилось и равенство $d_{PT} = d_{PH} + d_{TH}$ сохранилось. При этом $d_{PH} + d_{TH} - d_{PT} = 0$ и при вычислениях по методу взаимности расстояния между акустическими центрами исключаются из формулы расчета фазового угла чувствительности. Но эти расстояния обязательно используются при вычислении модуля чувствительности. В рассмотренной ситуации погрешности, связанные с расстояниями между акустическими центрами, не влияют на погрешность измерений [2, 3].

Вторая ситуация — временная задержка изменилась на величину Δt. Это означает, что положение акустического центра изменилось в результате разворота. Тогда при расчете фазового угла чувствительности гидрофона вместо слагаемого $k(d_{PH} + d_{TH} - d_{PT})$ используют поправку на смещение акустического центра, равную $\omega\Delta t/2$:

$$\arg\left(\dot{M}_H\right) = 0{,}5\left[\varphi_{PH} + \varphi_{TH} - \varphi_{PT} + \omega\Delta t\right] - \pi/4.$$

Рассмотренный способ позволяет определять фазовый угол чувствительности для акустического центра градуируемого гидрофона без использования расстояний между акустическими центрами излучателя и приемника. Метод прост в реализации и не приводит к погрешностям измерений фазовой характеристики при несовпадении акустического и геометрического центров гидрофона. Следует иметь в виду, несмотря на то, что измеренный фазовый угол чувствительности гидрофона «привязан» к акустическому центру, положение его остается неизвестным, что является недостатком метода.

Определение положения акустического центра гидрофона. Указанный недостаток легко преодолеть, опираясь на установленное выше ограничение. Если при развороте гидрофона принять меры, исключающие смещение его геометрического центра, полученную временную задержку Δt можно использовать не только для расчета поправки к фазовому углу, но также для вычисления смещения Δd акустического центра гидрофона относительно его геометрического центра по формуле:

$$\Delta d = c\,\Delta t/2,$$

где c — скорость звука.

В соответствии с определением в Международном электротехническом словаре МЭК 50(801) акустический центр — это центр некоторой сферы, представляющей фронт звуковой волны. Однако при измерении координат акустического центра не строят сферу. В подавляющем большинстве случаев используют закон $1/r$, который позволяет найти положение этого центра на оси перемещения гидрофона относительно излучателя, т. е. на прямой расположения преобразователей. Заметим, что рассмотренный в статье способ дает значительно более точные результаты, но в отличие от использования закона $1/r$ не позволяет определять расстояние дальнего поля.

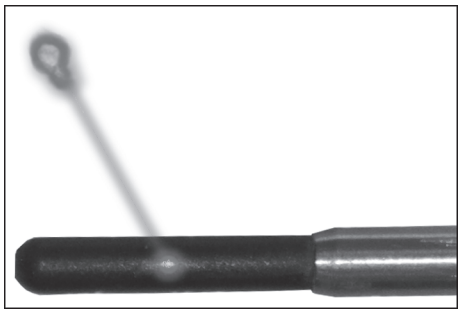

Рис. 2. Позиционирование геометрического центра гидрофона по лучу лазера

Результаты экспериментальных исследований метода. Изложенный метод фазовой градуировки изучали при градуировке гидрофона ТС4035 в отражающем бассейне в частотном диапазоне 160—500 кГц. Чтобы сопоставить измерения описываемым методом и методом неподвижной опорной точки, измерительную процедуру дополнили операциями, аналогичными описанным в [2], которые обеспечивали неподвижность геометрического центра гидрофона при развороте. Для этого перед разворотом луч лазера фокусировали на геометрический центр чувствительного элемента гидрофона. После разворота гидрофон смещали таким образом, чтобы луч лазера вновь оказался в центре чувствительного элемента, как это показано на рис. 2.

При градуировке последовательно излучали косинусоидальную (относительно начала излучения) $x(t) = \cos\omega_0 t$ и синусоидальную $\tilde{x}(t) = \sin\omega_0 t$ компоненты комплексного тонального сигнала $\dot{x}(t) = e^{j\omega_0 t}$, разделяя их реверберационной паузой. Для каждой составляющей $x(t)$ и $\tilde{x}(t)$ измеряли выходные напряжения приемника $u_{PH}(t)$, $\tilde{u}_{PH}(t)$ и токи излучателя $i_P(t)$, $\tilde{i}_P(t)$, которые рассматривали как компоненты комплексных выходного напряжения $\dot{u}_{PH}(t) = u_{PH}(t) + j\tilde{u}_{PH}(t)$ и тока излучателя $\dot{i}_P(t) = i_P(t) + j\tilde{i}_P(t)$. Комплексный передаточный импеданс пары излучатель — приемник $\dot{Z}_{PH}(\omega_0, t) = z_{PH}(\omega_0, t) + j\tilde{z}_{PH}(\omega_0, t)$ получали как отношение напряжения к току:

$$\dot{Z}_{PH}(\omega_0, t) = \dot{u}_{PH}(t)/\dot{i}_P(t).$$

Рассчитывали временные зависимости модуля $Z_{PH}(\omega_0, t) = \sqrt{\left[z_{PH}(\omega_0, t)\right]^2 + \left[\tilde{z}_{PH}(\omega_0, t)\right]^2}$ и фазового угла $\varphi_{PH}(\omega_0 t)$ =

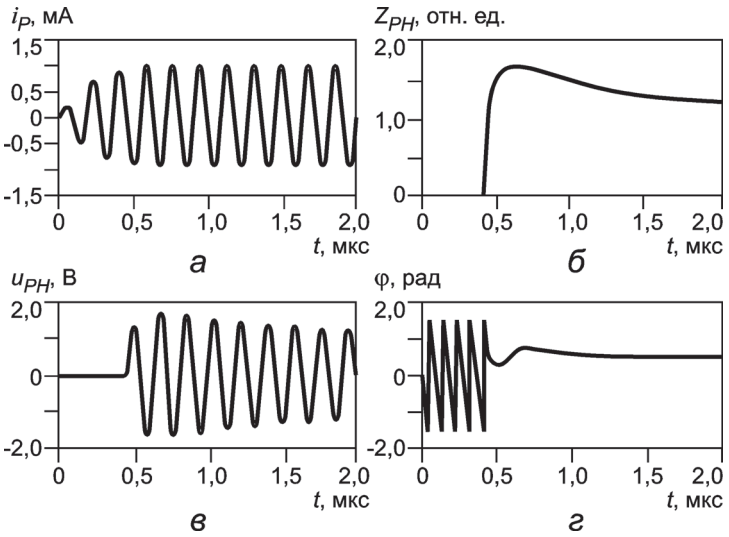

Рис. 3. Измеренные зависимости тока излучателя (*а*), напряжения приемника (*б*), модуля (*в*) и фазового угла (*г*) комплексного передаточного импеданса пары излучатель — приемник

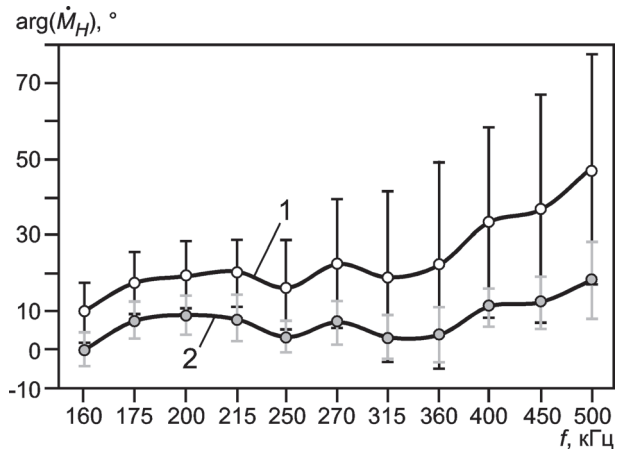

Рис. 4. Фазочастотные характеристики чувствительности гидрофона ТС4035 для геометрического (*1*) и акустического (*2*) центров

$=\mathrm{arctg}\left(\tilde{z}_{PH}(\omega_0, t)/z_{PH}(\omega_0, t)\right)$ передаточного импеданса, установившиеся во времени значения которых принимали за результат измерений. Процедура измерений комплексного передаточного импеданса $\dot{Z}_{PH}(\omega_0, t)$ проиллюстрирована на рис. 3.

На рис. 4 приведены результаты измерений фазового угла чувствительности гидрофона ТС4035 при различных расстояниях между преобразователями — усредненные по расстояниям значения фазовых углов для акустического и геометрического центров гидрофона. Кривая *1* представляет результаты, полученные при позиционировании геометрического центра гидрофона по лучу лазера (без учета поправки), кривая *2* — при использовании поправки на смещение акустического центра. Для каждой кривой показаны границы неопределенности (при коэффициенте охвата $k = 2$) результатов измерений. При исследовании бюджета неопределенностей было установлено, что составляющие, связанные с измерениями электрических сигналов, несущественны по отношению к общей неопределенности измерений, основной вклад в которую в одном случае вносит повторяемость положения геометрического центра гидрофона и в другом — точность измерений изменения временной задержки. Представленные данные позволяют сделать вывод, что использование поправки обеспечило как значительно меньший разброс результатов, так и меньшую зависимость разброса результатов от частоты измерений.

Причиной увеличения расхождения кривых *1* и *2* с ростом частоты может быть как систематическая погрешность позиционирования по лучу лазера, так и смещение акустического центра гидрофона относительно его геометрического центра. Для оценки возможного смещения для каждой экспериментальной частоты были рассчитаны разность фазовых углов $\Delta\varphi$ (как разность между кривыми *1* и *2*), временной интервал $\Delta t' = \Delta\varphi/(360f)$ и оценка смещения $\Delta d = c\Delta t'$. Значения $\Delta\varphi$, $\Delta t'$, Δd приведены в таблице. Исходя из полученных данных можно предположить, что смещение акустического центра гидрофона ТС4035 относительно его геометрического центра составило примерно 105 мкм.

Результаты оценки смещения акустического центра гидрофона

f, кГц	$\Delta\varphi$, °	$\Delta t'$, мкс	Δd, мм	f, кГц	$\Delta\varphi$, °	$\Delta t'$, мкс	Δd, мм
160	9,0	0,16	0,11	315	16,0	0,14	0,10
180	9,9	0,15	0,10	360	18,2	0,14	0,10
200	11,0	0,15	0,11	400	22,3	0,16	0,11
220	12,1	0,15	0,10	450	24,5	0,15	0,10
250	13,9	0,15	0,11	500	28,9	0,16	0,11
280	15,1	0,15	0,10	—	—	—	—

Выводы. Координатные системы и способы применения луча лазера при позиционировании градуируемого гидрофона во ВНИИФТРИ и в НФЛ различались. Несмотря на это, оценки неопределенности измерений методом неподвижной опорной точки, полученные во ВНИИФТРИ и в НФЛ, хорошо согласуются как на низких, так и на высоких частотах [2]. Согласованность оценок дает возможность судить о типичных неопределенностях, присущих методу неподвижной опорной точки. В результате работ, выполненных как в НФЛ, так и представленных в настоящей статье, использование схемы Люкера — Ван Бюрена для фазовой градуировки акустических приемников можно считать достаточно обоснованным, а описанные методы перспективными. Но, как всякие новые методы, они требуют дальнейших исследований и сопоставления с результатами, полученными другими лабораториями.

Литература

1. **Классификатор** СМС-данных МБМВ [Офиц. сайт]. http://kcdb.bipm.org/appendixC/AUV/AUV_services.pdf (дата обращения 12.01.2013 г.).

2. **Hayman G., Robinson S.** Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method // Proc. 11th Europ. Conf. Underwater Acoustics. Edinburgh, 2012. P. 1437—1444.

3. **МЭК 60565(2006).** Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 1 МГц.

Дата принятия 02.04.2013 г.