

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА СКВУ В ПРОГРАММНО-АППАРАТНОМ КОМПЛЕКСЕ ГРАДУИРОВКИ ГИДРОФОНОВ ПО ПОЛЮ ЭТАЛОННОЙ УСТАНОВКИ ГЭТ 55-2011

А. Н. Матвеев

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

e-mail: matveev@vniiftri.ru

Рассматриваются вопросы измерения непрерывных амплитудно-фазовых частотных характеристик гидроакустического преобразователя в бассейне с отражающими границами. Условия свободного поля при измерениях обеспечиваются применением метода скользящего взвешенного усреднения (СКВУ) и излучением широкополосных сигналов. Описываютсяходы по оптимизации режекторного пространственного фильтра СКВУ и применению квадратурно-дополненных сигналов с линейной частотной модуляцией. Приводится описание программного-аппаратного комплекса и результаты его испытаний в измерительном бассейне ГЭТ 55-2011.

Ключевые слова: гидроакустические преобразователи, градуировка, измерительный бассейн, программный комплекс, свободное поле, сигналы с линейной частотной модуляцией.

Введение

Принято считать, что при измерениях в натуральных условиях гидроакустический приёмник находится в условиях, приближённых к свободному полю. В связи с этим становится актуальным совершенствование Государственного специального первичного эталона единицы звукового давления в водной среде – паскаля в диапазоне частот от 0,001 Гц до 1 МГц ГЭТ 55-2011 [1] с целью расширения возможностей градуировки гидроакустического приёмника по полю. Совершенствованию ГЭТ 55-2011 и подчинённых по поверочной схеме эталонов препятствуют ограничения реализуемого ими тонально-импульсного метода измерений. Тонально-импульсный метод в лабораторном бассейне с отражающими границами позволяет с эталонной точностью измерять частотные характеристики гидрофонов, но его возможности недостаточны для градуировки гидрофона, установленного в приёмный гидроакустический модуль. Повышение требований к точности современных гидроакустических измерений [2] заставляет получать в результате метрологических работ всё более детальную модель гидроакустического приёмника – непрерывные комплексные (амплитудно-фазовые) частотные характеристики [3]. Получение подробной модели требует больших объёмов измерительной информации, обеспечить которые тонально-импульсный метод не может. Таким образом, назревшая необходимость совершенствования градуировки гидроакустического приёмника в отражающем бассейне сдела-

ла весьма актуальной разработку новых методов измерений по полю, основанных на современных подходах к реализации условий свободного поля. Проблемы, обусловленные малой информативностью характеристик, получаемых тонально-импульсным методом с редким (третьоктавным) шагом по частоте, можно преодолеть, излучая в лабораторном бассейне сигналы, мощность которых распределена в полосе частот шириной Δf . Применение широкополосного сигнала позволяет выполнять быстрые измерения частотной зависимости, но при этом возникает другая задача – устранение вызванных реверберацией звука искажений сигнала продолжительностью $\Delta t \geq 1/\Delta f$.

К наиболее известным и нашедшим применение в метрологической практике методам реализации условий свободного поля при излучении широкополосных сигналов можно отнести: время-селективную гомоморфную постобработку [4] (далее – ГП), спектрометрию временных задержек [5-7] (далее – СВЗ) и скользящее комплексное взвешенное усреднение [8] (далее – СКВУ).

Оставляя за рамками данной работы сравнение и подробное рассмотрение достоинств и недостатков методов, отметим одну характерную для них и для тонально-импульсного метода особенность – это усреднение искомой частотной характеристики. Частотное усреднение для этих методов неизбежно, поскольку является платой при измерениях по полю в условиях ограниченного пространства. В [9] показано, что причиной такого усреднения в тонально-импульсном методе является усечение сигнала по времени, в методе ГП – оконная аподизация, в методе СВЗ – постоянная времени фильтра промежуточной частоты. Достоинством метода СКВУ является минимальное влияние усреднения на частотную характеристику по сравнению с рассматриваемыми методами [10, 11]. По этой причине метод СКВУ выбран для реализации условий свободного поля при излучении широкополосных сигналов в эталонных установках ГЭТ 55-2011.

Оптимизированный режекторный фильтр СКВУ

Теория метода СКВУ основана на свойстве передаточной функции бассейна с отражающими границами $\dot{H}_{WT}(f)$ [10]:

$$\dot{H}_{WT}(f) = 1 + \sum_i e^{-j2\pi f \Delta \tau_i}. \quad (1)$$

Это свойство выражает формула:

$$\frac{1}{\Delta f} \int_{-\Delta f/2}^{\Delta f/2} h(f') \dot{H}_{WT}(f-f') df' = 1. \quad (2)$$

Получение частотной зависимости по полю $\dot{U}_{PH}(f)$ методом СКВУ состоит в следующем. В отражающем бассейне для пары излучатель - приёмник измеряют временные задержки первых значимых отражений и подробную или непрерывную комплексную частотную зависимость выходного напряжения приёмника $\dot{U}'_{PH}(f)$. Влияние отражения, задержанного на время $\Delta\tau$, устраняют скользящим усреднением комплексной частотной зависимости $\dot{U}'_{PH}(f)$ в частотном интервале $\Delta f = 1/\Delta\tau$. Влияние нескольких отражений устраняют последовательным применением данной операции для каждого отражения.

Процедура метода схематично приведена на рис. 1, где изображены: искажённая отражениями экспериментальная частотная зависимость 1, результат применения СКВУ (зависимость 2), и непосредственно сама процедура СКВУ в виде перемещающихся в направлении стрелки прямоугольников, которые обозначают скользящие равноточные усреднения. Последовательные равноточные усреднения образуют одно взвешенное усреднение. Таким образом, метод СКВУ реализует пространственный режекторный фильтр. Практика показывает [10, 11], что данный фильтр достаточно настроить на подавление первых трёх значимых отражений.

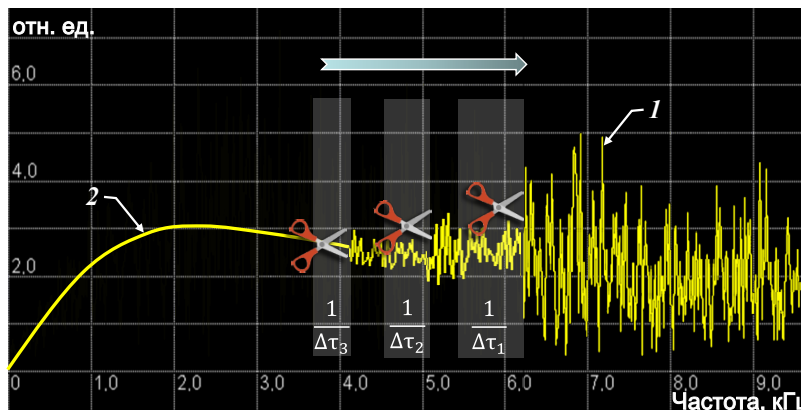


Рис 1. Получение частотной зависимости по полю методом СКВУ: 1 – частотная характеристика передаточного импеданса пары излучатель - приёмник, измеренная в отражающем бассейне; 2 – результат применения СКВУ к измеренной частотной характеристике с усреднением в полосе частот Δf (учтено влияние 3-х первых отражений)

На рис. 2 кривыми 1 и 2 показаны характеристики (функции пропускания) режекторных фильтров, настроенных на первое и второе отражения соответственно. Временная задержка τ на рисунке выражена относительно задержки прихода прямого сигнала.

Кривой 3 показано совместное применение режекторных фильтров 1 и 2. Улучшенная характеристика пропускания фильтра 3 полностью подавляет влияния первого и второго отражений, а влияние отражений, задержанных на время $\tau > \tau_2$, ослабляет не менее чем на 98,3 %. Далее необходимо выполнить следующий шаг – настроить режекторный фильтр СКВУ на подавление 3-го отражения.

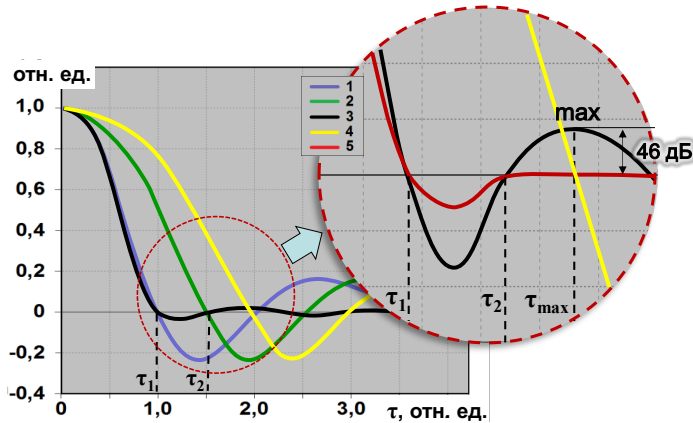


Рис. 2. Построение пространственных режекторных фильтров при реализации скользящего взвешенного усреднения

Информацию об отражениях при измерениях в бассейне с отражающими границами обычно получают излучением и когерентным приёмом короткого импульса (прямоугольного, периода косинусного сигнала и т. п.). Типичный вид принятого прямого импульсного сигнала и эхо-сигналов показан на рис. 3.

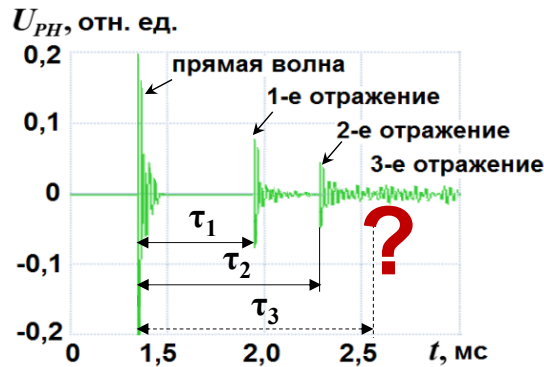


Рис. 3. К определению временных задержек отражённых сигналов

При определении времени прихода третьего отражения очень часто приходится сталкиваться с проблемой, обусловленной как трудностью разделения близко расположенных отражённых сигналов, так и с уменьшением уровня отражённого сигнала с увеличением времени его прихода, затягиванием короткого импульсного сигнала переходным процессом. Поэтому в отличие от борьбы с каждым отражением в отдельности [10] был предложен другой подход, позволяющий обходиться без определения времён прихода третьего и более поздних значимых отражений. Характеристику пропускания режекторного пространственного фильтра первых двух отражений предложено улучшать применением третьего фильтра (кривая 4), настроенного на максимум второго бокового лепестка кривой 3. Характеристика пропускания полученного таким образом режекторного фильтра показана на рис. 2 зависимостью 5, при этом паразитное пропускание для $\tau > \tau_{\max}$ составляет не более 0,5 %.

Полученный режекторный фильтр обладает замечательным свойством: нули функции пропускания соответствуют временам прихода отражений τ_1 , τ_2 и τ_{\max} , в области первого бокового лепестка отражения отсутствуют, а справа от второго нуля функция пропускания затухает не менее, чем на 46 дБ, что достаточно для точных измерений. В отличие от известных окон аподизации [4] данный фильтр имеет максимальную ширину полезной области пропускания и, соответственно, минимальное размытие результата изменений по частоте [9], в несколько раз меньшее, чем у прямоугольного окна (тональный импульс), окон Блэкмана, Пирсона и других известных окон [4, 7]. Именно адаптацией режекторного фильтра к отражениям объясняется высокая эффективность подавления отражений методом СКВУ.

Отметим, что в методе СКВУ значения временных задержек используются только для настройки пространственного режекторного фильтра. Если временную ось абсцисс τ на рис. 2 умножить на скорость звука в водной среде c , получим пространственную ось. Произведения $c \cdot \tau_1$, $c \cdot \tau_2$ и $c \cdot \tau_{\max}$ – пространственные величины, выражающие удалённость источников, подавляемых пространственным режекторным фильтром, который не следует понимать как фильтр пространственных частот.

Излучение квадратурно-дополненных ЛЧМ сигналов

С появлением метода СКВУ потребовалось измерять подробные частотные зависимости пары излучатель - приёмник в реверберационном поле бассейна. Как уже было отмечено, задачу измерения подробных частотных характеристик принято решать, используя сигналы с распределённой по частоте мощностью: различные виды шумовых и разворачиваемых по частоте сигналов.

В рассматриваемой реализации метода СВКУ было решено использовать сигнал с линейной частотной модуляцией (далее – ЛЧМ), который позволяет

измерять частотную зависимость с любой требуемой детализацией по частоте и в широком диапазоне частот. Усреднение этой зависимости по методу СКВУ обеспечивает высокую помехозащищённость измерений.

При проведении теоретических исследований пользуются записью сигнала в комплексной форме. Для выполнения экспериментальных исследований в бассейне предложено использовать комплексный ЛЧМ сигнал вида $\dot{x}(t) = \exp[j\varphi(t)]$, где $\varphi(t) = 2\pi(f_0 t + St^2/2)$, f_0 – начальная частота, S – скорость изменения частоты сигнала. Квадратурно дополненные (сдвинутые на $\pi/2$) компоненты $x_{Re}(t) = \cos(\varphi(t))$ и $x_{Im}(t) = \sin(\varphi(t))$ комплексного ЛЧМ сигнала излучают в бассейне по очереди через реверберационную паузу. Излучённый и принятый комплексные сигналы получают математически объединением их действительной и мнимой части: $\dot{x}(t) = x_{Re}(t) + jx_{Im}(t)$ для излучаемого и $\dot{y}(t) = y_{Re}(t) + jy_{Im}(t)$ для принятого сигналов. Через $y_{Re}(t)$ и $y_{Im}(t)$ обозначены реакции приёмника на излучение синфазной $x_{Re}(t)$ и квадратурной $x_{Im}(t)$ компонент соответственно. Делением (с учётом времени распространения звуковой волны τ) принятого сигнала $\dot{y}(t)$ на излучённый $\dot{x}(t)$ получают комплексную частотную зависимость пары излучатель - приёмник $\dot{Z}'_{PH}(f)$ в реверберационном поле отражающего бассейна. Преимуществом такого подхода является возможность многократно уменьшать частотный шаг получаемой частотной зависимости в сравнении с традиционным БПФ анализом действительного ЛЧМ сигнала, реализуемого, например, в методе СВЗ. Дополнительный выигрыш дают исключение операций гетеродинирования, характерных для СВЗ [7], и детектирования (обязательной как для СВЗ, так и для тонально-импульсного метода), и связанные с реализацией этих операций источники погрешности. Полученную таким способом зависимость подвергают скользящему взвешенному комплексному усреднению, подавляя тем самым влияние отражений. Процедура получения искомой частотной характеристики пары излучатель - приёмник в свободном поле $\dot{Z}'_{PH}(f)$ по частотной зависимости $\dot{Z}'_{PH}(f)$ пары в реверберационном поле «комплексного» ЛЧМ сигнала пояснена схемой на рис. 4.

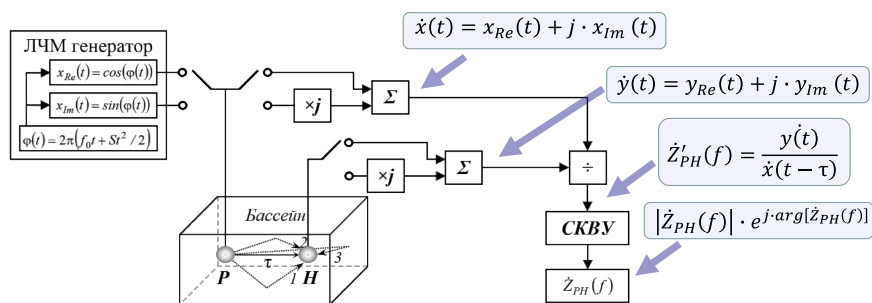


Рис. 4. Реализация метода СКВУ на квадратурно дополненных ЛЧМ сигналах:
 P – излучатель, H – приёмник, τ – время распространения звуковой волны

Программно-аппаратный комплекс градуировки методом СКВУ

Разработанная процедура метода СКВУ с использованием ЛЧМ сигналов реализована в виде программно-аппаратного комплекса для градуировки гидрофонов на базе эталонной установки Э-4 из состава ГЭТ 55-2011. Установка размещена на подвижном мостовом устройстве большого гидроакустического бассейна ГЭТ 55-2011 и представляет собой рабочее место оператора, оснащённое комплектом периферийной измерительной аппаратуры. Внешний вид измерительной установки приведён на рис. 5.



Рис. 5. Измерительная установка для реализации градуировки по полю методом СКВУ на ЛЧМ сигналах

Аппаратную часть комплекса составляют измерительные приборы (усилитель мощности Tabor 9400, малошумящий предусилитель SR 560, устройство коммутационное УК, устройство входное УВ), автоматизированная система позиционирования преобразователей под водой, набор излучателей (далее – И) и обратимых преобразователей (далее – ОП), управляющая система на базе персонального компьютера. ПЭВМ управляющей системы оснащена виртуальными генератором и осциллографом, реализованными на базе устройства АЦП-ЦАП 14/2 фирмы ZetLab (частота преобразования 4 МГц, передача данных по шине PCI и цифровая обработка в реальном времени, 14-разрядный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), 16-разрядный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП)). Блок-схема измерительной установки показана на рис. 6.

Излучающий тракт установки состоит из ЦАП виртуального генератора ЛЧМ сигналов, двухканального усилителя мощности, устройства коммутационного УК, через которое сигнал излучения подключают к И либо к ОП. Приёмный тракт включает в себя: устройство входное УВ, двухканальный предусилитель SR 560 и АЦП виртуального осциллографа. Устройство УВ выполняет функцию согласования импедансов градуируемого гидрофона и измерительного тракта. Устройство УК реализует коммутации ОП в соответствии с процедурой градуировки методом взаимности и входит как общий элемент, и в излучающий и в приёмный тракты.

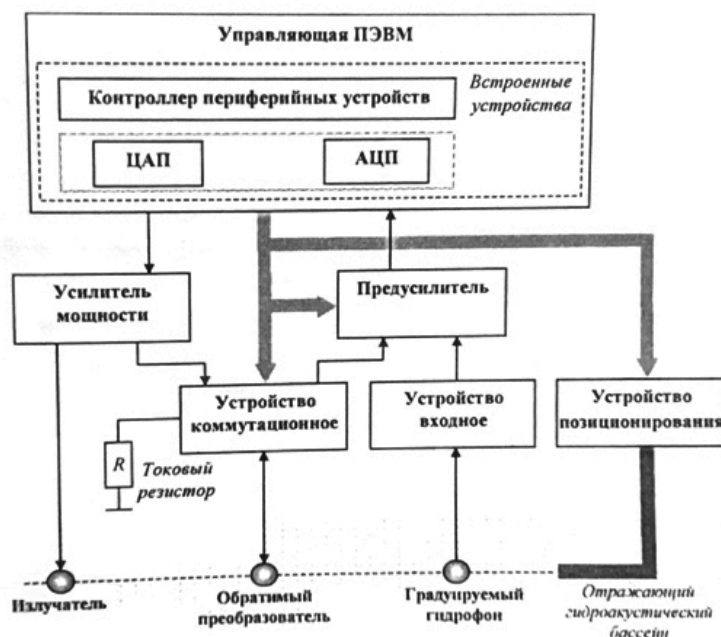


Рис. 6. Блок-схема измерительной установки, реализующей процедуру градуировки методом взаимности в реверберационном поле ЛЧМ сигнала

За основу программной части разработанного комплекса был взят программный комплекс (далее – ПК) градуировки гидрофонов установки Э-4. Функционал ПК Э-4 был расширен библиотекой функций и процедур для работы с комплексными (квадратурно дополненными) сигналами, дополнен программными модулями, предназначенными для управления АЦП-ЦАП 14/2 и реализации алгоритма СКВУ. Существенной доработке подверглись более десяти программных модулей. В результате была создана минимальная конфигурация рабочей версии ПК измерительной установки, позволяющего выполнять основной набор функций, необходимых для реализации процедуры градуировки гидрофона на ЛЧМ сигналах с использованием метода СКВУ.

Рабочая версия ПК состоит из исполняемой программы (исполнимого файла), набора динамических библиотек и файлов настроек. Исполнимый файл ПК содержит в себе скомпилированный исходный текст программы. Исполняемая программа организована по принципу модульности, позволяет разбивать сложные задачи на более мелкие, что обеспечивает её масштабируемость. Исполняемая программа ПК насчитывает 33 программных модуля – функционально законченных фрагментов программы, оформленных в виде отдельных файлов с исходным кодом. Каждый разработанный программный модуль, в свою очередь, состоит из набора функций, классов, констант и предназначен для реализации функций окон диалога (интерфейса оператора) либо объединён в статические библиотеки, подключаемые к исполняемой программе на этапе её компиляции.

Разработанный ПК выполняет функции автоматического управления устройством АЦП-ЦАП 14/2 по шине PCI и периферийными устройствами измерительной установки по интерфейсам USB, Ethernet, RS-232, IEEE 1284. Основным режимом работы ПК – автоматический, без участия оператора. Режим диалога оператора с ПК используется для ввода и сохранения полученных данных, а также для автономной проверки работоспособности составных частей установки. Окно диалога разработанного ПК показано на рис. 7.

Для работы ПК установки необходимо следующее системное ПО: операционная система Windows XP, инструментальная среда разработки Microsoft Visual Studio 2008, драйверы и динамические библиотеки для управления и обмена данными с периферийными устройствами.

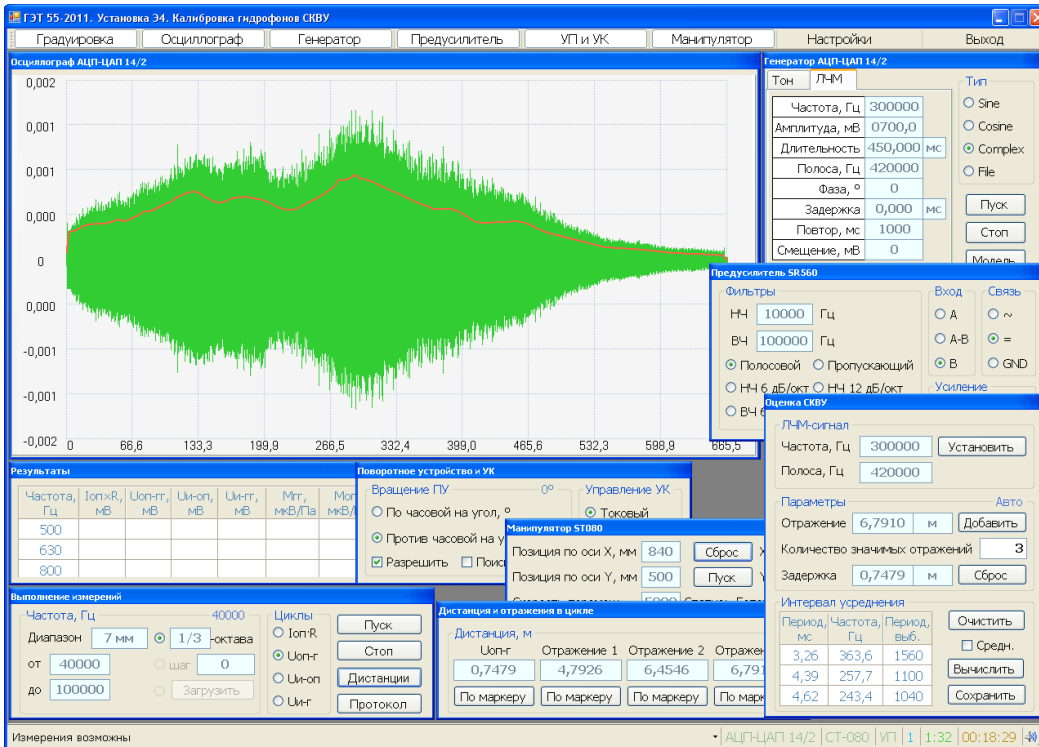


Рис. 7. Внешний вид окна диалога ПК

ПК реализует алгоритм амплитудно-фазовой (комплексной) градуировки гидрофонов при излучении квадратурно дополненных ЛЧМ сигналов стандартным методом взаимности с использованием трёх преобразователей: излучателя И, обратимого преобразователя ОП и градуируемого гидрофона ГГ. Блок-схема алгоритма градуировки гидрофонов приведена на рис. 8.

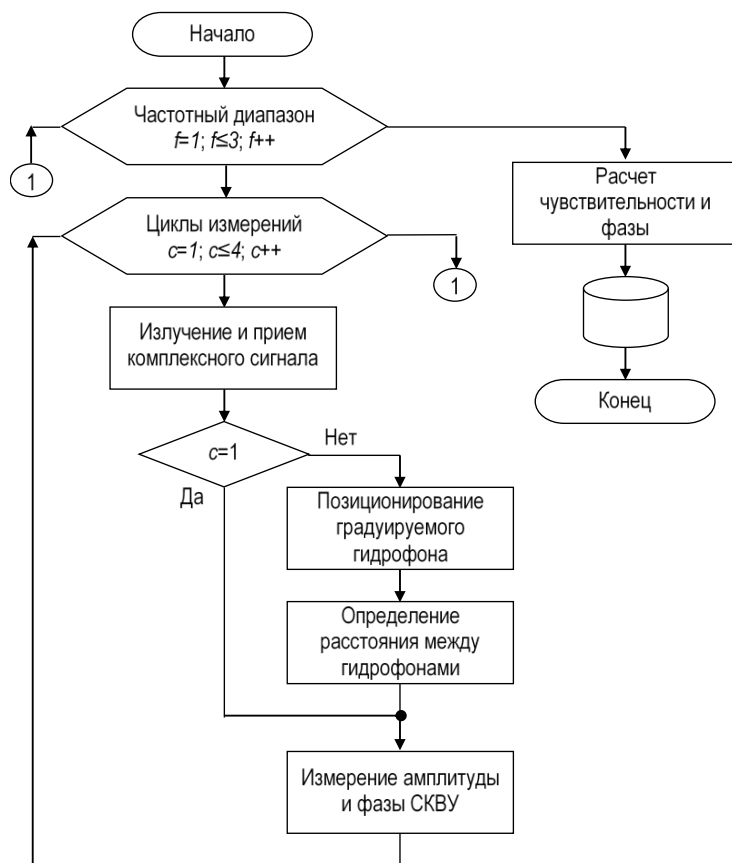


Рис. 8. Блок-схема алгоритма амплитудно-фазовой градуировки гидрофонов на ЛЧМ сигналах, реализующего метод взаимности

Результаты испытаний программно-аппаратного комплекса

Качество селекции прямого ЛЧМ сигнала при измерениях в отражающем бассейне ГЭТ 55-2011 оценивали проверкой соблюдения в области дальнего поля сферического закона обратной пропорциональности звукового давления расстоянию между излучателем и приёмником [11]. Отклонение от зависимости $1/r$ определяли экспериментально сравнением зависимостей от расстояния передаточного импеданса пары излучатель - приёмник в свободном поле, полученных СКВУ при излучении ЛЧМ сигналов и тонально-импульсным методом.

Результаты показали, что СКВУ частотной зависимости пары излучатель-приёмник в частотном интервале $\Delta f = 1/\tau$ подавляет влияние задержанного на время τ отражённого ЛЧМ сигнала и ослабляет влияние последующих отражений не менее чем в 5 раз. В методе СКВУ выделение прямого ЛЧМ сигнала излучателя значительно лучше СВЗ [9, 10, 12]: остаточные искаже-

ния частотной характеристики отражениями не превышают 0,5 %, что превосходит возможности метода СВЗ и оказывается вполне достаточным для эталонных градуировок по полю.

На рис. 9 приведены характеристики, обычно используемые для проверки качества измерений по свободному полю.

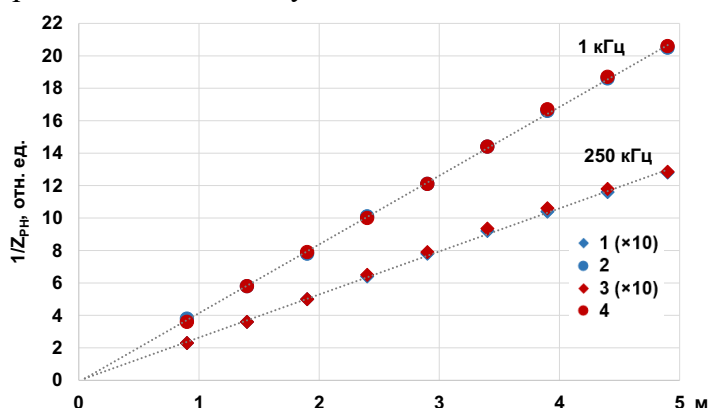


Рис. 9. К проверке выполнения сферического закона обратной пропорциональности звукового давления: методом СКВУ – 1, 2; тонально-импульсным методом – 3, 4

Результаты, полученные тонально-импульсным методом и при непрерывном излучении в отражающем бассейне (время реверберации 200 мс) ЛЧМ сигналов длительностью 1 с, не превысили (0,8 – 1,7) % на всех экспериментальных частотах при изменении расстояния между излучателем и гидрофоном от 0,4 до 5,0 м [11]. Примерно на такую же величину отклоняются зависимости 1 и 2 от прямых наилучшего приближения зависимостей 3 и 4, обозначенных на рис. 9 пунктиром.

Приведённые результаты показывают, что разработанная реализация метода СКВУ позволяет получать оценку частотной зависимости в свободном поле с точностью, не уступающей тонально-импульсному методу и соответствующей современным требованиям эталонных измерений.

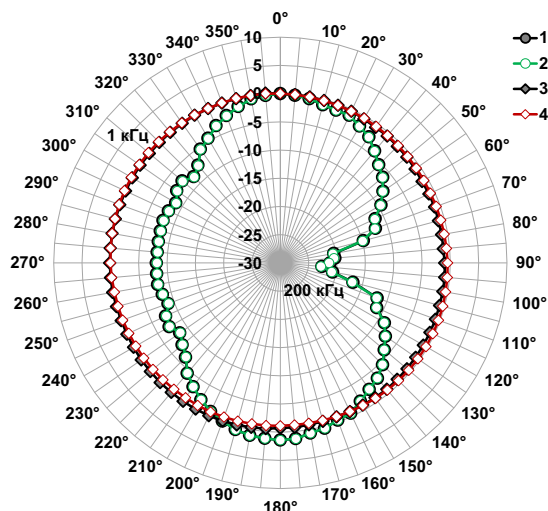


Рис. 10. Характеристики направленности гидрофона, измеренные тонально-импульсным методом – 1, 3 и методом СКВУ – 2, 4

На рис. 10 приведены характеристики направленности гидрофона, полученные в отражающем бассейне при излучении ЛЧМ сигнала (кривые 2 и 4) и тонально-импульсным методом (кривые 1 и 3). Полученные характеристики практически не различаются – несовпадения кривой 1 с кривой 2 и кривой 3 с кривой 4 не превышают 0,15 дБ.

Таким образом, проведённые экспериментальные исследования доказали, что при измерениях в реверберационном поле ЛЧМ сигнала с применением СКВУ достигаются показатели качества свободного поля первичного эталона.

Одним из преимуществ предложенной измерительной процедуры перед гомоморфной время-селективной постобработкой является возможность применить СКВУ к компактному фрагменту частотной зависимости. Такой подход позволяет «собирать» искомую характеристику по фрагментам, измеренным в различных частотных диапазонах. В каждом диапазоне можно подбирать оптимальную скорость развёртки ЛЧМ сигнала, излучатель, обеспечивающий наилучшее соотношение сигнал/шум, и, при необходимости, использовать дополнительное накопление сигнала. Это позволяет также ограничить динамический диапазон измеряемого сигнала. Экспериментально подтверждено, что различие результатов измерений при реализации метода взаимности для разных пар вспомогательных преобразователей на перекрывающихся участках их частотных диапазонов не превышает 0,01 дБ.

Использование ЛЧМ сигнала позволило снять проблему калибровки на произвольных частотах. Высокое частотное разрешение получаемых СКВУ характеристик определяется не только частотой дискретизации F применяе-

мого АЦП, но и полосой частот f_{band} и длительностью излучения ЛЧМ сигнала T . Разрешение СКВУ, вычисляемое как $\frac{f_{band}}{T \cdot F}$, составляет сотую долю герца и позволяет получать сверхдетальные частотные характеристики.

На рис. 11 приведены частотные характеристики чувствительности гидрофона ГГ-26, измеренные при излучении ЛЧМ сигналов (ряд 1) и на тональных импульсах на 1/48-октавных частотах (ряд 2) [11].

Измерение частотной характеристики с подробностью 1/48 октавы тонально-импульсным методом заняло почти 6 рабочих дней. Измерения на ЛЧМ сигналах продолжались 1 ч, при этом потребовалось время на прореживание полученной «слишком подробной» частотной характеристики до 1/48 октавы. Многократное, благодаря излучению ЛЧМ сигналов, сокращение времени измерений является преимуществом предложенной измерительной процедуры, поскольку обеспечивает неизменность условий градуировки. Для большей части зависимостей 1 и 2 на рис. 11 различия результатов, полученных СКВУ и тонально-импульсным методом, не превосходят 0,03 дБ.

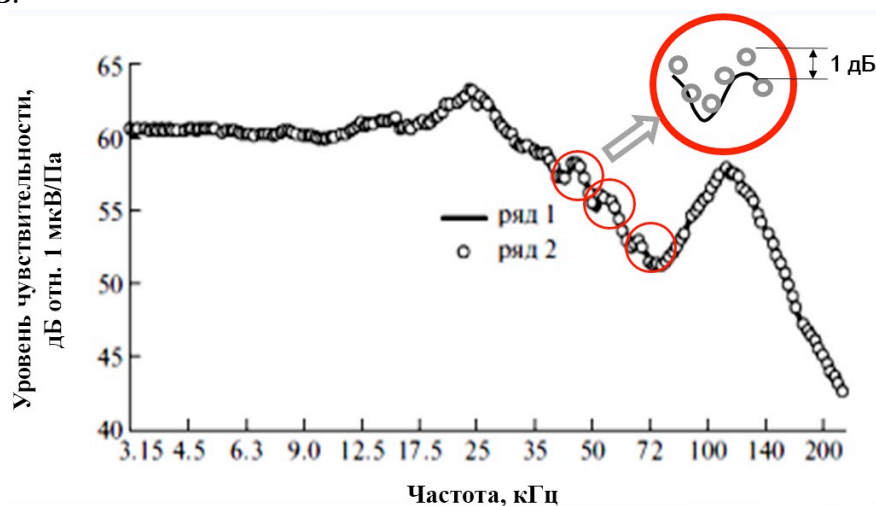


Рис. 11. Результаты градуировки гидрофона на 1/48-октавных частотах при излучении ЛЧМ сигналов — 1 и тональных импульсов — 2

Исключения составляют участки резких изменений частотной характеристики, выделенные красными окружностями. Несовпадения на этих участках соизмеримы либо незначительно превышают типичную погрешность градуировки гидрофона 1,0 дБ, и явно указывают на присущий методу измерений источник погрешности при восстановлении неравномерных участков измеряемой частотной характеристики. Это говорит о необходимости дальнейшего исследования разработанного программно-аппаратного комплекса градуировки гидрофонов по полю методом СКВУ.

Заключение

Реализованный в программно-аппаратном комплексе градуировки гидрофонов по полю эталонной установки ГЭТ 55-2011 метод СКВУ позволил измерять в реверберационном поле лабораторного бассейна детальные частотные характеристики гидроакустических преобразователей с точностью эталонного тонально-импульсного метода, многократно сократив время измерений.

Высокое качество реализации условий свободного поля методом СКВУ (подавление отражений на 99,5 %) достигнуто:

- оптимизацией характеристики пропускания режекторного пространственного фильтра СКВУ, настроенного на подавление конечного числа отражений;

- излучением и когерентным приёмом квадратурно дополненных ЛЧМ сигналов для получения комплексных частотных зависимостей передаточного импеданса пары излучатель-приёмник.

Литература

1. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. и др. Государственный первичный специальный эталон единицы звукового давления в водной среде // Измер. техника, 2013, № 7, с. 3-6.
2. ANSI/ASA S12.64-2009/Part 1 (R2014) Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships. Part 1: General Requirements, Acoustical Society of America, 2009, 21 p.
3. Кулак В. А. Состояние и перспективы развития военных эталонов гидроакустических величин / Метрология гидроакустических измерений : Материалы Всероссийской НТК. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2013, Т. 1, с. 124-137.
4. Barrera Figueroa S.A., Rasmussen K., Jacobsen F. A time selective technique for free-field reciprocity calibration of condenser microphones // J. Acoust. Soc. Am, 2003, v. 114 (3), p. 1467-1476.
5. Heyser R. Acoustical measurements by time-delay spectrometry // Journal of the Audio Engineering Society, 1967, v. 15, p. 370-382.
6. Ludwig G., Brendel K. Calibration of hydrophones based on reciprocity and time-delay spectrometry // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1988, v. 35, p. 168-174.
7. Pederson P.C., Lewin P.A., L. Bjørnø Application of time-delay spectrometry for calibration of ultrasonic transducers // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1988, v. 35, p. 185-205.
8. Пат. № 2390968, Российская Федерация, С2. Кл. Н04R 29/00. Способ градуировки гидрофона по полю при излучении непрерывного сигнала в измерительном бассейне с отражениями / А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев,

С.В. Сильвестров; опублик. 27.05.2010, БИ № 15.

9. Исаев А.Е. Соотношение неопределённостей при реализации условий свободного поля в бассейне с отражающими границами. Метрология гидроакустических измерений / Материалы Всероссийской НТК. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2013, Т. 1, с. 95-102.
10. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Два подхода к градуировке гидрофона по полю при непрерывном излучении в незаглушенном бассейне // Измер. техника, 2008, № 12, с. 47-51.
11. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне // Акустический журнал, 2009, Т. 55, № 2, с. 1-10.
12. Исаев А.Е. Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля.- Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008, 369 с.