АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2010, том 56, № 2, с. 277–283

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

УДК 534.6

ПОВЫШЕНИЕ ЧАСТОТНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ СКОЛЬЗЯЩЕГО КОМПЛЕКСНОГО ВЗВЕШЕННОГО УСРЕДНЕНИЯ

© 2010 г. А. Е. Исаев, А. Н. Матвеев

Федеральное государственное унитарное предприятие
"Всероссийский научно-исследовательский институт
физико-технических и радиотехнических измерений" ВНИИФТРИ
141570 Московская обл., Солнечногорский р-он, пос. Менделеево
Тел. 536-94-43, 660-21-66, факс 660-25-39
E-mail: isaev@vniiftri.ru, matveev@vniiftri.ru

Поступила в редакцию 20.01.09 г.

Рассмотрены результаты исследования возможностей метода оценивания переходного импеданса излучателя и приемника в свободном поле, основанного на скользящем комплексном взвешенном усреднении частотной зависимости переходного импеданса излучателя и приемника в не заглушенном бассейне. Показано, что метод позволяет ослабить влияние отражений и создавать условия свободного поля в бассейнах с различным характером отражений, резко различающихся по форме и многократно по размерам. Предложена процедура повторного применения скользящего комплексного взвешенного усреднения совместно со спектрометрией функций отражений, позволяющая увеличить частотное разрешение метода.

ВВЕДЕНИЕ

Для градуировки измерительного микрофона по полю обычно применяется заглушенная камера, в которой обеспечиваются условия свободного поля. Считается, что в такой камере присутствует только прямая волна излучателя. При градуировке гидрофона реализовать заглушенную камеру практически невозможно. В измерительном бассейне на градуируемый гидрофон кроме прямой волны падают отраженные волны. Метод скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) позволяет так организовать измерения и обработку данных, что по результатам измерений в бассейне получаются характеристики, как в заглушенной камере [1, 2]. Исходные данные для метода СКВУ получают измерением частотной зависимости переходного импенданса системы излучатель–не заглушенный бассейн-приемник (далее – системы излучатель–приемник–отражения) и временных задержек первых значимых отражений. Метод СКВУ состоит в построении многополюсного режектирующего пространственного фильтра, настроенного на отражения в бассейне, и применении фильтра к измеренной частотной зависимости. Итоговую частотную зависимость получают скользящим усреднением измеренной частотной зависимости с применением взвешивающей функции, которая строится исходя из значений временных задержек отражений.

С помощью метода СКВУ удается исключить или, по крайней мере, многократно уменьшить искажения сигнала (возникающие из-за отражений) в системе излучатель–приемник–отражения. Поэтому метод можно использовать как способ исключения искажений сигнала отражениями в системах передачи сигнала.

Теория, результаты экспериментальных исследований и применения метода СКВУ для градуировки гидрофонов по полю методом взаимности при непрерывном излучении полосового сигнала в не заглушенном бассейне изложены в [1, 2]. В [1] проведен сравнительный анализ метода СКВУ и метода спектрометрии временных задержек. Настоящая статья посвящена совершенствованию метода СКВУ – повышению его частотной разрешающей способности за счет уширения первого лепестка характеристики пропускания пространственного режектирующего фильтра.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА СКВУ

Принципиальная особенность метода СКВУ – усреднение искомой частотной характеристики излучателя и приемника в свободном поле (далее системы излучатель–приемник) в частотном интервале, определяемом расположением излучателя и приемника и геометрией бассейна. Очевидно,

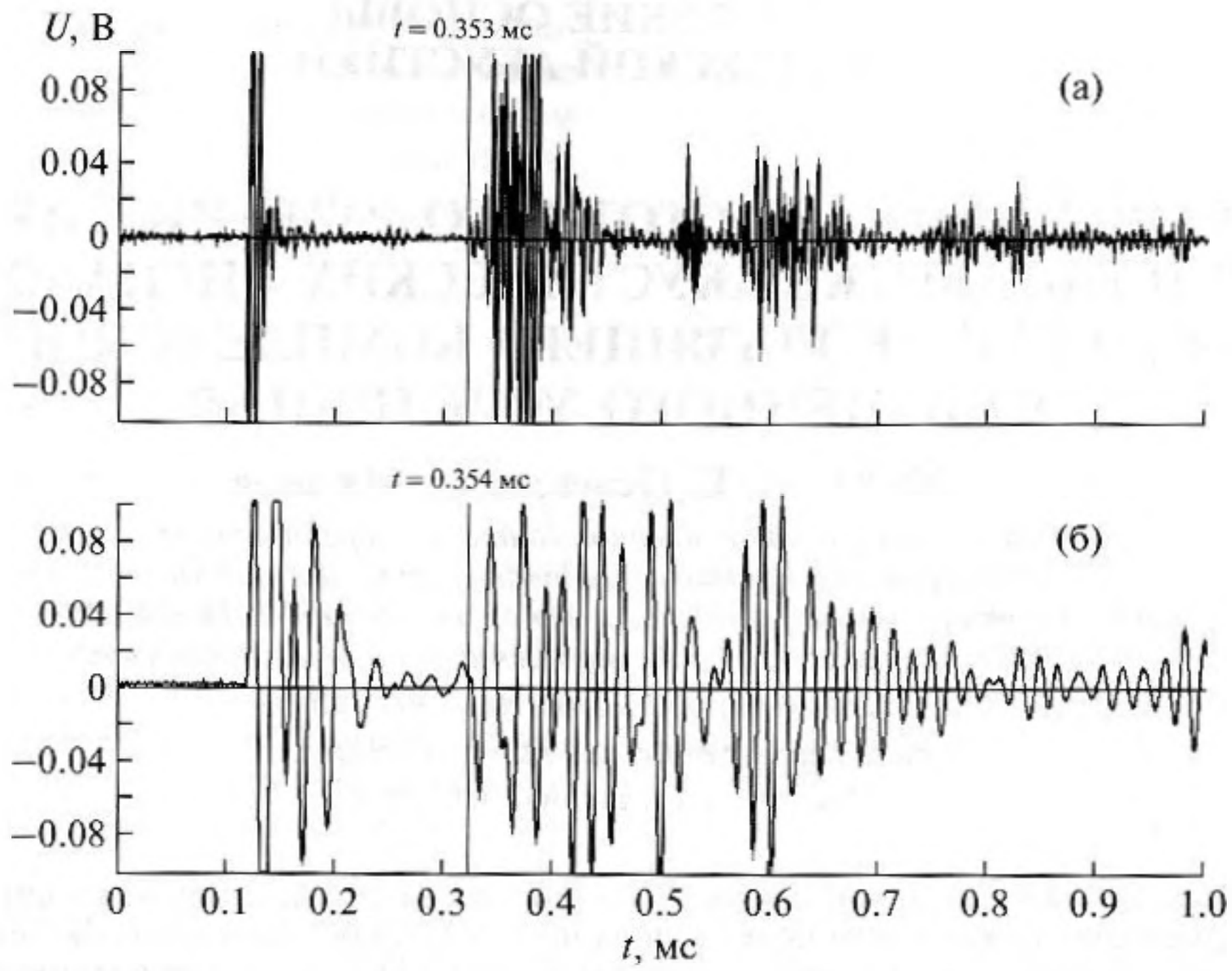

Рис. 1.

что частотное разрешение – один из критических параметров метода и определяется частотным интервалом (усреднения) бассейна [1]. Поскольку режектирующий фильтр метода СКВУ отсекает высокие пространственные частоты, форма искомой частотной характеристики может искажаться. Осцилляции частотной зависимости системы излучатель–приемник в частотных интервалах, меньших частотного интервала усреднения, "воспринимаются" СКВУ как вызванные удаленным источником отражений, и исключаются так же, как и остальные отражения.

Как правило, с уменьшением размеров бассейна его частотный интервал увеличивается. Это должно приводить к увеличению вызванных усреднением искажений частотной характеристики системы излучатель–приемник. Чтобы оценить возможности метода СКВУ, проведены исследования в бассейнах с различным характером отражений, резко отличающихся по форме и десятикратно по размерам, с применением тонально-импульсного и непрерывного полосового сигналов. Использовались не заглушенный бассейн прямоугольной формы из бетона размером $10 \times 6.5 \times 6$ м (бассейн 1) и тонкостенная стальная цилиндрическая бочка диаметром 0.56 и высотой 0.84 м, на дне и внутренней поверхности которой был укреплен слой линолеума (бассейн 2). При непрерывном излучении применялся ЛЧМ сигнал. Излучателями и приемниками являлись две пары однотипных гидрофонов (широкополосных и узкополосных) со сферическими активными элементами диаметром 7 (пара 1) и 40 мм (пара 2). Измерялись частотные зависимости выходного напряжения приемника при постоянной амплитуде напряжения на входе усилителя, возбуждающего излучатель. Для каждой пары время затухания переходного процесса в системе излучатель–приемник определялось экспериментально в бассейне 1. Было установлено, что время затухания τ_{PH_1} пары 1 примерно в двадцать раз меньше задержки первого отражения $\tau_{1,1}$ в бассейне 1 и не превосходит задержки первого отражения $\tau_{1,2}$ в бассейне 2. Время затухания пары 2 τ_{PH_2} больше τ_{PH_1} примерно в четыре раза и превышает задержку первого отражения $\tau_{1,2}$ в бассейне 2. На рис. 1 приведены временные зависимости выходного напряжения приемника пары 1 (а) и пары 2 (б) в бассейне 2 после излучения короткого импульса.

По аналогии с реверберацией, под переходным процессом в системе излучатель–приемник (свободное поле, отражения отсутствуют) будем понимать процесс установления выходного напряжения приемника, возникающий при падении на приемник волны, излученной при возбуждении излучателя коротким импульсом. Соответственно, под временем затухания переходного процесса будем понимать временной интервал, который начинается с момента прихода волны излучателя к чувствительному элементу приемника и заключает в себе энергетически значимую часть переходного процесса в системе излучатель–приемник (для пары 1 – интервал от 0.12 до 0.3 мс на рис. 1 (а)). Задержка первого отражения

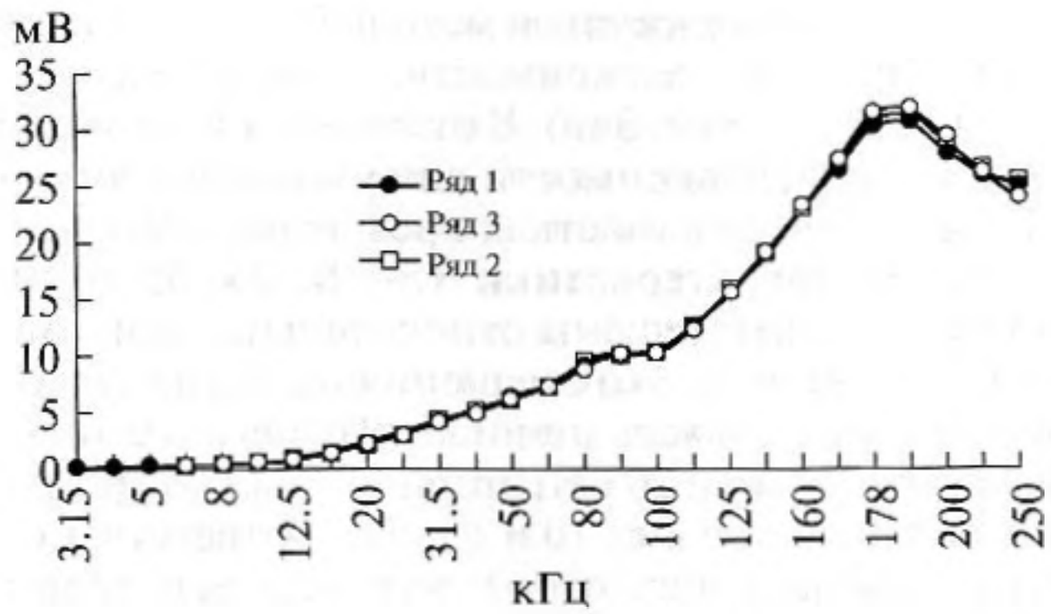

Рис. 2.

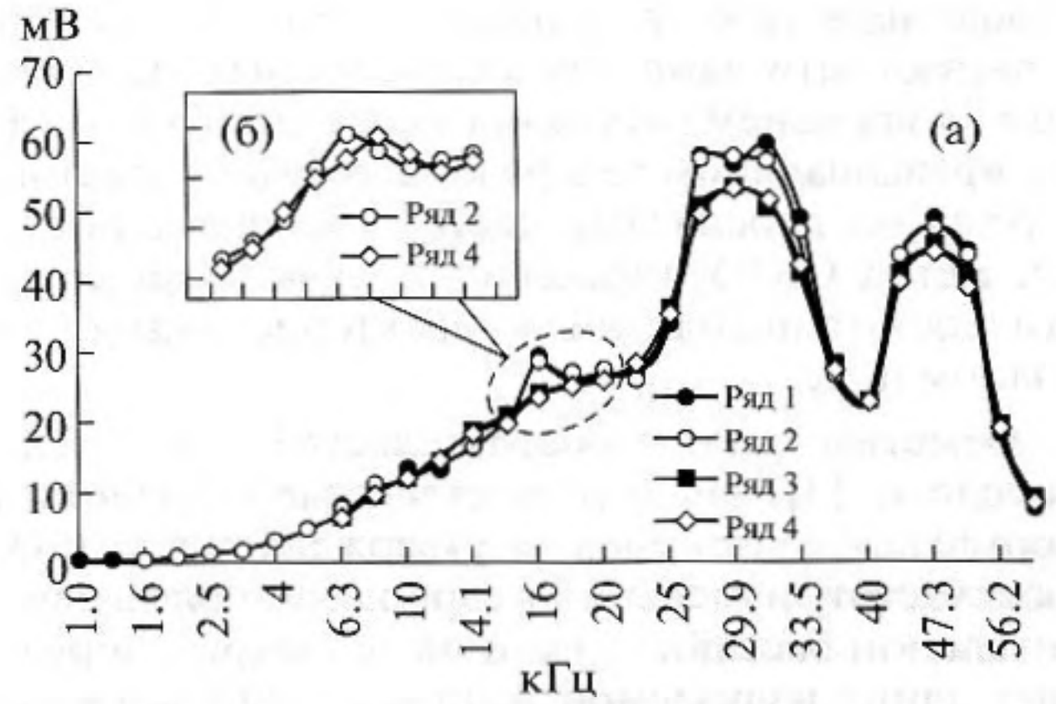

Рис. 3.

$\tau_{1,2}$ в бассейне 2 составляет примерно 0.353–0.354 мс и отмечена на рис. 1 вертикальными маркерами. При "излучении" импульса бесконечно малой длительности с бесконечно большой амплитудой (δ-функция) переходной процесс в системе излучатель–приемник представляет собой импульсную характеристику системы $h_{PH}(\tau)$, которая связана преобразованием Фурье с частотной характеристикой системы $\dot{Z}_{PH}(f)$.

На рис. 2 и 3 (а) рядами 1 представлены частотные зависимости для широкополосной пары 1 (частота резонанса 180 кГц) и узкополосной пары 2 (частота первого значимого резонанса 30 кГц) в бассейне 1 (тонально-импульсное излучение, расстояние между излучателем и приемником 10 см для пары 1 и 20 см для пары 2). На рис. 3 (а) рядом 2 представлена частотная зависимость для пары 2, полученная в бассейне 1 методом СКВУ.

Частотный интервал бассейна 1 при использовании метода СКВУ составляет примерно 250 Гц [1, 2]. Усреднение в узком частотном интервале не сказывается при измерении частотных характеристик реальных гидрофонов в бассейне 1, поскольку время затухания переходного процесса гидрофонов значительно меньше времени задержки первого отражения в бассейне. Это показывает совпадение рядов 1 и 2 на рис. 3 (а).

Рядами 2 и 3 на рис. 2 представлены зависимости для пары 1, полученные в бассейне 2 методом СКВУ при расстояниях между излучателем и приемником 10 и 20 см соответственно. Для широкополосной пары 1 зависимости, измеренные в бассейне 1 и в бассейне 2, практически не отличаются. Это свидетельствует о том, что независимо от характера отражений в бассейнах, резко отличающихся как по форме, так и по размерам, и расстояния между излучателем и приемником, метод СКВУ эффективно подавляет влияние отражений. На частотах выше 31 кГц (в рабочем частотном диапазоне излучателя) отклонения не превышают 2.5% и обусловлены не влиянием усреднения, а остаточным влиянием неучтенных отражений. Отклонения ряда 2 и ряда 3 от ряда 1 на рис. 2 малозаметны. Время затухания переходного процесса пары 1 меньше временной задержки первого отражения в обоих бассейнах. Малое время затухания переходного процесса означает, с одной стороны – малую продолжительность импульсной характеристики, с другой стороны – гладкую частотную характеристику каждого гидрофона. Поэтому частотные интервалы осцилляций частотной зависимости, вызванных отражениями, в обоих бассейнах гораздо меньше частотного интервала осцилляций, обусловленных резонансами гидрофонов, и увеличение частотного интервала бассейна с 250 Гц (для бассейна 1) до 5 кГц (для бассейна 2) не привело к заметным искажениям частотной зависимости пары 1.

Указанное выше соотношение между τ_{PH_1} и τ_{PH_2} означает, что частотная характеристика широкополосной пары 1 должна быть более гладкой в сравнении с частотной характеристикой узкополосной пары 2, что и демонстрируют зависимости на рис. 2 и 3 а.

Для метода СКВУ в бассейне 2 были экспериментально оценены параметры пространственного режектирующего фильтра (взвешивающая функция), частотный интервал бассейна, частотный интервал взвешенного усреднения Δf_{wa} [1]. Нижняя частота измерений в свободном поле составила 6.3 кГц. Поскольку частотный интервал бассейна 2 в 20 раз превышает частотный интервал бассейна 1, было оценено влияние усреднения в частотном интервале бассейна 2 на искажения характеристики узкополосной пары гидрофонов. Для этого данные, полученные для пары 2 при непрерывном излучении в бассейне 1, усреднялись в интервале частот Δf_{wa} с использованием взвешивающей функции бассейна 2 (ряд 3 на рис. 3 (а)).

Рядом 4 на рис. 3 а представлена зависимость, полученная для пары 2 методом СКВУ в бассейне 2.

Представленные результаты наглядно демонстрируют, что даже для узкополосных гидрофонов со временем затухания переходного процесса, превышающим задержку первого отражения, и резкими перепадами частотной характеристики, метод СКВУ позволяет получать зависимости, достаточно близкие к характеристикам в свободном поле.

Отметим важное обстоятельство: как международные [3], так и отечественные стандарты и нормативные документы утверждают, что нижнюю частоту измерений в свободном поле в измерительном бассейне заданной геометрии определяет длина излучаемой волны, и для бассейна с минимальным размером 6 м нижняя граничная частота оценивается близкой к 3 кГц. Применением метода СКВУ нижнюю частоту измерений в свободном поле в таком бассейне удалось уменьшить в 15 раз, с 3 кГц до 200–250 Гц [1, 2]. С использованием метода СКВУ проблема измерений в свободном поле из проблемы борьбы с отражениями превращается в проблему излучения очень низких частот и создания обратимого преобразователя для этих частот.

Применение метода СКВУ изменяет общепринятые требования к измерительному бассейну и нижней частоте измерений, которые сегодня повсеместно используются. В отличие от тонально-импульсного излучения, при использовании метода СКВУ минимальный размер бассейна определяет не длина излучаемой волны, а размеры излучателя и приемника (расстояние дальнего поля) и время затухания переходного процесса в системе излучатель–приемник. Нижнюю частоту измерений в свободном поле задает частотный интервал взвешенного усреднения [1, 2].

Анализ полученных результатов продолжим с недостатков метода СКВУ.

НЕДОСТАТКИ МЕТОДА СКВУ

В методике измерений с использованием СКВУ необходимо учитывать особенности поля, возникающего в конкретной системе излучатель–приемник–отражения, реверберация в системе должна представлять собой последовательность отражений, свойства системы не должны изменяться за время излучения и приема, изменения коэффициентов отражений и характеристик направленности излучателя и приемника в интервале частот бассейна должны быть пренебрежимо малы. К недостаткам метода также следует отнести:

— дополнительную погрешность измерений, обусловленную остаточным влиянием неучтенных отражений;

— искажения искомой характеристики усреднением в интервале частот бассейна.

Последний недостаток метода СКВУ наглядно демонстрируют зависимости, представленные рядами 3 и 4 на рис. 3 (а). В отличие от широкополосной пары, зависимости для узкополосной пары в бассейне 2 на участках с резкими перепадами частотной характеристики 15–18, 25–35 и 40–60 кГц заметно смещены относительно зависимостей в бассейне 1. Эти смещения вызваны частотным интервалом усреднения 5 кГц для бассейна 2. На частотах выше 20 кГц ширина участков резких перепадов составляет 10 и 15 кГц соответственно, что превышает частотный интервал усреднения для бассейна 2. Искажения в этих интервалах устраняются применением деконволюции – обратной свертки. Частотный интервал резонанса в области 16 кГц составляет примерно 3 кГц и меньше частотного интервала усреднения в 1.7 раза. Применение деконволюции не привело к улучшению зависимости на участке 15–18 кГц с резкими изломами на коротком интервале частот.

В методе СКВУ пространственный режектирующий фильтр настраивается так, что первый нуль характеристики пропускания фильтра совпадает со временем прихода первого отражения [1]. В результате деконволюции "корректируется" форма характеристики пропускания левее первого нуля (первый лепесток характеристики пропускания), которая становится близкой к прямоугольной, но положение нуля при этом остается прежним. Время затухания переходного процесса пары 2 превышает задержку первого отражения в бассейне 2 (см. временной интервал от 0.12 до 0.35 мс на рис. 1 (б)). Это означает, что отражения в бассейне 2 перекрывают часть импульсной характеристики узкополосной пары 2. Режектирующий фильтр усекает импульсную характеристику по времени прихода первого отражения, при этом теряется завершающий участок характеристики, скрытый отражениями. Следствием такой утраты явилось искажение частотной зависимости пары 2 в области 16 кГц. Приблизить получаемую частотную зависимость к искомой характеристике позволяет режим повторного применения метода СКВУ – режим "лупы".

РЕЖИМ "ЛУПЫ"

Согласно определению, данному в [3], чувствительность гидрофона необходимо определять на гармоническом сигнале. Теоретически не исключена возможность избавиться от влияния отражений при излучении в не заглушенном бассейне непрерывного гармонического сигнала фиксированной частоты. Наличие полной априорной информации о системе излучатель–приемник–отражения: точные пространственные координаты точек приема и излучения (акустических центров излучателя и приемника); число источников отражений, известная простран-

ственная структура, либо значения временных задержек отражений; известные коэффициенты отражений позволяет построить математическую модель системы излучатель–приемник–отражения. При этом можно использовать функцию Грина, либо построить передаточную функцию бассейна, рассматривая не заглушенный бассейн в виде линейного четырехполюсника с распределенными в пространстве параметрами (как это сделано в [1, 2]). На практике такому подходу препятствуют как неполнота, так и неточность исходных данных, поэтому при градуировке гидрофонов по полю применяют тонально-импульсное излучение. Забегая вперед, отметим, что при тонально-импульсном излучении (так же, как и в методе СКВУ) получают усредненную в интервале частот частотную характеристику.

Для повышения разрешающей способности метода СКВУ (чтобы приблизить полученную частотную зависимость к измеренной в условиях свободного звукового поля) предложена процедура повторного применения СКВУ совместно со спектрометрией функций отражений. Привлечение дополнительной информации (не только данных о временных задержках, но и оценок самих функций значимых отражений) позволяет уширить первый лепесток функции пропускания режектирующего пространственного фильтра и тем самым уменьшить частотный интервал бассейна. Механизм работы метода СКВУ в этом режиме удобно проиллюстрировать во временной области, используя понятие импульсной характеристики системы излучатель–приемник.

Представление системы излучатель–приемник–отражения линейным четырехполюсником с распределенными в пространстве параметрами позволяет выразить частотную характеристику $\dot{Z}'_{PH}(f)$, измеренную в условиях отражений, произведением частотной характеристики излучателя и приемника в свободном поле $\dot{Z}_{PH}(f)$ и передаточной функции бассейна $\dot{\Omega}_{WT}(f)$ [1, 2]:

$$\dot{Z}'_{PH}(f) = \dot{Z}_{PH}(f)\dot{\Omega}_{WT}(f).$$

При учете конечного числа n значимых отражений передаточная функция бассейна выражается через функции отражений $\dot{\Omega}_{ref,\,i}(f) = W_i(f)\exp\left[-j\frac{2\pi f\Delta r_i}{c}\right]$ (где $\dot{W}_i(f)$ – частотно зависимые коэффициенты отражений, Δr_i – разность хода прямой волны излучателя и i-го отражения, $i = 1, ..., n$) в виде:

$$\dot{\Omega}_{WT}(f) = 1 + \sum_{i=1}^{n}\dot{\Omega}_{ref,\,i}(f).$$

Получаемая первым применением метода СКВУ оценка частотной характеристики системы излучатель–приемник $\dot{Z}_{PH}(f)$ представляет собой преобразование Фурье усеченной по времени прихода первого отражения части импульсной характеристики системы излучатель–приемник.

На рис. 4 (а) изображены условные импульсные характеристики системы излучатель–приемник: белой кривой (ряд 2) – в свободном поле (отражения отсутствуют), черной (ряд 1) – в не заглушенном бассейне (в условиях отражений). Стрелки с цифрами на рис. 4 указывают первое, второе и третье отражения. Время выражено в относительных единицах $\tau = t/\tau_1$ (τ_1 – временная задержка первого отражения), ноль на оси времени соответствует приходу прямой волны.

О системе излучатель–приемник и условиях измерений сделаем следующие допущения: коэффициенты отражений в частотном интервале взвешенного усреднения слабо зависят от частоты ($\dot{W}_i(f) \approx \dot{W}_i$), затухание звука пренебрежимо мало, дисперсия скорости звука отсутствует. Обычно временные задержки первого и второго отражений τ_1 и τ_2 удается установить с достаточной точностью. Тогда отмеченные стрелками 1 и 2 первый и второй всплески зависимости, представленной рядом 1 на рис. 4 (а), есть не что иное, как результат суммирования искомой импульсной характеристики с задержанными во времени копиями искомой импульсной характеристики, умноженными на соответствующие коэффициенты отражений.

В этой ситуации рассчитаем (аналогично тому, как это сделано в [4]) сумму функций отражений

$$\dot{\Omega}_{ref}(f) = \frac{\dot{Z}'_{PH}(f)}{\dot{Z}_{PH}(f)} - 1 = \sum_{i=1}^{n}\dot{\Omega}_{ref,\,i}(f).$$

Функции отражений $\dot{\Omega}_{ref,i}(f)$ можно рассматривать аналогами рагмоник в комплексном кепстральном анализе. Учитывая, что квефренции функций первых двух отражений равны соответственно τ_1 и τ_2, полученную зависимость $\dot{\Omega}_{ref}(f)$ используем для оценки коэффициентов $\dot{W}_1$ и $\dot{W}_2$ (например, методом наименьших квадратов) и рассчитаем с помощью полученных коэффициентов функции первых двух отражений (рагмоники) $\dot{\Omega}_{ref,\,1}(f)$ и $\dot{\Omega}_{ref,\,2}(f)$. Эти операции по аналогии со спектрометрией временных задержек отражений назовем спектрометрией функций отражений. Вычтем функции отражений из исходной зависимости $\dot{Z}'_{PH}(f)$.

Предложенную последовательность операций во временной области можно трактовать как вычитание задержанных на τ_1 и τ_2 и умноженных на соответствующие коэффициенты отражений копий усеченной по времени прихода первого отражения (полученной первым применением СКВУ)

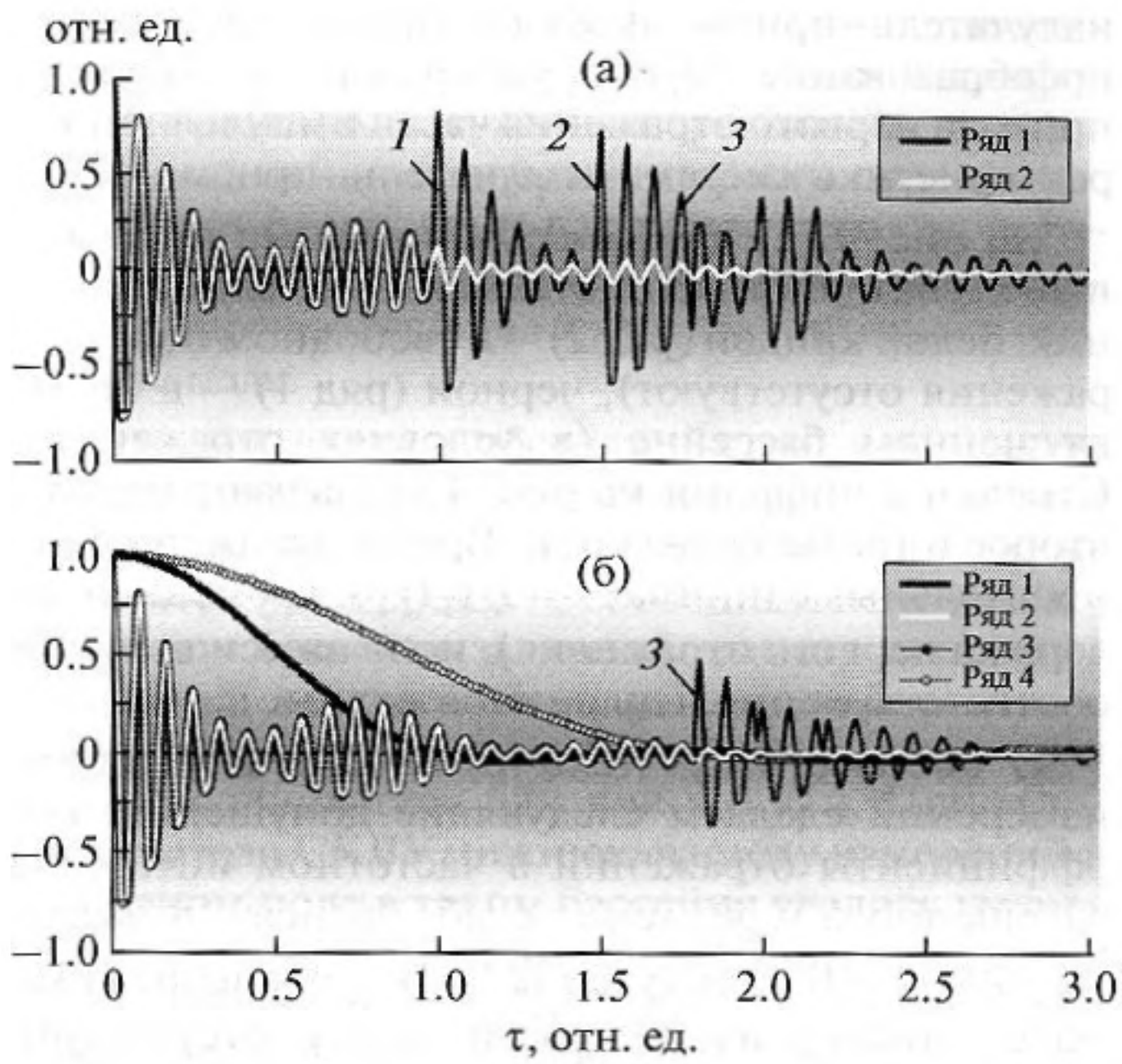

Рис. 4.

импульсной характеристики из исходной импульсной характеристики системы излучатель-приемник–отражения. Спектрометрия и вычитание функций отражений, а также узкие кепстры функций отражений (поскольку в методе СКВУ исходная частотная зависимость рассматривается в частотных интервалах Δf_{wa}) отличают предложенный подход от способа устранения эхо-сигналов, основанного на редактировании (усечении по времени, предшествующему приходу первого отражения) комплексного кепстра лифтром с характеристикой типа функции Ханнинга [5]. По сути, в результате такого вычитания импульсная характеристика системы не усекается, а "освобождается" от первого и второго отражений (это показано рядом 1 на рис. 4 (б)), что позволяет дополнительно учесть часть импульсной характеристики, скрытую первым и вторым отражениями.

Применение к зависимости $\dot{Z}'_{PH}(f) - \dot{Z}_{PH}(f) \times \times (\dot{\Omega}_{ref,\,1}(f) + \dot{\Omega}_{ref,\,2}(f))$ СКВУ (второе применение), реализующего режектирующий пространственный фильтр с характеристикой, рассчитанной на подавление влияния третьего (и последующих) отражений (ряд 4 на рис. 4 (б)), значительно ослабляет влияние оставшихся отражений. При рассмотрении характеристик пространственных фильтров ось относительных временных задержек τ на рис. 4 (б) следует понимать, как ось относительных квефренций.

Полученной (вторым применением СКВУ) частотной зависимости во временной области соответствует более полная импульсная характеристика, усеченная по времени прихода третьего отражения. Экспериментально установлено, что повторное использование полученной частотной зависимости для расчета суммы функций отражений и следующих за этим операций позволяет улучшить оценку искомой характеристики $\dot{Z}_{PH}(f)$. Изложенную процедуру можно применять для всех отражений с известными задержками. Возможность повышения разрешающей способности метода СКВУ при оценке искомой частотной характеристики (уменьшение частотного интервала бассейна) ограничена полнотой данных о временных задержках отражений. Результат повторного применения СКВУ совместно со спектрометрией функций отражений продемонстрирован рядом 4 на выноске (б) рис. 3. Применение процедуры позволяет не только восстанавливать изломы характеристики системы излучатель–приемник в свободном поле в коротких интервалах частот, но и расширить частотный диапазон измерений как в область высоких, так и низких частот с 6.3 до 2.5 кГц в бассейне 2, и с 200–250 до 100 Гц в бассейне 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если в тонально-импульсном методе измерений импульсную характеристику $h_{PH}(\tau)$ ($h_{PH}(\tau) = 0$ для $\tau < 0$) системы излучатель–приемник с отличным от нуля временем затухания переходного процесса τ_{PH} в моменты времени t от начала приема до прихода первого отраженного сигнала рассматривать как усеченную прямоугольной функцией $\Pi(\tau - t)$ [5] (т.е. на временном интервале от 0 до t), а входной сигнал единичной амплитуды с частотой f_0 рассматривать как комплексный гармонический сигнал бесконечной длительности, то для момента времени t частотный отклик системы можно выразить сверткой

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \dot{Z}_{PH}(f')\dot{\xi}(f - f', t)\, df',$$

где $\dot{\xi}(f,t) = \dfrac{\sin(\pi f t)}{\pi f}\exp[-j\pi f t]$, а амплитуду выходного сигнала $\dot{Y}(f_0,t)$ представить выражением

$$\dot{Y}(f_0,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{Z}_{PH}(f')\dot{\xi}(f_0 - f', t)\, df'.$$

Отметим, что значения функции $\dot{Y}(f_0,t)$ становятся близкими к $\dot{Z}_{PH}(f_0) = \lim\limits_{t\to\infty}[\dot{Y}(f_0,t)]$ для t бóльших τ_{PH}.

В момент прихода первого отражения $t = \tau_1$ значение $\dot{Y}(f_0,\tau_1)$ есть результат интегрирования (взвешенного усреднения) по частоте с взвешива-

ющей функцией $\dot{\xi}(f_0 - f, \tau_1)$ частотной характеристики системы излучатель–приемник в свободном поле. Чем больше задержка первого отражения, тем меньше влияние усреднения и значение $\dot{Y}(f_0, \tau_1)$ ближе к значению $\dot{Z}_{PH}(f_0)$. Для $f_0 > 1/\tau_1$ интервал этого усреднения можно оценить как $1/\tau_1$ (половина частотного интервала между ближайшими к f_0 нулями взвешивающей функции $\dot{\xi}(f_0 - f, \tau_1)$ [5]).

Нетрудно проверить, что при оценивании амплитуды в тонально-импульсном методе по n периодам "установившейся" части выходного сигнала приемника частотный интервал взвешенного усреднения, оцениваемый по нулям соответствующей взвешивающей функции, не только превышает $1/\tau_1$, но и приобретает зависимость от частоты f_0. В методе СКВУ частотный интервал усреднения не зависит от частоты измерений и может быть оценен как $1/\tau_1$ [1].

Влияние усреднения на искажения искомой частотной зависимости в методе СКВУ определяется соотношением между временем затухания переходного процесса τ_{PH} в системе излучатель–приемник (в свободном поле) и временем задержки первого отражения в измерительном бассейне. При $\tau_{PH}/\tau_1 \ll 1$ частотная характеристика системы, получаемая как методом СКВУ (характеристика пространственного фильтра представлена на рис. 4 (б) рядом 3), так и тонально-импульсным излучением, близка к характеристике в свободном поле. При $\tau_{PH}/\tau_1 \leq 1$ к характеристике, получаемой методом СКВУ, необходимо применять деконволюцию для коррекции в области резонансов, ширина которых превышает частотный интервал усреднения (бассейна). Для реальных гидрофонов типично, что ширина резонанса пропорциональна его частоте. С уменьшением частоты резонанса ширина резонанса становится меньше частотного интервала усреднения (бассейна), который от частоты не зависит. При $\tau_{PH}/\tau_1 > 1$ получаемая частотная характеристика оказывается существенно сглаженной и деконволюция не приводит к желаемому улучшению характеристики. В этой ситуации частотную характеристику удается определить в режиме "лупы", который позволяет повысить частотное разрешение метода СКВУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаев А.Е., Матвеев А.Н.* Два подхода к градуировке гидрофонов по полю при непрерывном излучении в не заглушенном бассейне // Измер. техн. 2008. № 12. С. 47–51.
2. *Исаев А.Е., Матвеев А.Н.* Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 2. С. 1–10.
3. CEI/IEC 60565:2006. Underwater acoustics – hydrophones – calibration in the frequency range 0.01 Hz to 1 MHz. International Electrotechnical Commission. Geneva. Switzerland. 2006.
4. *Исаев А.Е. и др.* Снижение погрешности градуировки гидрофонов в свободном поле методом взаимности в гидроакустическом бассейне // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 5. С. 628–637.
5. *Рандалл Р.Б.* Частотный анализ. Дания: Брюль и Къер, 1989. 389 с.