

ГРАДУИРОВКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ БАСЕЙНА

А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, А.М. Поликарпов, И.В. Черников

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.,
e-mail: isaev@vniiftri.ru, e-mail: akustika@vniiftri.ru.

Рассматривается метод подавления реверберационных искажений спектра (формы) принимаемого сигнала, основанный на использовании передаточной функции бассейна. Передаточную функцию для заданного расположения излучателя и приемника в бассейне получают комплексным делением частотной зависимости передаточного импеданса пары излучатель-приемник в реверберационном шумовом поле на результат обработки этой частотной зависимости по методу скользящего комплексного взвешенного усреднения. Обсуждаются результаты экспериментов по подавлению реверберационных искажений спектра и формы стационарного и импульсного шумового сигналов.

Ключевые слова: гидроакустический приёмник, градуировка, реверберационное звуковое поле, шумовой сигнал, полоса частот, импульс.

Умный не задает вопросов, но размышляет,
постигая тем самым суть вещей...

Восточная мудрость

Введение

На базе создаваемого во ФГУП «ВНИИФТРИ» многофункционального метрологического бассейна в период до 2020 г. будут реконструированы и технически перевооружены государственные эталоны единиц гидроакустических и гидрофизических величин, а также выполнены мероприятия, направленные на повышение научно-технического уровня государственных эталонов, повышение точности, расширение возможностей и оптимизацию эталонной базы страны с целью не допустить отставания России в области гидроакустических измерений.

В многофункциональном бассейне планируется разместить и эксплуатировать не менее десяти эталонных измерительных, исследовательских и испытательных установок нового поколения. Эталонные установки для градуировки рабочих гидроакустических средств измерений, исследований влияния конструкции носителя на характеристики гидроакустической измерительной системы, моделирования измерений параметров гидроакустического поля объектов предусматривают излучение и прием шумового сигнала. Выполнение таких измерений обуславливает высокие требования к реализации условий свободного поля в многофункциональном бассейне.

Строительство безэховой камеры остается сегодня единственным общепризнанным методом реализации свободного поля, поскольку считается, что

Альманах современной метрологии, 2015, №4

звуковое поле в безэховой камере полностью соответствует определению свободного звукового поля [1, 2]. Современные технологии и звукопоглощающие покрытия обеспечивают высокое (до 99 % и выше) подавление реверберации в воздушной акустической камере, что вполне удовлетворяет требованиям градуировки акустических приемников и позволяет применять при градуировке в камере прямые измерения сигналов любого вида.

В противоположность воздушной акустике достигнуть приемлемого звукопоглощения в лабораторном бассейне (с точки зрения современных требований к точности градуировки гидроакустического приемника) не удастся. Значительная остаточная реверберация заставляет рассматривать реализацию условий свободного поля при градуировке в бассейне не как совокупность мер (например, инженерно-строительных при возведении заглушенных камер), направленных на собственно обеспечение свободного звукового поля в соответствии с его определением, но как реализацию таких условий, при которых результат градуировки можно рассматривать как чувствительность приемника в свободном звуковом поле.

При мониторинге подводного звука в качестве рабочих средств измерений используют гидроакустические рекордеры, способные автономно осуществлять непрерывную запись акустического сигнала в течение продолжительного времени: RUDAR™ (Cetacean Research Technology), EA-SDA14 (RTSYS), SM2M (Wildlife Acoustics, Inc.), AURAL M2 (Multi-Electronique Inc.) и т. д. На рис. 1-3 приведены, соответственно: автономный гидроакустический рекордер AURAL M2, его частотная характеристика чувствительности и характеристики направленности.



Рис. 1. Автономный подводный регистратор акустического сигнала AURAL M2 компании «Multi-Electronique»

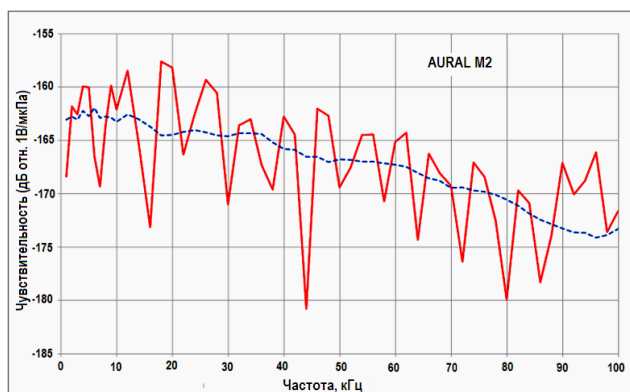


Рис. 2. Частотная характеристика чувствительности рекордера AURAL M2
(данные НФЛ Великобритании)

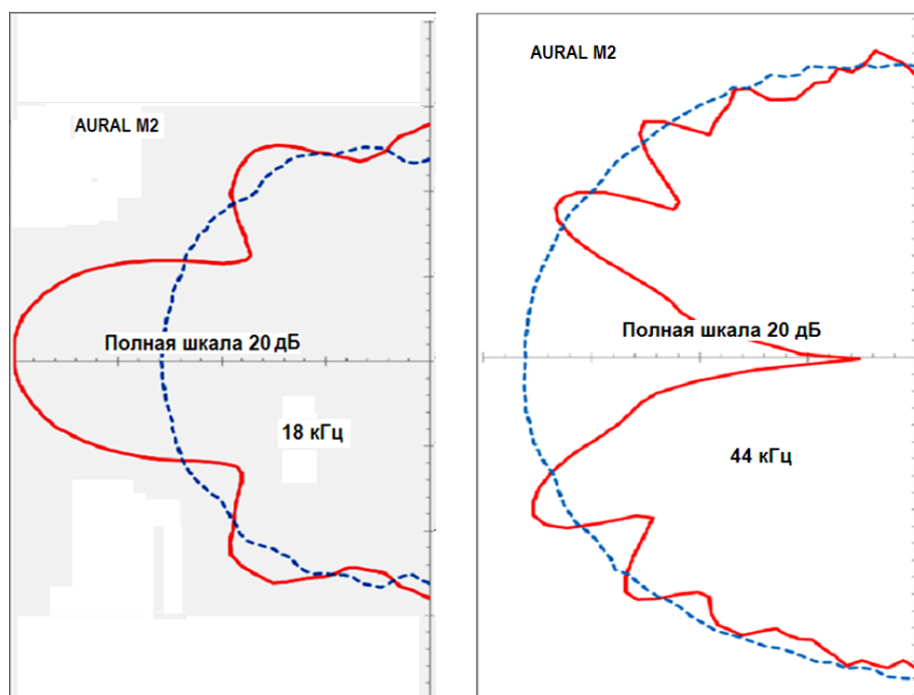


Рис. 3 Характеристики направленности рекордера AURAL M2
(данные НФЛ Великобритании)

Схематичное изображение экспериментального образца отечественного гидроакустического измерительного модуля МГИ 300 и его характеристики направленности представлены соответственно на рис. 4, 5.

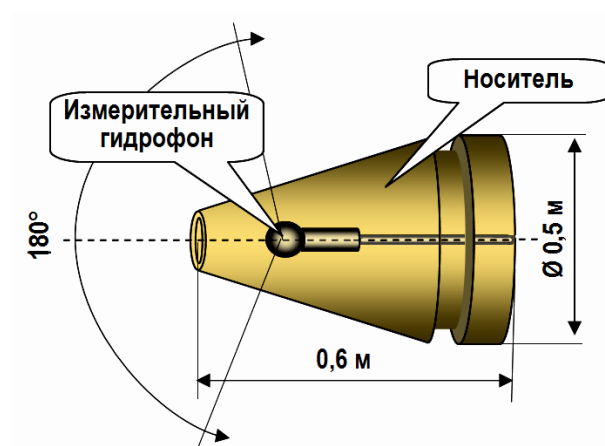


Рис. 4 Экспериментальный образец гидроакустического измерительного модуля МГИ 300

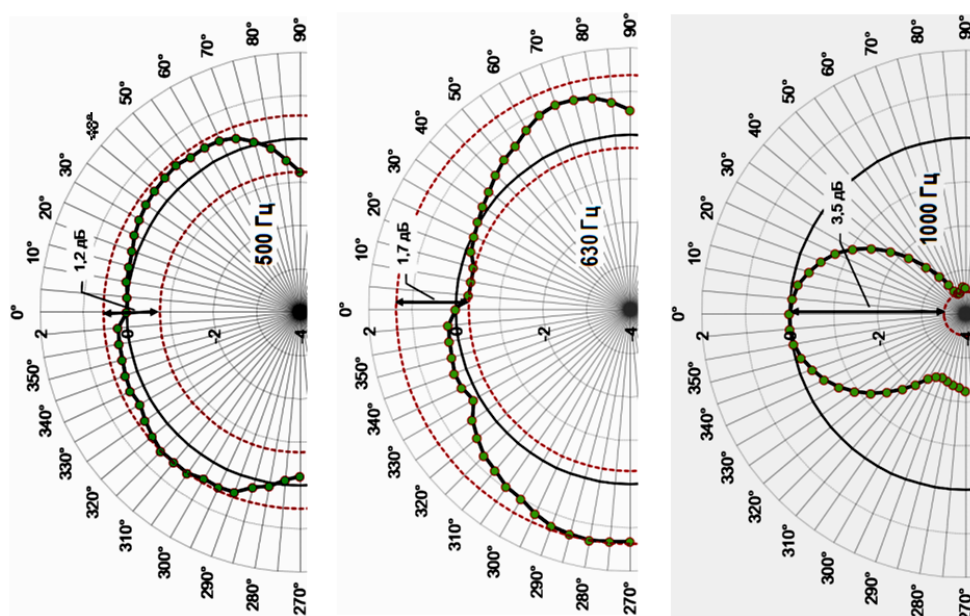


Рис. 5. Характеристики направленности МГИ 300

И зарубежным рекордерам и отечественному измерительному модулю свойственны изрезанность частотных характеристик чувствительности и большая неравномерность характеристик направленности. Использование этих характеристик при измерениях подводного шума в натурных условиях дает недопустимо завышенную оценку погрешности результата [3-6]. Более

того, чем точнее измерены характеристики, тем более точно по ним можно дать лишь численные оценки несовершенства конструкции гидроакустического приемника. В такой ситуации наиболее целесообразным является использование для градуировки приемника шумового сигнала, подобного измеряемому при использовании приемника по назначению.

Проиллюстрируем изложенное на примере рекордера. Значение уровня подводного шума получают как разность уровней СКЗ напряжения на выходе $1/3$ октавного фильтра и чувствительности рекордера на центральной частоте $1/3$ октавной полосы. Кривыми красного цвета на рис. 2 и 3 изображены характеристики, полученные в результате традиционной градуировки рекордера на гармонических сигналах с шагом $1/12$ октавы. Для $1/3$ октавной полосы частоты 44 кГц уровень чувствительности приемника равен -181 дБ. При этом дополнительный вклад в оценку неопределенности будет вносить неравномерность характеристики направленности рекордера на частоте 44 кГц, которая составляет 17,5 дБ, что неприемлемо с точки зрения современных требований к точности измерений подводного шума. Кривыми синего цвета на рисунках изображены частотная характеристика уровня чувствительности и характеристики направленности рекордера в $1/3$ октавных полосах. В [7] такие характеристики были получены по набору непрерывных частотных характеристик, измеренных при излучении ЛЧМ сигнала. По поведению кривой синего цвета нетрудно убедиться, что неравномерность характеристики направленности рекордера в $1/3$ октавной полосе с центральной частотой 44 кГц составляет немногим более 2 дБ, что может быть приемлемым для измерений шумности корабля по классу «В». Обратим внимание на то, что значение уровня подводного шума при использовании чувствительности в $1/3$ октавной полосе частот изменится на 14 дБ.

Оказывается, что тем же самым рекордером, с далекими от идеала свойствами, можно выполнить измерения гораздо точнее. Другими словами, изначально далекое от совершенства средство измерений можно перевести в разряд высокоточных с помощью «правильной» его градуировки. Для этого, в соответствии с правилами метрологии, градуировать гидроакустический приемник следует применительно к тому сигналу, который предполагается измерять.

Дальнейшего повышения точности можно было бы достичь за счет использования при градуировке рекордера шумового сигнала, идентичного или аналогичного измеряемому в натурных условиях. При этом удастся исключить погрешности расчетного метода, в том числе связанные с отличием характеристик пропускания реальных фильтров от П-образных, отклонением эффективной полосы пропускания фильтра от номинальной, неравномерностью спектра измеряемого шума в полосе пропускания фильтра.

Сегодня при измерениях подводного шума требуется измерять не только

уровни в 1/3 октавных полосах, но и пиковые (пик-пиковые) значения сигнала (например, морского копра). Это ставит как перед конструкторами гидроакустических приемников, так и перед метрологами новые задачи. Одна из них это выявление источников и оценка их вкладов в погрешность измерения пикового значения на этапах создания и испытаний гидроакустического шумомера. Отсутствие стандартизованных конструкций гидроакустических шумомеров и методов испытаний обуславливают необходимость использовать в исследовательских целях реальные шумовые сигналы, в том числе импульсный звук.

Широкополосный прием требуется не только для измерений пиковых (пик-пиковых) значений, но и для измерения экспозиции звукового события, что также предусмотрено в стандартах, разрабатываемых сегодня ISO. В настоящее время единственной возможностью получить количественные оценки погрешности измерения экспозиции рекордером, характеристики которого представлены выше, является градуировка рекордера на сигнале, максимально близком к импульсному звуку морского копра.

До настоящего времени основным препятствием использования этого подхода является отсутствие возможности для градуировки гидроакустического шумомера в лабораторном бассейне при излучении шумового сигнала заданного вида. Выполнению такой градуировки препятствует реверберация звука в бассейне, которая искажает как форму, так и спектр принимаемого сигнала.

Недостаточная эффективность звукопоглощающих покрытий и использование для градуировки широкополосного шумового сигнала, частотная селекция к которому неприменима, а временная селекция не даёт практических результатов, требуют специальных мер по борьбе с отражениями.

Изложенный в настоящей работе подход основан на излучении шумовых сигналов, приеме сигналов, искаженных реверберацией звука в бассейне, восстановлении спектра и формы сигналов в свободном поле с использованием передаточной функции бассейна (ПФБ). (Под ПФБ здесь следует понимать комплексную функцию, которая в ограниченном частотном диапазоне при заданном положении излучателя в бассейне устанавливает связь между звуковыми давлениями в свободном и реверберационном полях в точке расположения гидрофона).

Этот подход может оказаться весьма полезным для создания эталонных установок специального многофункционального метрологического бассейна ФГУП «ВНИИФТРИ».

Избыточность общепринятого определения свободного поля для задач градуировки

Теоретически не исключена возможность избавиться от влияния отражений при приеме в незаглушенном бассейне непрерывного сигнала. Наличие

полной априорной информации: точные пространственные координаты точек приема и излучения (акустических центров излучателя и приемника), число значимых отражений, известная пространственная структура либо значения временных задержек отражений, известные коэффициенты отражений и т.д. - позволяет построить математическую модель системы излучатель-реверберация-приемник. При этом возможно использовать, например, функцию Грина, которая имеет простой физический смысл поля, создаваемого точечными источниками, и описывает распространение возмущения из точки, где расположен источник, в произвольно заданную точку. Математически функцию Грина определяют из решения волнового уравнения с неоднородностью в виде δ -функции Дирака (дельта-источник). При этом решение волнового уравнения с заданной правой частью имеет вид интеграла типа свертка, в котором функция Грина играет роль, аналогичную импульсной переходной функции из теории линейных стационарных систем [8].

Примером попытки построить исчерпывающую модель реверберационного звукового поля в бассейне с отражающими границами может служить модель звукового поля в измерительном бассейне физического факультета МГУ [9]. Точные измерения подразумевают использование точной модели поля. Потребовались трудоемкие и сложные эксперименты, чтобы получить исходные данные, достаточные для того, чтобы попытаться эту модель параметризовать, и еще более сложные для того, чтобы проверить качество и применимость модели для измерений по полю, количественно оценить точность результата. Эффективно применить полученное описание не удалось даже для узкого класса гармонических сигналов.

Функцию Грина пытались построить на основе информации об отражающих свойствах материалов стенок бассейна и лучевой картины распространения звуковых волн. Решения такого рода не получили практического выхода, поскольку исходная информация оказывается существенно неполной и неточной. Например, создание лучевой картины требует знания направленности преобразователей на всех частотах, что равносильно знанию искомым частотных характеристик. Подобные решения «в лоб» до сих пор не удалось довести до практически приемлемых результатов. Насколько сложны исчерпывающая модель и задача ее получения будет показано в настоящей работе на примере полученной экспериментально передаточной функции гидроакустического бассейна ГЭТ 55-2011.

В соответствии с общепринятым определением свободное звуковое поле - это звуковое поле в однородной изотропной среде, границы которой оказывают пренебрежимо малое действие на звуковые волны. Поле звуковой волны, как физическое явление, существует во времени и пространстве. Свободное звуковое поле означает бесконечные пределы времени и пространства. В общепринятом определении явно присутствует только пространство с

его границами. То, что воздействие границ должно быть пренебрежимо малым всегда, то есть на бесконечном интервале времени, присутствует в определении неявно. Бесконечность пространства, в силу неразрывной связи пространства и времени (в контексте - времени измерений), означает бесконечное время измерения, следовательно, сколь угодно высокое разрешение по частоте. И наоборот, конечное время измерений (например, конечная продолжительность Δt приемного строка в методе временной селекции) в силу частотно-временного соотношения неопределенностей означает, что разрешение по частоте при измерениях не может быть лучше, чем $\Delta f \geq 1/\Delta t$.

Для задачи градуировки требования общепринятого определения избыточны. Измерительный бассейн - это не оперный зал, где качество звукового поля должно быть обеспечено в каждой точке пространства согласно купленному билету. В соответствии с определением чувствительности «по свободному полю» [10] при градуировке акустического приемника интерес представляет звуковое давление не во всем окружающем приемник пространстве, а лишь в локальной его области в окрестности точки приема - месте расположения приемника, то есть только для «одного зрителя».

Бесконечная протяженность поля означает возможность расположить приемник на сколь угодно большом расстоянии от излучателя, обеспечивая условия дальнего поля при градуировке приемника больших размеров. Если условие первое - бесконечное время существования свободного поля в точке приема безэховая камера обеспечивает, то возможность расположить приемник в дальнем поле (условие второе) ограничена размерами рабочей зоны камеры. Отсюда вытекает требование: падающая на приемник звуковая волна должна быть не плоской вообще, а локально плоской (плоской на размере приемника), которое определяет размеры камеры и верхнюю частоту градуировки в камере по свободному полю.

Градуировку акустического приемника нельзя рассматривать в отрыве от свойств эталонной установки, излучателя и самого градуируемого преобразователя, т. е. свойств всей совокупности элементов, участвующих в процедуре градуировки и определяющих реальные электроакустические условия измерений. Учет этих свойств может накладывать дополнительные ограничения либо ослаблять требования к свободному полю в эксперименте. Требование бесконечно большого времени измерения избыточно так же, как и требование бесконечности пространства хотя бы потому, что противоречит практической целесообразности эксперимента, неограниченного по времени. Для градуировки гидроакустического приемника по свободному полю в бассейне с отражающими границами вполне достаточно, чтобы запаздывание Δt отраженных волн относительно прямой волны в точке приема превосходило время установления сигнала ΔT в системе эталонная установка – излу-

чатель – приемник.

Ограничение на запаздывание отраженной волны обычно воспринимают как ограничение времени прямых измерений по свободному полю методом временной селекции. В данном контексте его смысловая нагрузка шире: запаздывание отражений должно быть большим настолько, чтобы минимизировать искажения частотной зависимости ПИ излучатель – приемник по свободному полю, обусловленные ограничением, вытекающим из частотно-временного соотношения неопределенностей.

В настоящей работе в качестве практических критериев свободного поля при градуировке гидроакустического приемника принято выполнение условий: запаздывание отраженных звуковых волн относительно прямой волны излучателя в месте расположения приемника (а не во всех точках бассейна), не превосходящее время установления сигнала в системе эталонная установка – излучатель – приемник, падающая на приемник прямая волна излучателя локально плоская на размере приемника.

В противоположность общепринятому подходу к обеспечению условий свободного поля при градуировке, предложенный в работе подход заключается не в исчерпывающем описании звукового поля, а в использовании сокращенной (частной) модели звукового поля в бассейне, справедливой всего лишь для двух точек, задающих расположение в бассейне излучателя и приемника. Такое сокращение описания в ущерб его «универсальности» позволяет:

- представить излучатель и приемник в реверберационном звуковом поле бассейна линейным четырехполосником [5];
- применить хорошо изученный математический аппарат передаточных функций для подавления реверберационных искажений спектра (формы) сигнала излучателя с приемлемым для градуировки качеством;
- решать поставленную измерительную задачу – градуировку гидроакустического приемника на сигнале заданной формы.

Четырехполосная модель пары излучатель-приемник в реверберационном звуковом поле лабораторного бассейна

До появления метода СКВУ понятие передаточного импеданса (ПИ) применительно к задаче градуировки гидрофона главным образом использовали в методе взаимности, который основан на свойствах обратимого четырехполосника [10].

Отличие условий измерений в бассейне от безэховой камеры можно представить добавлением к прямой волне в точке приема волн, отраженных границами бассейна (см. рис. 6).

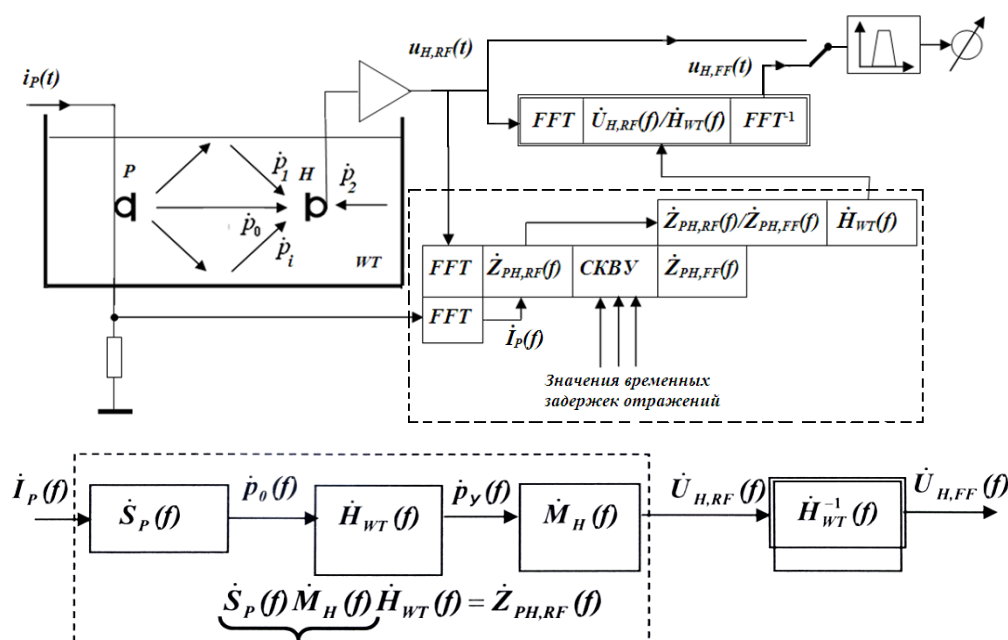


Рис. 6. Система излучатель-приемник в реверберационном звуковом поле бассейна

При градуировке в бассейне систему излучатель-приемник можно рассматривать как четырехполюсник, состоящий из трех последовательно включенных линейных элементов: излучателя, бассейна и приемника. Входом и выходом четырехполюсника являются соответственно ток излучателя $i_p(t)$ с комплексной амплитудой $\dot{I}_p(f)$ и выходное напряжение приемника $u_{H,RF}(t)$ с комплексной амплитудой $\dot{U}_{H,RF}(f)$. Каждый элемент будем характеризовать своей комплексной передаточной функцией. Излучатель P – чувствительностью $\dot{S}_p(f)$, бассейн WT – передаточной функцией звукового давления $\dot{H}_{WT}(f)$, приемник H – чувствительностью $\dot{M}_H(f)$.

Градуировка в свободном поле основана на измерении ПИ пары излучатель-приемник в условиях распространения прямой волны. Далее полагаем, что этой ситуации соответствует единичная передаточная функция $\dot{H}_{WT}(f)$.

При измерениях в бассейне $\dot{H}_{WT}(f)$ никогда не равна единице. В этих условиях традиционный подход к решению задачи градуировки по свободному полю предполагает такое построение измерительной процедуры, чтобы обеспечивалась близость $\dot{H}_{WT}(f)$ к единице. Отличие подхода, предлагаемого в настоящей работе, состоит в том, что измеряют саму $\dot{H}_{WT}(f)$, кото-

рую затем используют, чтобы обеспечить при измерениях условия свободного поля.

Передаточную функцию звукового давления с учетом отражений определим как отношение звуковых давлений в точке приема: суммарного звукового давления прямой и отраженных волн $\dot{p}_\Sigma(f) = \dot{p}_0 + \sum_i \dot{p}_i(f)$ и звукового

давления $\dot{p}_0(f)$ прямой волны $\dot{H}_{WT}(f) = \frac{\dot{p}_\Sigma(f)}{\dot{p}_0(f)}$. ПИ пары излучатель-

приемник в реверберационном звуковом поле бассейна

$\dot{Z}_{PH,RF}(f) = \frac{\dot{U}_{H,RF}(f)}{\dot{I}_P(f)}$ представим произведением передаточных функций

излучателя, приемника и передаточной функции звукового давления в бассейне $\dot{S}_P(f)\dot{M}_H(f)\dot{H}_{WT}(f)$. Напомним, что произведение $\dot{S}_P(f)\dot{M}_H(f)$ есть

ПИ пары излучатель-приемник в свободном поле $\dot{Z}_{PH,FF}(f)$. Таким образом,

ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном звуковом поле может быть представлен произведением ПИ пары в свободном поле на передаточную функцию звукового давления в бассейне:

$$\dot{Z}_{PH,RF}(f) = \dot{Z}_{PH,FF}(f)\dot{H}_{WT}(f). \quad (1)$$

В дальнейшем для краткости передаточную функцию звукового давления в бассейне будем называть передаточной функцией бассейна (ПФБ). В пред-

положении, что коэффициенты отражения $\frac{\dot{p}_i(f)}{\dot{p}_0(f)}$ не зависят от частоты и

равны единице, а амплитуда звукового давления в отраженной волне не зависит от разности хода Δr_i , ПФБ можно упрощенно представить через фазовые задержки для разности хода прямой и отраженных волн в виде [5]:

$$\dot{H}_{WT}(f) = 1 + \sum_{i=1}^n \exp[-jk\Delta r_i],$$

где $k=2\pi f/c$ – волновое число.

Выражение (1) устанавливает связь ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном и свободном полях и позволяет получать ПИ пары излучатель-приемник в свободном поле по формуле:

$$\dot{Z}_{PH,FF}(f) = \frac{\dot{Z}_{PH,RF}(f)}{\dot{H}_{WT}(f)}.$$

Несмотря на всю привлекательность полученного выражения, которое позволяет переходить от четырехполюсной модели пары излучатель-приемник в реверберационном поле к четырехполюсной модели пары в свободном поле, аналитически либо экспериментально получить ПФБ, пред-

ставляющую практическую ценность для метрологических задач, до настоящего времени не удавалось.

При заданном расположении излучателя и приемника в бассейне не составляет труда получить значение ПФБ на частоте. На рис. 7 а приведена осциллограмма выходного напряжения приемника в реверберационном звуковом поле тонального сигнала с частотой f продолжительностью 6 мс от момента начала приема. Если напряжение на выходе приемника регистрировать продолжительное время, то осциллограмма будет иметь вид, изображенный на рис. 7 б. Осциллограммы показывают выходное напряжение, предшествующее отражениям (свободное от реверберационных искажений), и искаженное реверберацией звука в режимах неустановившегося и установившегося приема реверберационного сигнала.

Осциллограммы имеют два участка установившегося напряжения. Первый на рис. 7 а с амплитудой $\dot{U}_{H,FF}(f)$ – непосредственно предшествующий приходу отражений, второй на рис. 7 б с амплитудой $\dot{U}_{H,RF}(f)$ начинается по истечении времени реверберации бассейна.

На рис. 8 комплексные амплитуды $\dot{U}_{H,FF}(f)$ и $\dot{U}_{H,RF}(f)$ представлены в виде векторной диаграммы. Вектором $\dot{U}_{\Sigma}(f)$ на диаграмме обозначен суммарный вклад реверберационных составляющих в выходное напряжение, соответствующее прямому сигналу излучателя.

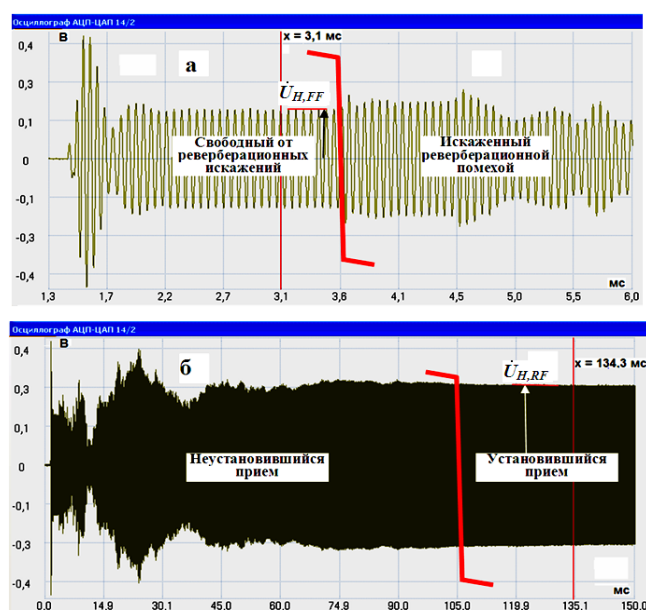


Рис. 7. Осциллограммы выходного напряжения приемника в незаглушенном бассейне

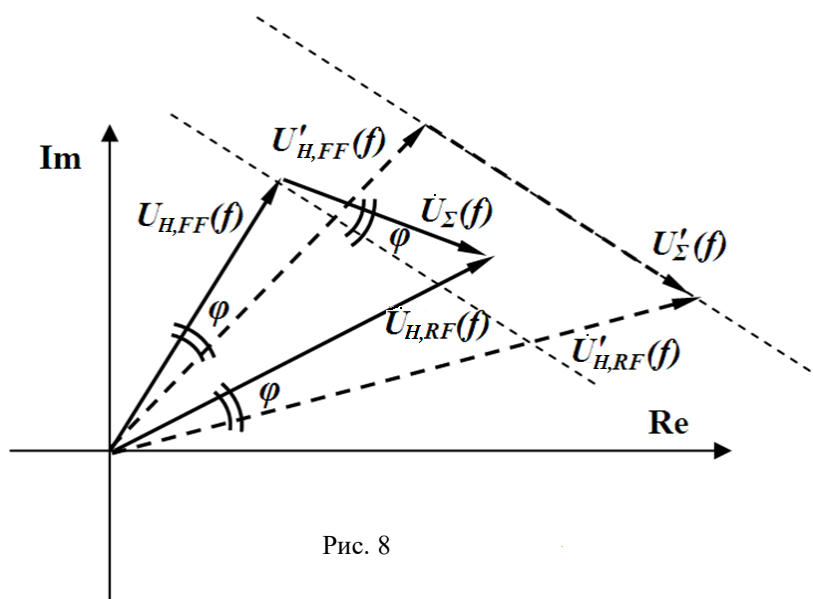


Рис. 8

С помощью несложного эксперимента можно убедиться, что при изменении амплитуды и фазы тока через излучатель векторная диаграмма повернется на угол φ , равный изменению фазы тока, а длины векторов $\dot{U}'_{H,FF}(f)$, $\dot{U}'_{H,RF}(f)$ и $\dot{U}'_{\Sigma}(f)$ изменятся пропорционально изменению амплитуды тока.

Из свойств подобия треугольников на диаграмме получим значение ПФБ на частоте f :

$$\frac{\dot{U}_{H,RF}(f)}{\dot{U}_{H,FF}(f)} = \dot{H}_{WT}(f). \quad (2)$$

Разделив числитель и знаменатель левой части формулы на ток излучателя, получим выражение для вычисления ПФБ через ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном и свободном звуковых полях:

$$\frac{\dot{Z}_{PH,RF}(f)}{\dot{Z}_{PH,FF}(f)} = \dot{H}_{WT}(f).$$

Рассматривая аргумент f в полученном выражении как переменную, получаем частотную зависимость безразмерной комплексной функции частоты $\dot{H}_{WT}(f)$.

Обратим внимание на то, что, казалось бы, формальный с точки зрения математики переход от фиксированной частоты к частотной зависимости дает качественный скачок для практики – появляется возможность использовать ПФБ при излучении и приеме различных широкополосных сигналов.

Возвращаясь к формуле (2) и рассматривая числитель и знаменатель не как зависимости от частоты, а как спектры напряжений, получим выраже-

Альманах современной метрологии, 2015, №4

ние, позволяющее получать комплексный спектр выходного напряжения приемника в свободном поле по комплексному спектру напряжения в реверберационном поле:

$$\dot{U}_{H,FF}(f) = \frac{\dot{U}_{H,RF}(f)}{\dot{H}_{WT}(f)}.$$

Отметим следующие ограничения использования сокращенной четырех-полюсной модели. Полученное выражение справедливо:

- только для установившегося режима приема сигналов в реверберационном и свободном звуковых полях;
- только при том расположении излучателя и приемника в бассейне, при котором была измерена ПФБ.

Если изменить положение хотя бы одного из преобразователей, ПФБ изменится, что приводит к необходимости перед началом измерений с использованием ПФБ заново выполнить эксперимент по ее определению.

Экспериментальное определение передаточной функции бассейна

ПФБ, как передаточная функция линейной системы, обладает замечательным свойством: измерив напряжение на выходе системы и зная передаточную функцию, можно определить не только напряжение, но и форму входного сигнала. Таким образом, задача восстановления формы сигнала, искаженного реверберацией в бассейне, сводится к задаче получения ПФБ надлежащего качества.

Отметим принципиальное ограничение метода, связанное с излучателем, приемником и их расположением в бассейне заданных размеров. Как было упомянуто выше при обсуждении практических критериев свободного поля при градуировке, время установления сигнала в системе излучатель-приемник не должно превышать временную задержку Δt отражения относительно прямого сигнала излучателя. В этом случае преобразование Фурье комплексной частотной зависимости ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном поле удастся разделить на две непересекающиеся квазивременные зависимости, из которых зависимость, соответствующая ПИ пары в свободном поле, будет лежать левее, а другая, соответствующая ПФБ, правее значения Δt .

На первый взгляд, решение задачи получения ПФБ очевидно: выделить ПФБ из функции ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном поле. Для этого можно измерить ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном и свободном полях, разделить ПИ в реверберационном поле на ПИ в свободном поле, частное от деления даст ПФБ.

Рассмотренный выше пример с гармоническим сигналом на рис. 7 показывает возможность определять значения ПФБ для отдельных частот. Но в результате такого эксперимента получим либо практически бесполезный для решения обратной задачи набор значений ПФБ на отдельных частотах, либо

выполнение эксперимента с необходимой подробностью по частоте потребует таких неприемлемых затрат времени, при которых условия эксперимента неизбежно изменятся.

Поясним сказанное на примере. Восстановление формы сигнала по его комплексному спектру предполагает, что ПФБ известна для всех компонент спектрального представления сигнала. Для восстановления формы сигнала на участке длительностью ΔT_c , представленного отсчетами с шагом $\Delta t_{кВ}$, по спектру, полученному с помощью быстрого преобразования Фурье, ПФБ должна быть известна на частотах кратных $1/\Delta T_c$ в частотном интервале от 0 до $1/(2\Delta t_{кВ})$. Для $\Delta T_c = 100$ мс и $\Delta t_{кВ} = 2 \cdot 10^{-6}$ с число отсчетов ПФБ составляет 25000.

Приведенный пример со всей очевидностью показывает, что получение ПФБ требует значительных объемов измерительной информации, обеспечить которые с использованием гармонического сигнала невозможно. Это делает актуальным применение современных методов измерений с использованием широкополосных сигналов.

Измерения передаточного импеданса пары излучатель-приемник в реверберационном звуковом поле

Проблемы, возникающие при измерениях ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном звуковом поле, проанализируем на примерах методов измерений, получивших распространение в метрологической практике и схематично представленных на рис. 9.

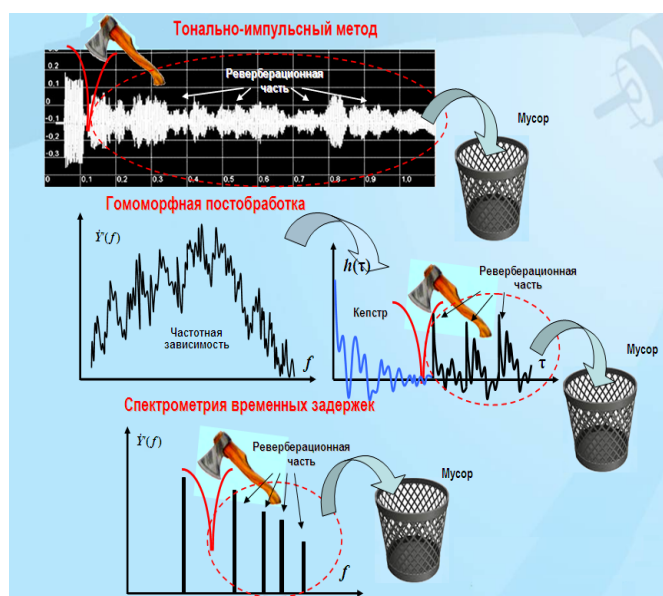


Рис. 9. Методы измерений, применяемые для градуировки акустических приемников

Временная селекция тонального импульса

При использовании временной селекции выходной сигнал приемника вынужденно обрывают по времени прихода первого отражения τ_{ref} , усекая принятый тональный сигнал прямоугольным временным окном. Для измерений амплитуды оказывается доступным лишь свободный от отражений участок принятого тонального сигнала на временном интервале $t < \tau_{ref}$, предшествующем отражениям. Результатом измерений тонально-импульсным методом является только оценка ПИ в свободном поле по свободной от отражений части принятого сигнала [11]. Информация, заключенная в реверберационной части сигнала, отбрасывается, что не позволяет использовать ее для получения ПФБ. Другой недостаток (малая информативность измерений) был продемонстрирован выше при обсуждении измерений ПФБ с использованием гармонического сигнала.

Гомоморфная времяселективная постобработка (ГПО)

Подробную комплексную частотную зависимость пары измеряют в реверберационном поле помещения с отражающими стенами на гармонических сигналах [12]. К полученной таким образом искаженной отражениями частотной зависимости применяют обратное преобразование Фурье, переходя из частотной области в квазивременную область временных задержек – квефренций. Полученный кепстр представляет собой последовательность из искомой импульсной характеристики пары излучатель-приемник в свободном поле и сдвинутых относительно нее по оси квефренций в порядке прихода отражений в точку приема копий импульсной характеристики.

Полученный кепстр усекают окном по квефренции $\tau_q < \tau_{ref}$, оставляя незануленной свободную от отражений часть исходного кепстра. Частотную зависимость ПИ в свободном поле получают прямым преобразованием Фурье усеченного кепстра. Использованию метода ГПО для измерения ПФБ препятствуют чрезмерная продолжительность измерений подробных частотных зависимостей на гармонических сигналах и необходимость сохранять в процессе эксперимента гомоморфность постобработки.

Последнее требование означает необходимость выполнять измерения в частотном диапазоне, далеко простирающемся за границы рабочего диапазона излучателя и приемника как в сторону низких, так и в сторону высоких частот. При этом, чтобы обеспечить необходимое отношение сигнал/шум, градуировку приемника (микрофона) с использованием ГПО выполняют в звукоизолированной камере [12].

Теоретически для получения частотной зависимости, подвергаемой процедуре ГПО, можно применить широкополосный сигнал любой формы. В [13] обсуждено применение для этих целей ЛЧМ, шумового, импульсного и т.п. сигналов. Ценность работы [13] в значительной степени нивелирует оставленный авторами без внимания тот факт, что использование тестовых

сигналов различной формы не снимает проблем, связанных с нарушением гомоморфности в методе ГПО, вследствие чего практически реализовать метод оказалось сегодня возможным только с использованием гармонических сигналов.

Отсутствие звукоизолированного лабораторного бассейна не позволяет обеспечить условия для использования метода ГПО при градуировке гидроакустического приемника. Наконец, для определения ПФБ использовать метод ГПО невозможно потому, что усечением кепстра информацию, заключенную в соответствующей отражениям части кепстра, отбрасывают из рассмотрения аналогично тому, как это происходит при отбрасывании реверберационной части сигнала в тонально-импульсном методе.

Спектрометрия временных задержек (СВЗ)

Метод позволил разделять в реальном времени прямой и отраженный ЛЧМ сигналы, основываясь не на разнице их времен прихода, как в методе временной селекции тонального импульса, а на разнице их мгновенных частот [14]. Теоретически метод СВЗ позволяет получать частотную зависимость ПИ пары излучатель-приемник со сколь угодно малым шагом по частоте с несоизмеримо высокой, по сравнению с тонально импульсным методом и ГПО, производительностью. Однако это преимущество нивелируется недостаточным подавлением искажений ПИ, вызванных отражениями [15], вследствие чего сегодня СВЗ заметно уступает в точности тонально-импульсному методу.

Использованию СВЗ для получения ПФБ препятствует то обстоятельство, что в результате узкополосной фильтрации сигнала приемника (настроенной на частоту прямого ЛЧМ сигнала излучателя) информацию о реверберационной части сигнала безвозвратно утрачивают. Другой недостаток метода СВЗ применительно к определению ПФБ обусловлен нестационарностью реверберационного поля ЛЧМ сигнала.

Рассмотренные выше методы градуировки позволяют определять ПИ пары излучатель-приемник в свободном поле, но предполагают усечение сигнала во временной, квазивременной (кепстральной) либо частотной области, и отбрасывание искаженной реверберацией части сигнала, воспринимая ее как вредную помеху. Утрата информации о реверберации, заключенной в отбрасываемой части сигнала, не позволяет использовать эти методы для определения ПФБ.

Получение ПФБ с использованием метода СКВУ

Реверберационное поле ЛЧМ сигнала имеет два информативных признака, полезных для выделения сигнала прямой волны: первый - разное время прихода прямой и отраженных волн, и второй - разные мгновенные частоты прямой и отраженных волн. На использовании второго информационного

признака основан метод СВЗ.

Реверберационное поле шумового сигнала имеет только один информативный признак - разное время прихода прямой и отраженных волн. Частотная селекция к шумовому сигналу неприменима, а временная не даёт практических результатов. Реализовать селекцию по первому информативному признаку в шумовом реверберационном поле позволяет разработанный во ВНИИФТРИ метод скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) частотной зависимости ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном звуковом поле. Этот метод не зависит от вида излучаемого сигнала и формируемого им реверберационного звукового поля в лабораторном бассейне.

Неоспоримыми преимуществами метода СКВУ является минимальное, в сравнении с рассмотренными выше методами, усреднение по частоте и возможность применять обработку СКВУ к компактному фрагменту частотной зависимости, измеряемой в рабочем частотном диапазоне излучателя [5, 11].

Метод СКВУ позволил существенно повысить точность измерений по свободному полю в реверберационном поле ЛЧМ сигнала, реализовать комплексную градуировку гидрофона методом взаимности, измерить амплитудно- и фазочастотные характеристики чувствительности, исключив неоднозначность фазовых углов, исследовать смещения акустического центра, оценивать чувствительность гидроакустического приемника как к скалярной (звуковое давление), так и к векторной (градиент звукового давления) величине поля прямой звуковой волны [16]. Метрологические характеристики результатов градуировки гидроакустических приемников на ЛЧМ сигналах методом СКВУ подтверждены международными сличениями [17, 18]. Не уступая в точности тонально-импульсному методу, этот метод позволил продлить частотный диапазон градуировки гидрофона по полю в область низких частот от 3 кГц до 250 Гц в бассейне с минимальным размером 6 м.

После измерения комплексной частотной зависимости ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном поле $Z_{PH,FF}(f)$ комплексную частотную зависимость ПИ пары в свободном поле $Z_{PH,FF}(f, \Delta f_{wa})$ по методу СКВУ можно вычислить по формуле:

$$\dot{Z}_{PH,FF}(f, \Delta f_{wa}) = \frac{1}{\prod_i 1/\tau_{ref_i}} \int_{f-\Delta f_{wa}/2}^{f+\Delta f_{wa}/2} \dot{Z}_{PH,RF}(f-f') W_{WT}(f') df', \quad (3)$$

где $W_{WT}(f)$ - взвешивающая функция, Δf_{wa} - частотный интервал взвешенного усреднения, τ_{ref_i} - временная задержка i -го отражения [5].

На рис. 10 гладкими кривыми 3 представлены результаты применения

СКВУ к частотным зависимостям ПИ пары излучатель-приемник $\dot{Z}_{PH,RF}(f)$ в реверберационном поле шумового (кривая 1) и ЛЧМ (кривая 2) сигналов.

Кривые 3 практически идентичны и представляют собой модуль частотной зависимости ПИ пары излучатель-приемник в свободном поле. Отличие зависимости, представленной кривой 3, от кривых 1 и 2 позволяет охарактеризовать количественно влияние реверберационных искажений (нарушение условий свободного поля) в эксперименте в зависимости от частоты. Поделив комплексно частотную зависимость, представленную кривой 1 либо кривой 2, на частотную зависимость, представленную кривой 3, получим для точки приема при заданном положении излучателя частотные зависимости, эквивалентные $\frac{\dot{p}_{\Sigma}(f)}{\dot{p}_0(f)}$ - частотной зависимости отношения комплекс-

ных суммарного звукового давления (с учетом реверберационного вклада) и звукового давления в свободном поле. То есть частотная зависимость $\dot{Z}_{PH,RF}(f)$ оказывается разделенной на две составляющие, относящиеся к разным объектам. Одна описывает свойства пары излучатель-приемник в свободном звуковом поле, а другая описывает искажения, вносимые бассейном.

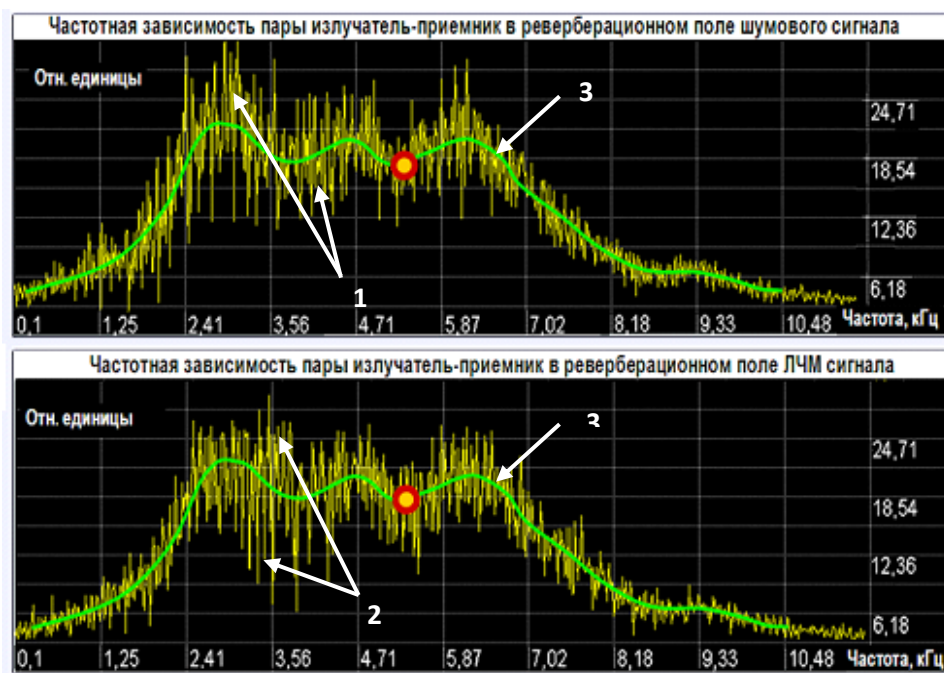


Рис. 10. Частотные зависимости ПИ пары излучатель-приемник в реверберационных полях шумового - 1 и ЛЧМ -2 сигналов и полученные обработкой этих зависимостей по методу СКВУ - 3

На глаз можно заметить, что кривые 1 и 2 различаются, следовательно, вид функции $\dot{Z}_{PH,RF}(f)$ зависит от сигнала, с помощью которого она была получена, тогда как результат применения СКВУ от способа получения $\dot{Z}_{PH,RF}(f)$ и вида сигнала не зависит. Это доказывает, что не всякое частное от деления частотной зависимости ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном поле на результат ее обработки по методу СКВУ можно применять в качестве ПФБ для решения представляющей интерес обратной задачи – восстановление сигнала, искаженного реверберацией звука.

Одним из ограничений использования четырехполюсной модели пары излучатель-приемник в реверберационном звуковом поле бассейна является установившийся режим приема. В силу нестационарности реверберационного звукового поля ЛЧМ сигнала, получить с его помощью удовлетворительный результат измерения ПФБ не удалось. Прямое применение известной реализации алгоритма ГПО [12] к реверберационной части кепстра, оставшейся после отсекающей свободной от отражений его части, не позволяет получать ПФБ приемлемого качества. Возможность использования результата применения СКВУ для вычисления ПФБ является преимуществом метода перед методом ГПО.

В статье будет показано, что для получения ПФБ наиболее подходящим оказывается реверберационное звуковое поле стационарного шумового сигнала. Излучение стационарного шума и его регистрация в установившемся режиме, накопление спектра мощности тока излучения и взаимных спектров тока и напряжения приемника для получения комплексной частотной зависимости ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном звуковом поле в сочетании с выделением из этой зависимости методом СКВУ ПИ пары в свободном поле позволяют получать ПФБ с качеством, обеспечивающим возможность восстанавливать стационарный шумовой и импульсный сигналы, искаженные реверберацией звука.

Ограничения использования ЛЧМ сигнала

Недостатки, препятствующие использованию ЛЧМ сигнала для определения ПФБ, проанализированы в [4]. На результаты, полученные с применением ЛЧМ сигнала, оказывают влияние переходные процессы в излучателе, приемнике, приемно-измерительном тракте. Погрешность измерений на ЛЧМ сигнале возрастает для резонансных преобразователей. Результат измерений в значительной степени зависит от параметров ЛЧМ сигнала, что вынуждает использовать априорную информацию о поведении измеряемой частотной зависимости. Для получения такой информации нередко требуются предварительные эксперименты, например, измерения на ЛЧМ сигнале с очень медленной скоростью изменения частоты. Акустическое поле в точ-

ке приема ЛЧМ сигнала - нестационарное реверберационное поле, поскольку мгновенные частоты прямого и отраженного ЛЧМ сигналов постоянно изменяются и никогда не совпадают. Нестационарность реверберационного поля обуславливает искажения измеряемой частотной зависимости вследствие таких, рассмотренных в [4] факторов, как нестационарное влияние отражений и несовпадение амплитудной модуляции прямой и отраженной волн.

Значимый источник погрешности при обработке ЛЧМ сигнала методом СКВУ - присутствие в измерительном тракте паразитного медленно меняющегося напряжения.

Назовем еще один недостаток, препятствующий использованию ЛЧМ сигнала для измерений ПФБ. При измерениях в реверберационном поле ЛЧМ сигнала невозможно идеальное редактирование экспериментальной частотной зависимости [16]. Эффект от редактирования уменьшается, если изменение частоты ЛЧМ сигнала за время запаздывания отражения соизмеримо с частотным интервалом значимых изменений измеряемой частотной зависимости. Необходимость подстраивать скорость изменения частоты ЛЧМ сигнала в зависимости резонансных свойств пары излучатель-приемник усложняет процедуру измерений. Если τ - время установления выходного сигнала приемника, скорость изменения частоты ЛЧМ сигнала S должна удовлетворять требованию $S\tau^2 \ll 1$. Требование справедливо для обеспечения режима установившегося приема сигнала в лабораторном бассейне лишь с тем отличием, что установление выходного сигнала приемника в реверберационном звуковом поле бассейна принято выражать через время реверберации бассейна τ_{WT} . Для большого бассейна ГЭТ 55-2011 τ_{WT} составляет 500 мс. По опыту работ в бассейне, для выбора скорости S изменения частоты ЛЧМ сигнала в качестве критерия можно использовать $S\tau_{WT}^2 \leq 0,2$. Нетрудно подсчитать, что в экспериментах по получению ПФБ ГЭТ 55-2011 скорость изменения частоты S не должна превышать 0,8 Гц/с. При этом измерения на частотах от 100 до 140 кГц с использованием 16 разрядного АЦП с частотой квантования 500 кГц потребуют не менее 14 часов, объем полученных экспериментальных данных превысит 25 Гб, а частотное разрешение измерений составит $2 \cdot 10^{-5}$ Гц.

Чтобы измерить шум судна на полигоне, используют временное окно (окно данных) продолжительностью примерно 1 с [19], что означает частотное разрешение получаемых на полигоне данных 1 Гц. Колоссальная избыточность частотного разрешения при измерениях в лабораторном бассейне по отношению к полигонным данным потребует специальной обработки лабораторных данных с тем, чтобы вначале согласовать их по частотному разрешению с полигонными, а затем проредить в пропорции пятьдесят тысяч к одному.

Сигнал для определения передаточной функции бассейна

Тонально-импульсный и ЛЧМ сигнал непригодны для измерений ПФБ из практических соображений. Об использовании случайного шума для градуировки гидрофона сообщалось еще в 1953 г. [20], однако точность метода оставляла желать лучшего и была ограничена доступными в то время возможностями математической обработки. Первые исследования применимости звукового поля в незаглушенном бассейне ВНИИФТРИ для метрологических целей были выполнены Д.З. Лопашевым в 1963 г. Используя методы архитектурной акустики, более 50 лет назад Д.З. Лопашев сделал вывод о возможности выполнять в реверберационном шумовом поле бассейна ВНИИФТРИ градуировки гидрофонов по диффузному полю с погрешностью 2,5 – 3 дБ [21].

С разработкой во ФГУП «ВНИИФТРИ» технологии измерений в реверберационном звуковом поле бассейна появилась возможность выполнять градуировку по свободному полю при излучении стационарного шумового сигнала [22]. В противоположность измерениям на ЛЧМ сигнале, разница времен прихода в точку приема прямой и отраженной шумовых волн не вызывает различий в амплитудной модуляции отраженного и прямого сигналов. При этом не снижается эффективность редактирования экспериментальной частотной зависимости и не возникает искажений искомой частотной характеристики на участках перегибов, что характерно при обработке методом СКВУ зависимостей, полученных на ЛЧМ сигнале.

Стационарный шумовой сигнал создает стационарное звуковое поле в том смысле, что состав спектральных компонент отраженных сигналов идентичен составу прямого сигнала и не меняется в течение эксперимента. При приеме шумового сигнала количество отражений, вызывающих искажения, не зависит от частоты. Это исключает присущую измерениям на ЛЧМ сигнале нестационарность искажений экспериментальной частотной зависимости, что является причиной возникновения ложных горбов и провалов при обработке экспериментальной зависимости методом СКВУ [4].

В противоположность ЛЧМ сигналу, для того, чтобы в лабораторном бассейне обеспечить установившийся режим приема стационарного шумового сигнала, достаточно задержать прием относительно начала излучения на время, равное сумме времени реверберации бассейна и времени распространения прямой звуковой волны от излучателя к приемнику. Чтобы обеспечить измерения с полигонным частотным разрешением, продолжительность измерительного сигнала в лабораторном эксперименте должна быть равной продолжительности окна данных, применяемого на полигоне. При времени реверберации бассейна 500 мс и продолжительности окна данных 1 с эксперимент по измерению шумовой реализации, используемой для получения частотной зависимости ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном

поле бассейна, занимает 1,5 с. Измерениям на шумовом сигнале характерны процедуры накопления спектров, которое выполняют с целью повышения отношения сигнал/помеха. Даже с учетом многократных измерений шумовых реализаций продолжительность эксперимента по получению частотной зависимости ПИ пары излучатель-приемник в шумовом реверберационном поле бассейна не превышает 30 – 40 минут, что несоизмеримо меньше в сравнении с измерениями на ЛЧМ сигнале. При этом не возникает проблем, связанных с чрезвычайной избыточностью получаемых данных.

Таким образом, используя формулу (3), ПФБ получим как частное от деления комплексной частотной зависимости ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном поле стационарного шумового сигнала на результат обработки комплексной частотной зависимости ПИ пары по методу СКВУ:

$$\dot{H}_{WT}(f) = \frac{\dot{Z}_{PH,RF}(f)}{\dot{Z}_{PH,FF}(f, \Delta f_{wa})}.$$

Полученная таким образом ПФБ обладает свойствами полной динамической характеристики в частотном диапазоне эксперимента и применима для различных сигналов излучения, в частности, случайного шума. Знание этой специфической передаточной функции оказывается достаточным для задач градуировки, если градуировку приемника выполнить непосредственно после эксперимента по ее определению, обеспечив неизменность положения излучателя и приемника в бассейне.

Оставляя за рамками рассмотрения вопросы, связанные с некорректностью обратной задачи, выражение для выходного напряжения приемника в свободном поле $u_{H,FF}(t)$ запишем в виде:

$$u_{H,FF}(t) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \frac{\mathfrak{F}\{u_{H,RF}(t)\}}{\dot{H}_{WT}(f)} \right\},$$

где $u_{H,RF}(t)$ – сигнал, зарегистрированный на выходе гидрофона в реверберационном звуковом поле бассейна, $\mathfrak{F}\{\bullet\}$ и $\mathfrak{F}^{-1}\{\bullet\}$ означают соответственно прямое и обратное преобразование Фурье.

Сказанное явилось обоснованием выбора метода СКВУ для разработки на его основе измерительной процедуры по определению ПФБ.

Использование передаточной функции бассейна для подавления искажений звука реверберацией

Наиболее распространенным видом шумового сигнала, используемого при моделировании измерений в натуральных условиях, является белый шум,

который при решении поставленных задач позволил оценить качество восстановления спектра по его неравномерности (отклонению от горизонтальной прямой). Использование «окрашенного» шума (шум с заданным по частоте наклоном спектра) и шума с колоколообразным спектром позволило наглядно оценить возможности восстановления неравномерного по частоте спектра по отклонениям от наклонной прямой либо функции, задающих форму спектра. В этих экспериментах в качестве приемника применяли стандартный гидрофон. Возможность использовать ПФБ для восстановления спектра на выходе гидроакустического приемника опробовали в экспериментах с имитатором носителя гидрофона.

Результаты экспериментов с белым шумом

Известно, что отражения от границы раздела вода-воздух в исследуемом диапазоне частот не зависят от частоты. Экспериментально установлено отсутствие заметной частотной зависимости отражений от бетонных стенок и дна бассейна ГЭТ 55-2011. Это стало основанием для предположения, что в эксперименте по определению ПФБ использование «белого» шума позволит выполнять измерения с наименьшим пик-фактором (минимизировать требуемый динамический диапазон). Тем самым удастся повысить точность результата эксперимента.

Применяли пару излучатель и приемник с равномерной в частотном диапазоне эксперимента частотной зависимостью ПИ. Чтобы повысить отношение сигнал/помеха, частотный диапазон эксперимента разбили на 1/3 октавные участки. Для каждого участка излучали неповторяющиеся шумовые сигналы длительностью 1 с в частотной полосе, немногим превосходящей ширину 1/3 октавной полосы частот, регистрировали ток в цепи излучателя и напряжение на выходе приёмника. Для обработки в сигналах выделяли шумовые реализации продолжительностью 500 мс, отстоящие от начала приема (для тока – начала излучения) на время реверберации бассейна. Комплексные спектры реализаций получали с использованием стандартной процедуры БПФ и применяли прямоугольное окно, при этом частотное разрешение составляло 2 Гц. Чтобы продемонстрировать особенности восстановления спектра с применением ПФБ для получения $|\dot{S}(f)|^2 = \langle \dot{S}_i(f) \dot{S}_i^*(f) \rangle$ и $\dot{R}\dot{S}^*(f) = \langle \dot{R}_i(f) \dot{S}_i^*(f) \rangle$ при определении ПФБ накапливали от 16 до 32 спектров в соответствии с изложенным в [22] алгоритмом. Получали комплексную частотную зависимость ПИ пары излучатель-приёмник в реверберационном поле бассейна $\dot{Z}_{PH,RF}(f)$. Полученную частотную зависимость обрабатывали по методу СКВУ и получали комплексную частотную зависимость пары по свободному полю $\dot{Z}_{PH,FF}(f)$.

ПФБ $\dot{H}_{WT}(f)$ получали как отношение частотной зависимости ПИ пары излучатель-приёмник в реверберационном поле $\dot{Z}_{PH,RF}(f)$ к частотной зависимости по свободному полю $\dot{Z}_{PH,FF}(f)$.

Решение задачи восстановления спектра сигнала предусматривает выполнение следующих операций:

- при тех же, что и при определении ПФБ, геометрических, временных и частотных параметрах эксперимента излучали шумовой сигнал и регистрировали мгновенные спектры выходного напряжения приемника $\dot{R}_k(f)$ и тока через излучатель $\dot{S}_k(f)$ (использованием индекса k в записи спектров показано отличие шумовых реализаций, использованных при решении задачи восстановления спектра, от реализаций, использованных для определения ПФБ);

- получали спектры тока излучателя $S(f) = \sqrt{|\dot{S}(f)|^2}$, $|\dot{S}(f)|^2 = \langle \dot{S}_k(f) \dot{S}_k^*(f) \rangle$ и выходного напряжения приемника в реверберационном звуковом поле $R(f) = \sqrt{|\dot{R}(f)|^2}$, $|\dot{R}(f)|^2 = \langle \dot{R}_k(f) \dot{R}_k^*(f) \rangle$;

- спектр напряжения приемника в свободном поле $X(f)$ восстанавливали делением спектра выходного напряжения в реверберационном поле на модуль ПФБ:

$$X(f) = \frac{R(f)}{|\dot{H}_{WT}(f)|};$$

- основываясь на свойствах четырехполюсных моделей пары излучатель-приемник в качестве опорного спектра шумового сигнала в свободном поле, использовали произведение спектра тока излучателя на модуль частотной зависимости ПИ пары излучатель-приемник по свободному полю:

$$X'(f) = S(f) |\dot{Z}_{FF}(f)|.$$

Восстановленный спектр $X(f)$ сравнивали с опорным спектром $X'(f)$.

Результаты экспериментов с «белым» шумом представлены на рис. 11-14. Искажения спектра «белого» шума реверберацией иллюстрируют зависимости на рис. 11, на котором показаны модули полученных по 16 реализациям спектров шумового сигнала на выходе приемника в реверберационном поле бассейна и опорного спектра, средний уровень опорного спектра.



Рис. 11 Спектр шумового сигнала на выходе приемника в реверберационном поле бассейна, опорного спектра и средний уровень опорного спектра

По малым отклонениям уровней компонент опорного спектра от среднего уровня был сделан вывод о пригодности генерируемых сигналов для измерений в эксперименте.

Спектр выходного напряжения сильно искажен собственными модами бассейна. О величине искажений можно судить по провалам в спектре, достигающим 25 дБ несмотря на довольно высокую плотность мод.

С увеличением числа усредняемых спектров форма опорного спектра будет приближаться к горизонтальной прямой, при этом форма спектра напряжения приемника в реверберационном поле с точностью до константы будет совпадать с ПФБ. Подтверждением этому может служить близость формы спектра в реверберационном поле на рис. 11 и изображенной на рис. 12 ПФБ, полученной как частное от деления спектра напряжения приемника в реверберационном поле на результат обработки этого спектра по методу СКВУ. Чрезвычайная изрезанность частотной зависимости на рис. 12 наглядно демонстрирует сложность задачи построения исчерпывающей модели реверберационного бассейна. Наблюдаемые глубокие провалы ПФБ означают, что на соответствующих провалам частотах в точке приема суммарная реверберационная звуковая волна по амплитуде близка к прямой волне излучателя и противоположна ей по фазе. Каждому расположению излучателя и приемника в бассейне соответствуют свои частоты провалов ПФБ, на которых бассейн режетирует звуковую волну, подавляя ее отраженными волнами.



Рис. 12. Передаточная функция бассейна

Глубокие редкие провалы оказывают малое влияние при измерении энергетических характеристик шума (например, СКЗ шума в 1/3 октавной полосе частот). Напротив, в задачах определения ПФБ и восстановления спектра такие провалы могут оказать существенное влияние на результат эксперимента. По аналогии с понятием «слепой» скорости в радиолокации, частоты провалов ПФБ также можно понимать как «слепые» частоты бассейна, на которых восстановление спектральных компонент затруднено, а в случае полного подавления звуковой волны отражениями невозможно.

От задачи получения ПФБ перейдем к задаче восстановления спектра сигнала с использованием ПФБ.

На рис. 13 и 14 результаты решения задачи по восстановлению спектра сигнала представлены: спектры опорного и восстановленного шумовых сигналов и разность спектров (разностный спектр). Для наглядности восстановленный и опорный спектры смещены вверх. Как видно на рис. 13, опорный и восстановленный спектры демонстрируют хорошее совпадение. Исключение составляют частоты, на которых ПФБ имеет глубокие провалы. Это можно проверить по совпадению положений провалов разностного спектра и ПФБ на рис. 12.

Значимые провалы разностного спектра соответствуют частотам, на которых провалы ПФБ превышают 12 дБ относительно максимального значения. С увеличением накапливаемых спектров при определении ПФБ качество восстановления спектра увеличивается.



Рис. 13. Опорный, восстановленный и разностный спектры

Искажения восстановленного спектра на «слепых» частотах бассейна являются следствием некорректности решаемой обратной задачи. Искажения на частотах незначительных провалов ПФБ убираются накоплением большего числа спектров при определении ПФБ. Накопление можно применить и для значительных провалов, но это существенно затягивает эксперимент. Более того, с какой бы высокой точностью не была измерена ПФБ, на частотах провалов отношение сигнал/помеха всегда хуже. В этой ситуации оказался весьма эффективным предложенный В.К. Масловым (ВНИИФТРИ) способ обработки, названный «метод парикмахера» [23]. Эффект от «простригания» будет продемонстрирован на задаче измерения СКЗ окрашенного шума.

Как упоминалось выше, редкие глубокие провалы ПФБ оказывают малое влияние при измерении энергетических характеристик шума. Например, различие СКЗ в 1/3 октавной полосе частот опорного и восстановленного сигналов незначительны и составляют 3,3 % (0,28 дБ), что сопоставимо с допусками на эффективную ширину полосы пропускания электронных 1/3 октавных фильтров 1 класса.

Чтобы показать качество восстановления формы спектра в процессе его накопления, более подробный вид зависимостей (рис. 13) представлен на рис. 14.

На рис. 13 и 14 не приведены прямые средних уровней восстановленного и опорного шумовых сигналов, поскольку в силу малых расхождений эти прямые неразличимы.

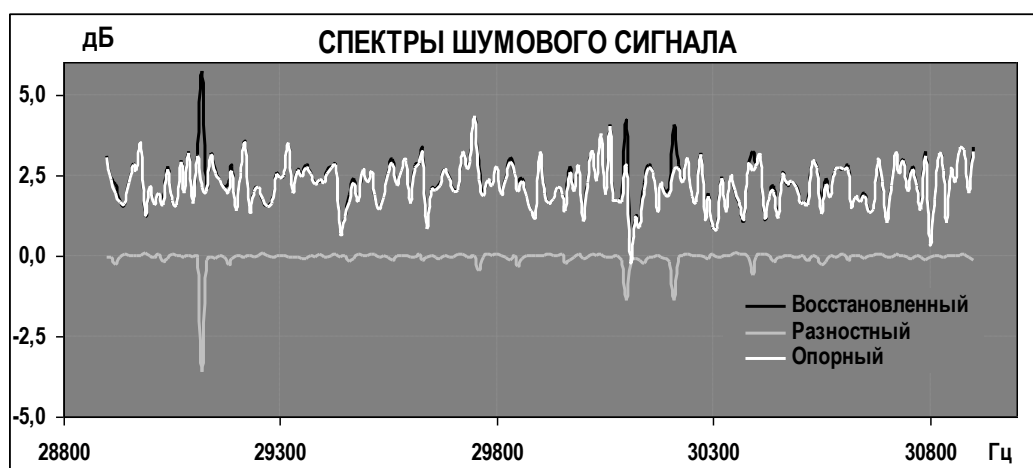


Рис. 14

«Окрашенный» шум

В качестве «окрашенного» шума применяли случайный сигнал, спектр мощности которого имеет равномерный наклон - 36 дБ на октаву. На рис. 15 показаны полученные по 16 реализациям спектры шумового сигнала на выходе приемника в реверберационном поле бассейна и опорного спектра, прямая среднего уровня опорного спектра. На рис. 16 приведены ПФБ, полученные с использованием 16 реализаций «белого» шума и такого же числа реализаций шума «окрашенного». Различия на частоте 28,11 кГц (частота провала глубиной 23 дБ) составляют 12,3 дБ, на частотах провалов глубиной от 12 до 18 дБ различия не превышают 2,1 дБ, на остальных частотах различия лежат в пределах 0,5 - 0,7 дБ (менее 10 %). Хорошее совпадение частотных зависимостей на рис. 16 показывает независимость результата определения ПФБ от используемого сигнала.

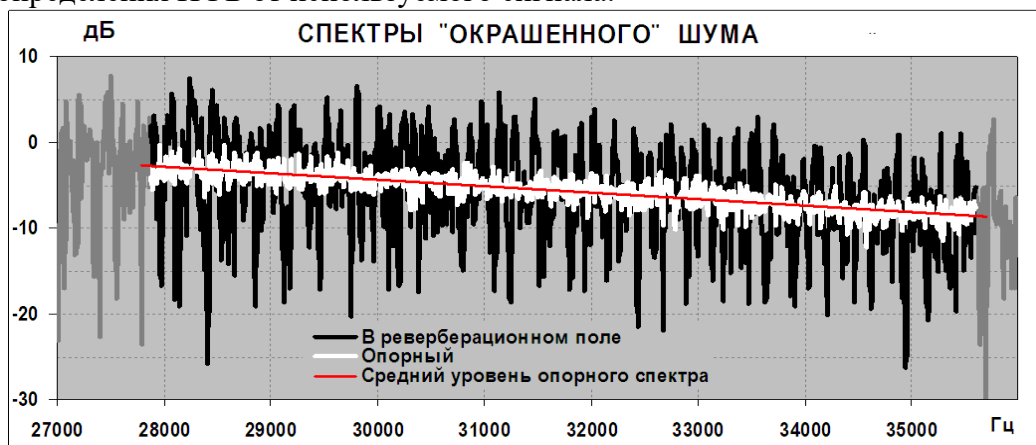


Рис. 15. Спектр шумового сигнала в реверберационном поле бассейна, опорный спектр, прямая среднего уровня опорного спектра

По зависимостям, представленным на рис. 16 и 17, можно убедиться, что качество восстановления спектра «окрашенного» шума такое же, как в экспериментах с «белым» шумом.



Рис. 16. ПФБ, полученные с использованием «белого» и «окрашенного» шума, и разность полученных ПФБ

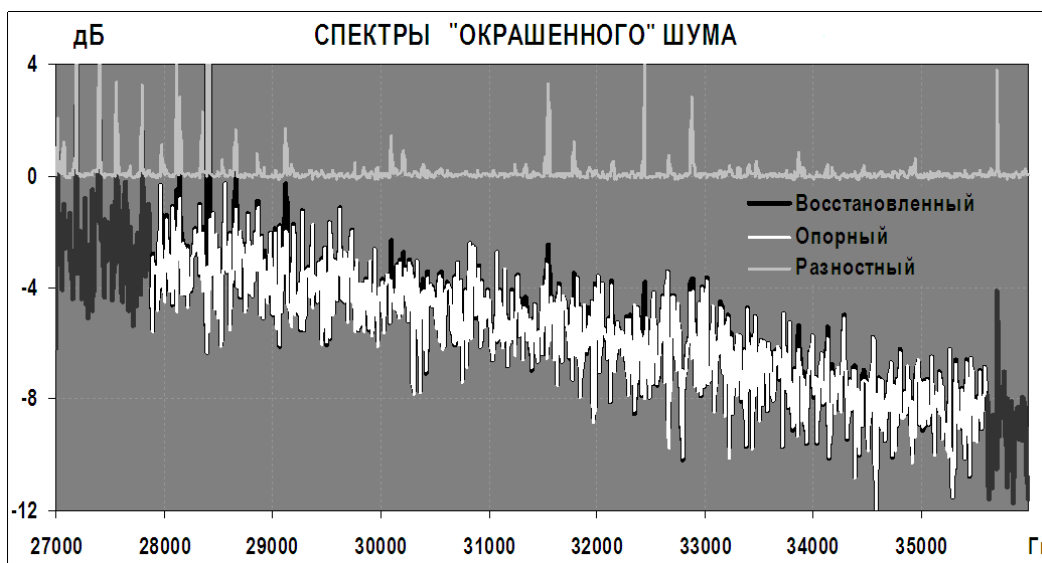


Рис. 17. Опорный, восстановленный и разностный спектры

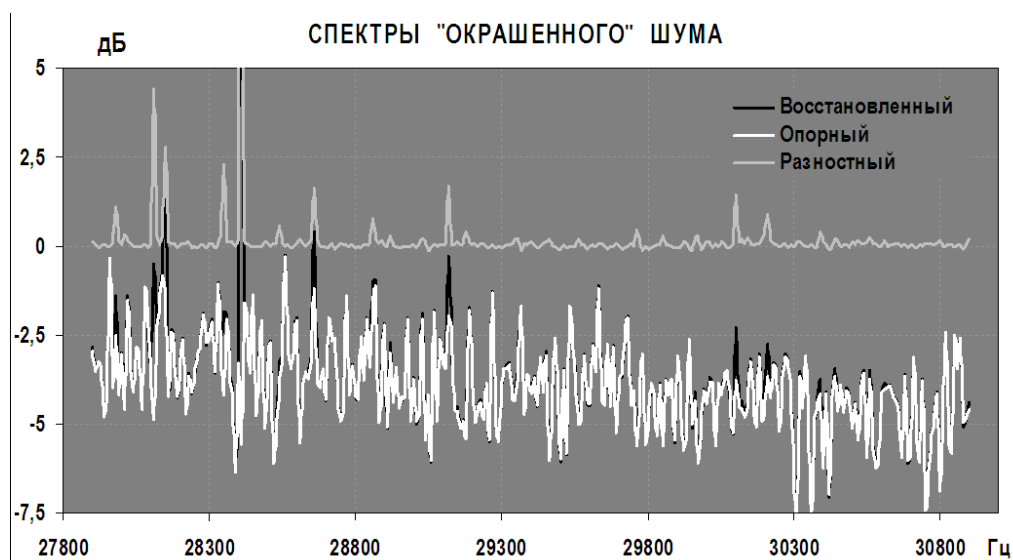


Рис. 18. Более подробный вид зависимостей, представленных на рис. 17

Различие СКЗ в 1/3 октавной полосе частот опорного и восстановленного сигналов составляют 2,6 %, применение «простригания» спектра уменьшает это различие до 0,6 % (0,05 дБ). Так же, как и при описании результатов с «белым» шумом, на рис. 17 и 18 не приведены прямые средних уровней восстановленного и опорного шумовых сигналов, неразличимые в силу малости расхождений.

Восстановление колоколообразного спектра

ПФБ определяли на «белом» шуме. После этого в тракт излучателя включили фильтр с полосой пропускания 24 % и с использованием полученной ПФБ выполняли эксперимент по восстановлению спектра шума с колоколообразной огибающей. На рис. 19 представлены спектр, восстановленный с использованием ПФБ, опорный спектр и частотная характеристика фильтра, полученная обработкой по методу СКВУ ПИ пары излучатель-приемник в реверберационном звуковом поле. В качестве опорного спектра использована частотная характеристика фильтра, полученная с помощью электрических измерений. Отличие частотной характеристики, полученной обработкой по методу СКВУ, от восстановленного и опорного спектров объясняется ограничением, накладываемым частотно-временным соотношением неопределенностей.

Особенность выполненного эксперимента - в попытке проверить возможность градуировки в условиях бассейна гидроакустического спектрометра, а также высокочастотного преобразователя. Полученный результат невозможен, например, при излучении ЛЧМ сигнала, который не позволяет опреде-

лить ПФБ.

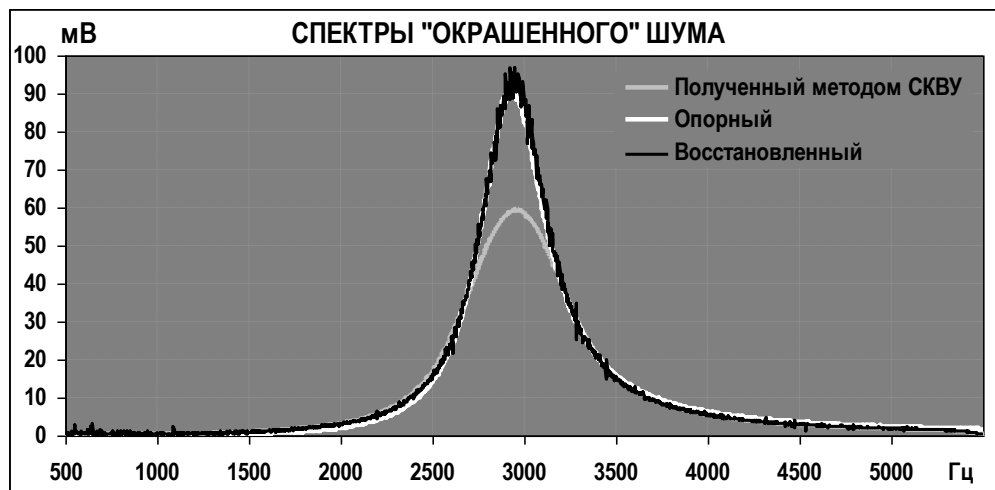


Рис. 19. Спектр, восстановленный с использованием ПФБ, опорный спектр и частотная характеристика фильтра, полученная прямым применением обработки по методу СКВУ

Эксперименты с «окрашенным» шумом показали возможность восстановления наклонных участков спектра сигнала. С помощью эксперимента с колоколообразным спектром показана возможность восстанавливать участки спектра с перегибами огибающей.

Эксперимент с имитатором носителя гидрофона

В эксперименте использовали имитатор носителя в виде пустотелого металлического цилиндра, положительной плавучестью 24 кг. Цилиндр В, смонтированный на отдельной штанге, ориентировали торцевой поверхностью на приемник Н и устанавливали на расстоянии примерно 50 см от приемника, как это показано на рис. 20. Нейтральной плавучести добивались, прикрепляя к нижней части боковой поверхности цилиндра груз фалом длиной 2,7 м.

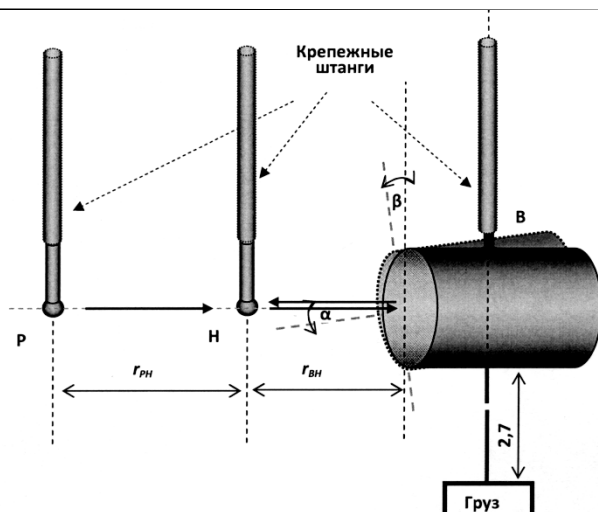


Рис. 20. Расположение излучателя Р, гидрофона Н и имитатора носителя В в эксперименте

Излучали «окрашенный» шум, до 32 неповторяющихся реализаций шума использовали для определения ПФБ (см. рис. 21), получения спектра тока излучателя и выходного напряжения приемника в реверберационном звуковом поле. Аналогично тому, как это описано в разделе «Результаты экспериментов с «белым» шумом», спектр напряжения в свободном поле восстанавливали делением спектра выходного напряжения в реверберационном поле на модуль ПФБ. Опорный спектр получали произведением спектра тока излучателя на модуль частотной зависимости ПИ пары излучатель-приемник по свободному полю.

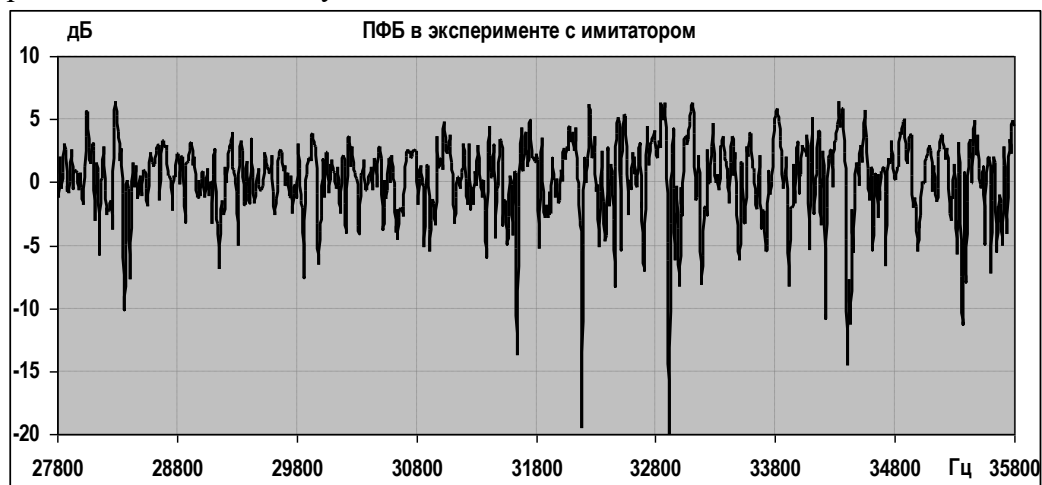


Рис. 21. Передаточная функция бассейна в эксперименте с имитатором носителя гидрофона

Результаты восстановления спектра на выходе гидрофона приведены на рис. 22. Поведение восстановленного спектра довольно хорошо повторяет поведение опорного: явно выражен отрицательный наклон, период осцилляций близок к 1,5 кГц, что согласуется с удаленностью имитатора от приемника в эксперименте. Провалы разностного спектра (для наглядности сдвинут на рис. 22 по оси частот вправо) совпадают по частотам с провалами ПФБ и объясняются влиянием помехи на «слепых частотах» бассейна. После «простригания» восстановленного спектра различие СКЗ значений, рассчитанных по опорному и восстановленному спектрам в 1/3 октавной полосе частоты 31,5 кГц, составило 1,4 дБ (18,2 %).

Вместе с тем приведенный результат нельзя отнести к весьма удовлетворительным, рассмотренным в предыдущих разделах. На разностном спектре хорошо заметны, как увеличивающаяся с частотой глубина провалов, так и увеличивающийся с частотой размах осцилляций детерминированного характера, который достигает 1,9 дБ.

Представленный результат позволяет продемонстрировать некоторые выявившиеся в эксперименте с имитатором носителя проблемы, которые необходимо будет решить при создании эталонной установки:

- проявилось влияние внешней помеховой обстановки (суточные и сезонные изменения, так же как и на морском полигоне), для подавления помехи накопления 32 шумовых реализаций оказалось недостаточным, что обусловило необходимость управлять числом накапливаемых спектров в процессе измерений и привело к увеличению продолжительности измерений;

- с возрастанием продолжительности измерений на результат эксперимента оказали влияние такие неконтролируемые факторы, как смещения имитатора носителя в горизонтальной и вертикальной плоскостях, показанные на рис. 20 углами α и β , что привело к продемонстрированному на рис. 22 увеличению расхождений восстановленного и опорного спектров.



Рис. 22. Восстановленный, опорный и разностный спектры в эксперименте с имитатором носителя

В эксперименте гидрофон не был жестко связан с имитатором носителя, а неизменность расстояния между гидрофоном и имитатором контролировали по временным задержкам прямого и отраженных сигналов, для чего периодически излучали короткие тональные импульсы. Разрешающая способность измерения временных задержек с использованием короткого тонального импульса оказалась недостаточной для контроля величины смещений имитатора относительно исходного положения.

По результатам эксперимента оказалось, что необходимо контролировать не только расстояния между излучателем, гидрофоном и имитатором, но и положение имитатора относительно гидрофона в бассейне. На первый взгляд, проблемы не существует, если гидрофон жестко закреплен в носителе, однако смещения самого носителя относительно исходного его положения в бассейне приведут к таким же искажениям результатов измерений. В этой ситуации акустический метод контроля расстояния с использованием короткого импульса оказывается бесполезным, поскольку гидрофон расположен внутри носителя.

В качестве критерия неизменности положения излучателя и гидроакустического приемника при градуировке в бассейне следует применять неизменность формы кепстра принятого приемником реверберационного сигнала. Для повышения разрешающей способности кепстра целесообразно излучать сигналы с широкой базой (ЛЧМ сигналы либо MLS – последовательности), которые обеспечивают значительно большее разрешение, чем тональный импульс.

Восстановление формы непрерывного сигнала в установившемся режиме приема

Чтобы продемонстрировать возможности использования ПФБ в экспериментах по восстановлению формы сигнала применяли сигналы со сложным спектром. В настоящем разделе приведены результаты восстановления формы шумового сигнала с равномерно распределенной в 1/3 октавной полосе частот мощностью.

После того, как определили комплексные частотную зависимость ПИ пары излучатель-приемник по свободному полю $\dot{Z}_{PH,FF}(f)$ и ПФБ $\dot{H}_{WT}(f)$, не меняя геометрических, временных и частотных параметров эксперимента, излучали продолжительный шумовой сигнал в 1/3 октавной полосе частот с равномерным спектром. Регистрировали ток в цепи излучателя, напряжение на выходе приемника и получали (с использованием стандартной процедуры БПФ) комплексные спектры выходного напряжения приемника $\dot{R}(f)$ и тока через излучатель $\dot{S}(f)$. Комплексные спектры напряжения приемника в свободном поле $\dot{X}(f)$ и опорного сигнала $\dot{X}'(f)$ получали по формулам:

$$\dot{X}(f) = \frac{\dot{R}(f)}{\dot{H}_{WT}(f)};$$

$$\dot{X}'(f) = \dot{S}(f)\dot{Z}_{PH,FF}(f).$$

Обратным преобразованием Фурье комплексных спектров $\dot{X}(f)$ и $\dot{X}'(f)$ получали временные зависимости мгновенных значений восстановленного $x(t) = \mathfrak{T}^{-1}\{\dot{X}(f)\}$ и $x'(t) = \mathfrak{T}^{-1}\{\dot{X}'(f)\}$ опорного сигналов.

Чтобы показать, насколько сильны искажения формы сигнала реверберацией звука в бассейне, на рис. 23 изображены опорный сигнал и установившийся сигнал на выходе приемника.

Основное отличие экспериментов по восстановлению формы сигнала от экспериментов с восстановлением спектра состоит в использовании комплексных частотных зависимостей. Как было отмечено выше, одним из основных условий применения четырехполюсной модели пары излучатель-приемник в реверберационном звуковом поле бассейна является установившийся режим приема.

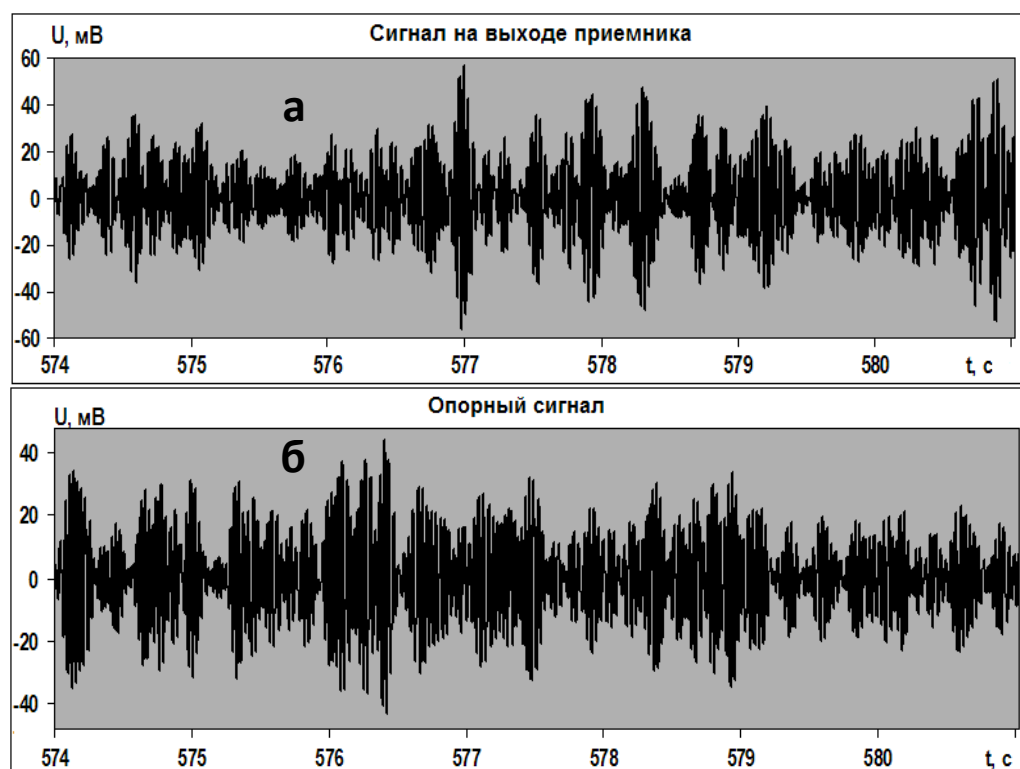


Рис. 23. Сигнал на выходе приемника в реверберационном звуковом поле бассейна – а и опорный сигнал - б

Чтобы продемонстрировать зависимость качества восстановления формы сигнала от установления реверберации в бассейне, на рис. 24 – 26 представлены восстановленный, опорный и разность восстановленного и опорного сигналов для различных временных участков: участка от 351 мс до 359 мс, опережающего установление реверберации, участка от 408 мс до 416 мс, непосредственно предшествующего установлению, участка установившейся реверберации от 574 мс до 582 мс.

На рис. 24 разность сигналов по размаху соизмерима с восстановленным сигналом. Однако эту соразмерность не следует трактовать как очень плохое восстановление сигнала. Несмотря на недостаточное установление реверберационного сигнала (время реверберации бассейна 500 мс), корреляция опорного и восстановленного сигналов на временном интервале от 351 мс до 359 мс довольно высока – значение коэффициента корреляции составляет 0,822.

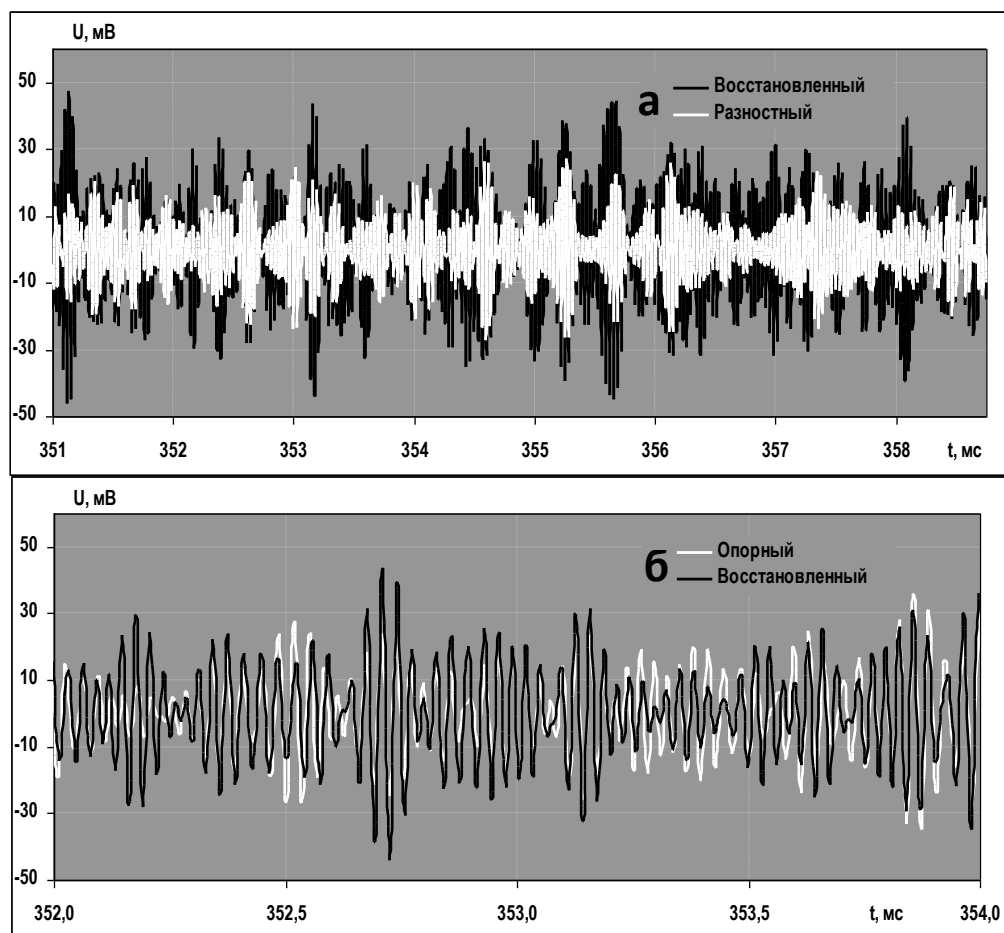


Рис. 24. Восстановленный сигнал и разность сигналов – а, подробный вид опорного и восстановленного сигналов – б

С установлением реверберации в бассейне размах разности сигналов существенно уменьшился (см. зависимости на рис. 25 а) и в значительной мере обусловлен небольшим рассогласованием восстановленного и опорного сигналов по фазе, что не скажется, например, на измерениях среднеквадратического значения и слабо скажется на пик-пиковом значении при градуировке приемника. С установлением принимаемого сигнала качество восстановления его формы заметно улучшается. Корреляция восстановленного и опорного сигналов возрастает с 0,826 на временном интервале 351 - 359 мс до 0,962 на интервале 408 - 416 мс, что подтверждает и близость формы опорного и восстановленного сигналов на рис. 25 б.

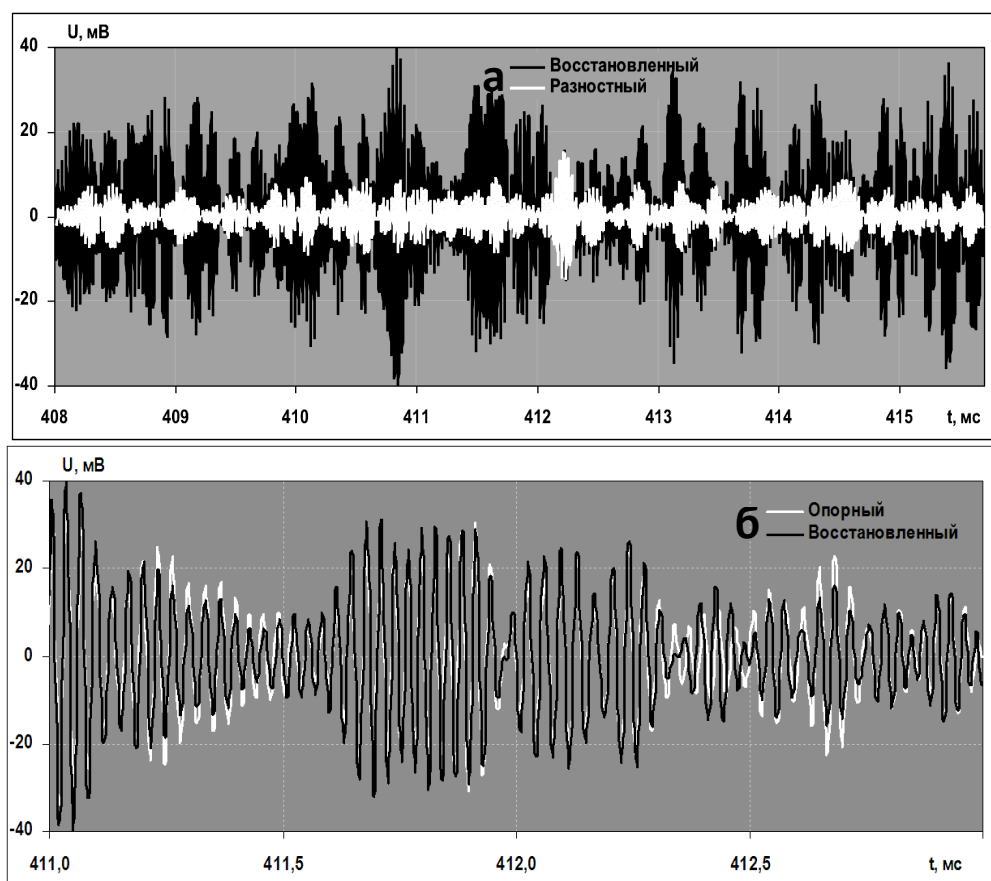


Рис. 25. Восстановленный сигнал и разность сигналов – а, подробный вид опорного и восстановленного сигналов – б

Разность сигналов на рис. 26 по размаху немногим превышает шумовую помеху в эксперименте (на рис. 26 не показана). Корреляция восстановленного и опорного сигналов на временном интервале от 574 мс до 582 мс достигает значения 0,992. Можно говорить о практической идентичности опорного и восстановленного сигналов на рис. 26.

Полученные результаты весьма важны для построения измерительных процедур эталонной установки. Наименьшая погрешность градуировки гидрофона, достигнутая на ключевых сличениях, составила 4,4 %. При этом измерения, начиная с момента установления амплитуды тонального импульса на 99 %, вполне допустимы. Исходя из значения времени реверберации бассейна в 1/3 октавной полосе частоты 31,5 кГц, равного 560 мс, можно считать, что, начиная с 351 мс, сигнал установился на 98,7 %, начиная с 408 мс – на 99,3 %, и начиная с 574 мс – более чем на 99,9 %. Несмотря на высокую степень установления сигнала на всех трех участках, только на третьем из

Альманах современной метрологии, 2015, №4

них удалось восстановить сигнал с высоким качеством. Тем самым при градуировке с использованием ПФБ в качестве критерия установления сигнала следует принимать не 99 %, а 99,9 %.

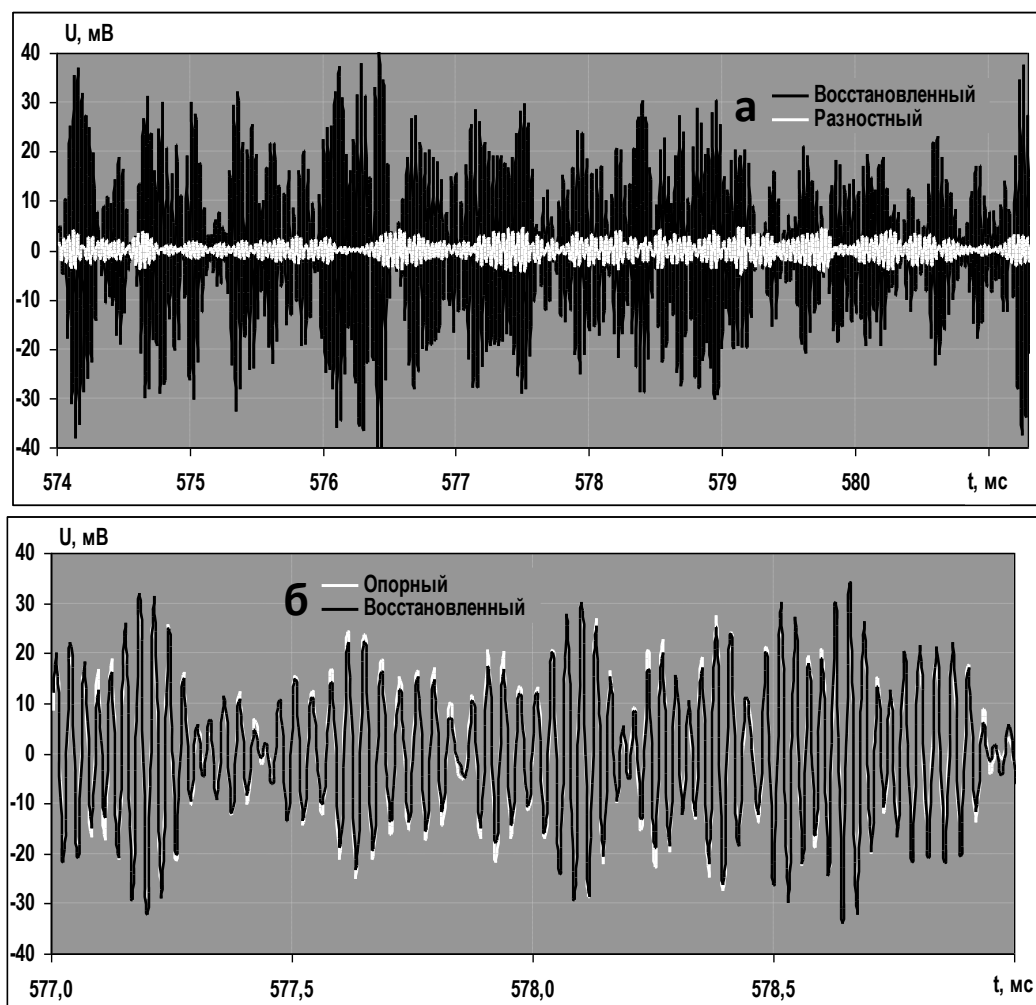


Рис. 26. Восстановленный сигнал и разность сигналов – а, подробный вид опорного и восстановленного сигналов – б

Восстановление формы импульсного звука

В предыдущем эксперименте шла речь о стационарном (по энергии) сигнале. К таким сигналам применимо понятие времени реверберации в классическом его понимании, что позволяет пользоваться при анализе степенью установления сигнала. Импульсный сигнал создает в бассейне реверберационное звуковое поле, одной из особенностей которого является отсутствие монотонного спада звука по экспоненциальному закону. Вследствие этого представляет интерес изучить возможность восстановления формы ко-

роткого (в сравнении с временем реверберации) импульсного сигнала и исследовать, насколько достоверно ПФБ, измеренная на шумовом сигнале в полосе частот эксперимента, характеризует «импульсную характеристику» бассейна.

Эта задача актуальна не только для метрологического обеспечения измерений шума от удара морского копра, но также, например, для измерений шума оружия подводного пловца (как пневматического, так и огнестрельного). Разработка стандарта на измерения шума подводного ружья уже включена в программу ISO.

Эксперимент выполняли в малом бассейне ГЭТ 55-2011. Излучатель возбуждали шумовым импульсом в $1/3$ октавной полосе частоты 160 кГц. Форму огибающей импульса возбуждения выбрали похожей на форму огибающей акустического сигнала удара морского копра [4]. Продолжительность импульса возбуждения немногим превышала 4 мс.

В отличие от эксперимента по восстановлению формы сигнала в установленном режиме приема, ток в цепи излучателя и напряжение на выходе приемника регистрировали соответственно от момента начала излучения и от момента начала приема в течение времени, достаточном, чтобы «реверберационный шлейф» на осциллограмме принятого сигнала уменьшился настолько, чтобы быть скрытым помехой. В малом бассейне ГЭТ 55-2011 это время составило 25 мс. Реализации тока и выходного напряжения приемника использовали для получения опорного и восстановленного импульсных сигналов в соответствии с алгоритмом, изложенным в предыдущем разделе. На рис. 27 изображены осциллограммы импульсных сигналов: на выходе приемника в реверберационном звуковом поле, опорного и восстановленного с использованием ПФБ.

От опорного импульсного сигнала принятый в реверберационном поле сигнал отличают: размах сигнала (значительно превышает размах опорного импульса), протяженный «реверберационный шлейф», многократно превышающий по продолжительности излученный импульс (см. рис. 27 а). На рис. 27 б восстановленный с использованием ПФБ импульсный сигнал с высокой степенью близости повторяет форму опорного. Различия пик-пиковых значений опорного и восстановленного сигналов составило 13,5 % (1,26 дБ), что соизмеримо с погрешностью градуировки рабочих измерительных гидрофонов. Для того, чтобы продемонстрировать качество восстановления формы импульсного сигнала, на рис. 28 представлен подробный вид опорного, восстановленного и разности опорного и восстановленного импульсных сигналов в окрестности максимального пик-пикового значения (см. рис. 27 б).

В технических регламентах на измерения подводного звука вредное воздействие звукового импульса принято оценивать по уровню звуковой экспо-

зиции SEL дБ:

$$SEL = 10 \lg \left[\frac{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{p_o^2} \right],$$

где $p(t)$ - мгновенные значения звукового давления в импульсе, T - время акустического события, равное $t_2 - t_1$, t_1 и t_2 соответственно моменты начала и окончания звукового импульса, p_0 – опорное звуковое давление, равное $1 \cdot 10^{-6}$ Па.

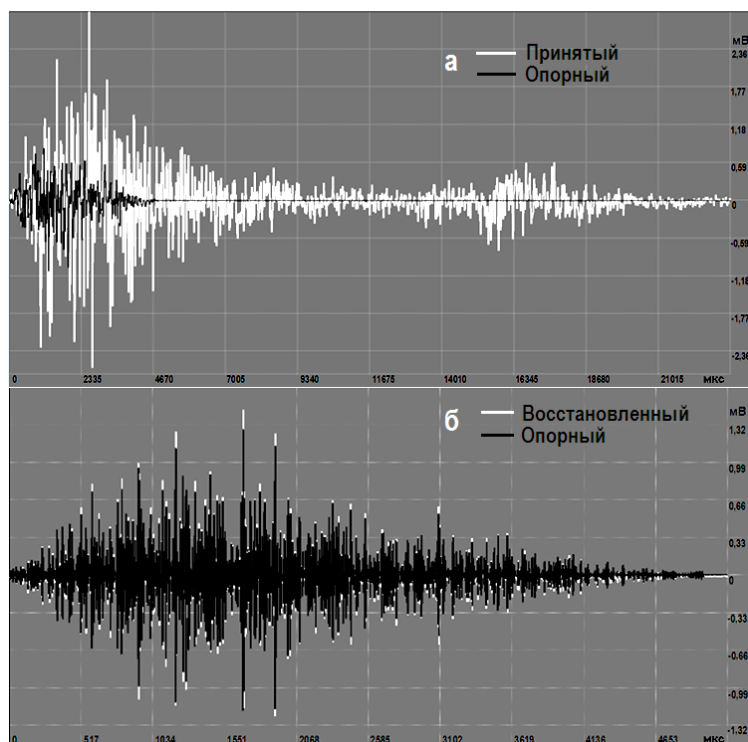


Рис. 27. Осциллограммы импульсных сигналов: на выходе приемника в реверберационном звуковом поле, опорного и восстановленного

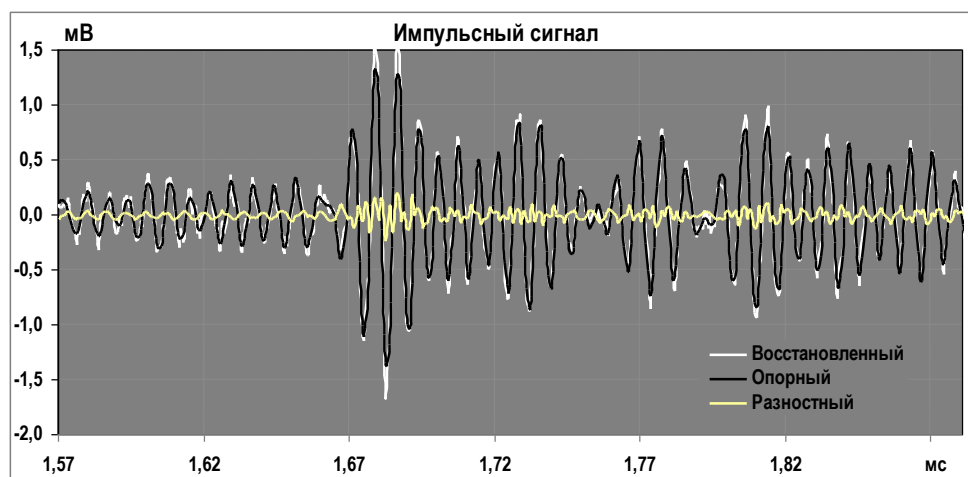


Рис. 28. Подробный вид опорного, восстановленного и разности импульсных сигналов в окрестности максимального пик-пикового значения

Расхождение в значениях уровней звуковой экспозиции восстановленного и опорного звуковых импульсов составило 0,07 дБ (менее 1 %), что представляет собой пренебрежимо малую величину в сравнении с нормированными в стандартах значениями погрешности измерений подводного шума 1,5 – 3 дБ.

Заключение

Результаты выполненных экспериментов со стационарным шумом показали, что использование ПФБ для подавления реверберационных искажений спектра принимаемого сигнала позволяет использовать для лабораторной градуировки гидроакустического приемника шумовые сигналы, близкие по характеристикам к сигналам, измеряемым при использовании приемника по назначению.

Для заданного расположения излучателя и приемника в бассейне предложено определять ПФБ комплексным делением частотной зависимости передаточного импеданса пары излучатель-приемник в реверберационном шумовом поле на результат обработки этой частотной зависимости по методу СКВУ.

Эксперименты по подавлению реверберационных искажений спектра и формы стационарного и импульсного шумового сигналов показали возможность:

- в режиме установившегося приема искаженного реверберацией шумового сигнала восстанавливать форму сигнала в свободном поле (коэффициент корреляции 0,99),

- использовать ПФБ для восстановления формы импульсного звука с погрешностью пик-пиковых значений 13,5 % и уровня звуковой экспозиции импульса не более 1 %.

Литература

1. МЭК 50 (801). Международный электротехнический словарь. Гл. 801: Акустика и электроакустика. 1994.
2. Р50.2.037–2004. ГСИ. Измерения гидроакустические. Термины и определения.
3. Исаев А. Е. Лабораторная градуировка приемника для измерений уровней подводного шума корабля // Измер. техника, 2015, №1, с. 53-58.
4. Исаев А.Е., Поликарпов А.М., Черников И.В. Акустические сигналы и поля для метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассейне // Альманах современной метрологии, 2015, № 2, с. 76 – 102.
5. Исаев А. Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. - Менделеево: ВНИИФТРИ, 2008.
6. Исаев А.Е., Поликарпов А.М. Проблемы валидации при градуировке приемника подводного шума // Альманах современной метрологии, 2014, № 1, с. 119 – 160.
7. Матвеев А.Н. Разработка и исследование методов градуировки гидроакустического приемника при излучении сигналов с линейной частотной модуляцией. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Менделеево, ФГУП ВНИИФТРИ, 2014.
8. Владимирова В.С. Обобщенные функции в математической физике. - М.: Наука, 1976.
9. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. - М.: Физматлит, 2007, 480 с.
10. ИЕС 60565(2006). Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 1 МГц.
11. Исаев А. Е. Критерий качества реализации условий свободного поля при градуировке гидроакустического приемника в бассейне с отражающими границами // Измер. техника, 2014, № 5, с. 48–53.
12. Barrera-Figueroa S., Rasmussen K., Jacobsen F. A time-selective technique for free-field reciprocity calibration of condenser microphones // J. Acoust. Soc. Am. 2003. Sept. v. 114 (3), p. 1467–1476.
13. Müller, Swen, Massarani, Paulo. Transfer-Function Measurement with Sweeps/JAES, June 2001, v. 49, Issue 6, p. 443-471.
14. Pedersen P. C., Lewin P. A., Bjorno L. Application of time delay spectrometry for calibration of ultrasonic transducers // IEEE Trans. Ultrasonics, ferroelectric and frequency control, 1988, v. 35. №. 2. p. 185–205.
15. Robinson S. Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks. PL Report CMAM 034, 1999.

16. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Градуировка приемника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ сигнала. // Акуст. журн., 2013, т. 59, № 6, с. 773-781.
17. Chen Yi, Isaev A.E., Wang Yuebing, Enyakov A.M., Fei Teng and Matveev A.N. The COOMET Pilot Comparison 473/RU-a/09: Comparison of hydrophone calibrations in the frequency range 250 Hz to 200 kHz // Metrologia Tech. Suppl, 2011, v.48. - 09004.
18. Isaev A.E., Chen Yi, Matveev A.N., Ping Zihong. COOMET.AUV.W-S1 supplementary comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 250 Hz to 8 kHz // Metrologia Tech. Suppl, 2015, v. 52. – 09001.
19. ANSI S12.64 – 2009 «Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships. – Part 1: General Requirements».
20. McMorrow E.W., Wallace J.D. and Coop J.J. Technique for rapid calibration of hydrophones using random noise fields, Technical Memo ADC-EL41-EWM:JDW:JJC, U.S. Navy Air Development Center, Johnsville, USA.
21. Лопашев Д.З. Исследование звукового поля в большом измерительном бассейне. Исследования в области акустических и гидроакустических измерений / Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР, вып. 73(133). М.: Стандартгиз, 1963, с. 31-40.
22. Исаев А.Е., Черников И.В., Щерблюк Н.Г. Инновационная технология измерений для градуировки гидроакустических преобразователей в реверберационном поле лабораторного бассейна // Альманах современной метрологии. 2015, № 2, с. 103 – 132.
23. В.К. Маслов. Современные технологии анализа и обработки информации в физико-технических измерениях. - Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2010, -583 с.