

УДК 532.5.071.8

КАЛИБРОВКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО РЕКОРДЕРА В УСЛОВИЯХ ЛАБОРАТОРНОГО БАССЕЙНА С ОТРАЖАЮЩИМИ ЗВУК ГРАНИЦАМИ

А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, А.М. Поликарпов

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
isaev@vniiftri.ru

В работе на основе единого подхода изложены различные аспекты проблем калибровки приёмника подводного шума в бассейне при наличии реверберационной помехи. Речь идёт не о лабораторном гидрофоне, а о подводном устройстве, применяемом при измерениях различного вида шумов в море.

Проблему калибровки усложняет не только отсутствие согласованности методик калибровки, но и достаточного опыта в этой области.

Освещаются результаты разработки оригинальных методов калибровки в условиях, отягощённых реверберацией звука в бассейне. Обосновывается современность таких исследований.

Исследуются методы и сигналы для калибровки акустических приёмников. Уделяется внимание низкочастотной калибровке гидрофона по полю в незаглушённом бассейне, экспериментам по подтверждению корректности этого метода.

Отдельный раздел статьи посвящён ключевым сличениям результатов калибровки гидрофонов Консультативного комитета по акустике, ультразвуку и вибрации МКМВ, в которых участвовал Государственный специальный эталон единицы звукового давления в водной среде ГЭТ 55-91. Говорится о задачах, которые поставил перед собой ВНИИФТРИ, участвуя в этих сличениях, о вторых ключевых сличениях ССАUV.W-K2

Отдельной таблицей представлен бюджет неопределённостей результатов калибровки опорного гидрофона на частотах ниже 10 кГц.

Ключевые слова: рекордер, калибровка, условия лабораторного бассейна, отражающие звук границы, методики калибровки, ключевые сличения, бюджет неопределённостей результатов калибровки.

CALIBRATION OF HYDROACOUSTIC RECORDER UNDER CONDITIONS OF LABORATORY WATER TANK WITH REFLECTING SOUND BORDERS

A.E. Isaev, A.S. Nikolaenko, A.M. Polikarpov

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region
isaev@vniiftri.ru

In the work, based on a single approach, various aspects of the problems of calibrating an underwater noise receiver in a water tank in the presence of reverberation disturbance are described. This is not about a laboratory hydrophone, but about an underwater device used in measurements of various types of noise in the sea.

The calibration problem is complicated not only by the lack of consistency of calibration methods, but also by sufficient experience in this area.

The results of the development of original calibration methods in conditions burdened by reverberation of sound in the water tank are highlighted. The modernity of such studies is substantiated.

The methods and signals for calibrating acoustic receivers are investigated. Attention is paid to the low-frequency calibration of the hydrophone over the field in the non-sound absorbing water tank, to experiments to confirm the correctness of this method.

A separate section of the article is devoted to key comparisons of the hydrophone calibration results of the Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration of the CIPM, in which the State special standard of sound pressure unit in the water environment GET 55-91 participated. We are talking about the tasks that VNIIFTRI has set for itself, participating in these comparisons, about the second key comparisons CCAUV.W-K2.

A separate table presents the budget for the uncertainties of the calibration results of the reference hydrophone at frequencies below 10 kHz.

Key words: recorder, calibration, laboratory water tank conditions, reflecting sound boundaries, calibration methods, key comparisons, budget of uncertainties of calibration results.

*«Опирайтесь можно только на то, что оказывает сопротивление...»
Жан Анриё — Наполеону Бонапарту*

Введение

Побудительной причиной написания этой работы стало желание авторов изложить на основе единого подхода различные аспекты проблемы калибровки приёмника подводного шума в бассейне при наличии реверберационной помехи, изложенные ими ранее в отдельных публикациях [1–10]. Речь пойдёт не о лабораторном гидрофоне, предназначенном для измерений гармонического сигнала, а о подводном «шумомере» — устройстве, которое применяют при измерениях различного вида шумов в море. Сегодня активно ведётся разработка целого ряда методик для калибровки приёмников, применяемых при сертификационных испытаниях коммерческих судов, оценки шумового загрязнения морской среды источниками различного происхождения: строительство морских и прибрежных объектов, мониторинг шумов судоходства, эксплуатация подводных трубопроводов и т.п. Калибровка лабораторного гидрофона стандартизована на международном уровне, однако эти методы не применимы для оценки акустических свойств приёмника подводного шума. Проблему усугубляет не только отсутствие согласованности методик калибровки, что приводит к несопоставимости результатов измерений, но и поклонение как у нас, так и за рубежом «традиционному» подходу, когда при натуральных измерениях шума используют чувствительность гидрофона. Ещё один фактор — отсутствие достаточного опыта, позволяющего свести в единую картину такие разнородные явления, как оставление традиционных мест нереста, удары морского копра, брачные вокализации морских млекопитающих, сертификация шума судов, изменение

путей миграции, рёв подводных трубопроводов, гибель китов, выбросившихся на берег, гидролокационное облучение и т.д. Если в воздушной акустике объединяющим критерием является слух человека, то для подводного шума сегодня до конца не ясно, что измерять и как измерять, что ещё больше усложняет проблему калибровки. Воздушный шумомер встроен в систему десятков международных стандартов, определяющих нормы и измеряемые характеристики шума, способы измерений параметров шума и калибровки шумомера. В подводной акустике проблемы создания такой системы только начинают осознаваться.

Создание международной нормативной базы, обеспечивающей единство измерений подводного шума, приобретает большое значение. Отечественные наработки в этой области, включая эталонную базу и методики калибровки, должны стать частью этой нормативной базы, что придаст им легитимность — признание на международно-правовом уровне.

ВНИИФТРИ занимает ведущие позиции в области калибровки гидрофонов и активно ведёт работы по различным аспектам калибровки приёмников подводного шума. Значительных результатов удалось достичь благодаря разработке оригинальных методов калибровки в условиях, отягощённых реверберацией звука в бассейне, а также использованию опыта, накопленного в воздушной акустике в области шумомерии. Результаты этих работ могут и должны быть использованы при создании международных норм и стандартов, что обеспечит России достойные позиции в метрологическом обеспечении измерений подводного шума для целей, подлежащих международному регулированию.

Если упустить время и не использовать имеющееся оборудование и наработки, то последствием этого могут стать не только финансовые потери — использование чужих методик измерений и закупка соответствующего специализированного оборудования, но и потери репутационные — сертификация судов отечественного гражданского флота на зарубежных морских испытательных полигонах. Худший сценарий — запустить иностранные организации с их гидрофонами в наши внутренние воды.

Обоснование своевременности исследований

Изначально границу прибрежной зоны государства определяла дальность полёта ядра крепостной артиллерии. Со временем морская граница отодвинулась до 12 миль, но смысл оставался прежним. Сегодня роль пушек начинает исполнять кассовый аппарат. Охрана прибрежной морской территории переходит от пушек к децибелам шума судна, которому разрешат либо не разрешат бесплатный заход в территориальные воды. В практике судоходства начинают применять подходы, широко используемые на суше: не только сертифицируют автомобиль или авиалайнер, но и контролируют реаль-

ный шум транспортного потока либо пролетающего самолёта. В прибрежных зонах активно размещают гидроакустические станции для мониторинга подводного шума.

Приведём некоторые факты. В апреле 2016 г. принят к опубликованию стандарт ИСО 17208-1 «Подводная акустика — Величины и процедура для точных измерений и представления параметров подводного шума кораблей. Часть 1 — Требования к измерениям в глубоком море в целях сравнения».

На заседаниях WG1 ISO/TC 43/SC3 (июнь 2016 г.) состоялись обсуждения замечаний к проекту стандарта ИСО 17208-2 по измерениям подводного шума кораблей на мелководье, т.е. на полигонах, имеющихся в Германии, Нидерландах, Франции, Англии, Китае и др., для которых характерны глубины до 50 м. Результаты измерений излучаемого кораблём подводного шума, проведённых на разных полигонах, достаточно противоречивы (различие результатов достигает 15–20 дБ) [11]. Одна из причин состоит в том, что сегодня ещё не установлены общие модели распространения звука в условиях мелководья, влияние характеристик морского дна и пр. Отметим, что учёт шумового воздействия при наклонной забивке морских свай также требует пересмотра моделей пространственной структуры звукового поля и распространения звука на мелководье.

С завершением работы над этими стандартами будет создана основа для классификации гражданских судов по уровню производимого ими подводного шума и обеспечены условия для обоснования критериев допуска судов в те или иные акватории.

Следующий шаг — регулирование шумового загрязнения акватории. Что касается защиты морской среды, то крупнотоннажное коммерческое судоходство и активное промышленное освоение прибрежных морских зон приводят к тому, что влияние техногенных звуков на морскую фауну неуклонно возрастает. Согласно исследованию Американского геофизического союза (AGU), судоходство в мировом океане возросло в четыре раза за два десятилетия (см. рис. 1). По данным Международного фонда защиты животных, в течение последних 40 лет уровень шума судоходства увеличивается на 6 дБ каждые десять лет!

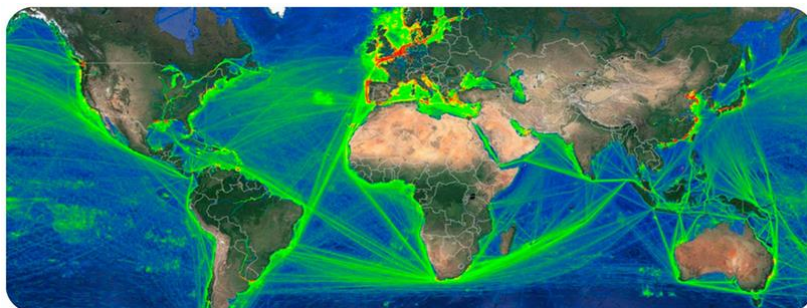


Рис. 1. Карта движения судов с 1992 по 2012 год по данным спутниковых наблюдений

Антропогенные источники подводного шума генерируют звуковую энергию в широком диапазоне частот. В диапазоне от 20 до 300 Гц находятся звуки, производимые многими видами китов, которые не способны отличить шум корабля от естественных звуков океана. Это приводит к столкновению с судами, что является одной из основных причин гибели гладких китов по всему миру. Рамочной директивой ЕС по морской стратегии частоты от 63 до 125 Гц признаны наиболее опасными для морской фауны. Воздействие источников шума является причиной физиологических проблем у водных обитателей — ухудшение слуха нарушает модель поведения и может стать толчком к миграции из традиционных мест обитания. Также значительны косвенные последствия увеличения фонового уровня шума, например эффект маскировки звуков, жизненно важных для общения и добывания корма.

В Евросоюзе принято 90 директив, среди них: директива Совета 92/43/ЕЕС по сохранению естественных сред обитания дикой фауны и флоры [12] и директива 2008/56/ЕС Европейского парламента и Совета, устанавливающая рамки для действий сообщества в области морской экологической политики (Рамочная директива по морской стратегии) [13]. Выполнению этих директив, в том числе их метрологическому обеспечению, уделяют большое внимание.

Для приложений, требующих продолжительной непрерывной подводной звукозаписи, большое распространение получили автономные измерительные аппараты — рекордеры, которые сочетают в себе функции гидрофона и устройства для сбора, накопления и хранения данных. На рисунке 2 представлен внешний вид гидроакустического рекордера типа AURAL M2 (автономная работа без перезарядки батарей — до 300 часов).

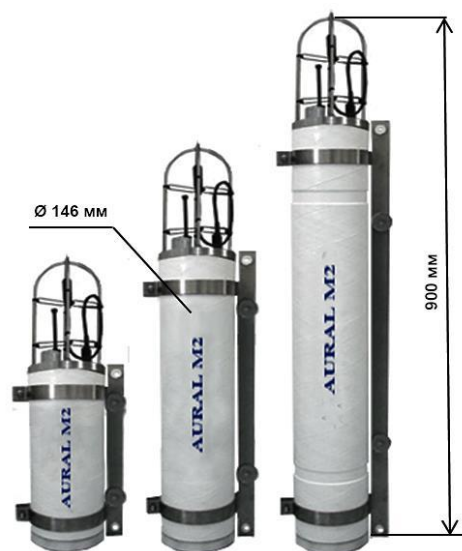


Рис. 2. Гидроакустические рекордеры типа AURAL

Конструктивно рекордер представляет собой герметичный стальной корпус с аппаратурой и гидрофон, закреплённый на небольшом расстоянии от корпуса. Как правило, измерения подводного шума выполняют в третьоктавных полосах в широком (от 20 Гц до 63 кГц) диапазоне частот. Рекордеры применяют для решения разнородных акустических задач от измерения шума локализованных источников в условиях офшорного мелководья (корабль, ветросиловая установка, морской копер и т.п.) до записи звуков в отсутствие преимущественного направления прихода звуковых волн (морские млекопитающие, растрескивание льда, мониторинг шумового загрязнения акватории).

О масштабах использования рекордеров можно судить по их количеству и местам размещения, охватывающим наиболее оживлённые трассы морских перевозок, обозначенных на карте рис. 3.

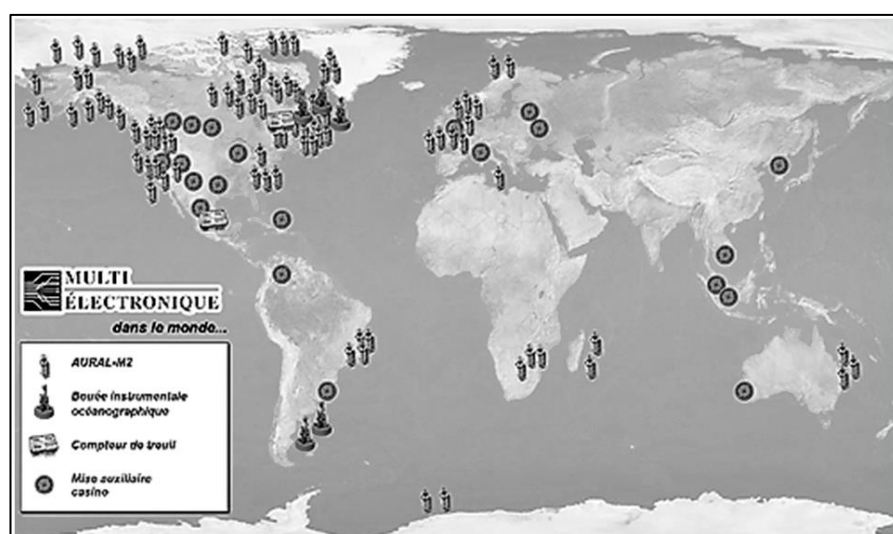


Рис. 3. Размещение рекордеров

Особое внимание сосредоточено сегодня на проблеме воспроизводимости результатов измерений. При использовании одной и той же методики измерений на воспроизводимость результатов влияет не только картина распространения звука на морском полигоне, но и правильный учёт метрологических характеристик применяемого гидроакустического приёмника. До сих пор считается, что единство калибровки обеспечено, если она выполнена в соответствии с рекомендациями МЭК на калибровку гидрофона. Однако это не так. Во-первых, после того как калиброванный гидрофон устанавливают на измерительную платформу (рекордер, носитель, система вывешивания и т.п.), характеристики полученного гидроакустического приёмника существенно отличаются от характеристик гидрофона. Во-вторых, при калибровке гидрофона по МЭК 60565 определяют не те характеристики, которые

были бы адекватны реальным условиям измерений подводного звука в море. Сегодня вне зависимости от решаемой измерительной задачи в качестве чувствительности приёмника подводного шума вынужденно используют чувствительность гидрофона по свободному полю, которую определяют по МЭК 60560 на фиксированных частотах 1/3-октавного ряда, а применяют полученные значения чувствительности для вычисления уровня подводного шума в 1/3-октавных полосах частот по данным, полученным с использованием гидрофона, установленного на измерительную платформу. То есть вместо оптимальной характеристики, которая требуется для решения измерительной задачи, применяют ту, которую научились получать при калибровке.

Сложилась парадоксальная ситуация: специалисты, выполняющие калибровку, предпочитают пользоваться характеристикой, которую можно получить с наивысшей точностью, а специалисты, которые выполняют измерения в море, вынуждены эту характеристику применять. Как в известном анекдоте: ищут не там, где потеряли, а там, где светло. По мере решения проблем, связанных с особенностями распространения звука в мелком и глубоком морях, воспроизводимость результатов измерений всё в большей степени будут определять метрологические характеристики средств, применяемых для измерений подводного звука.

Директивы Евросоюза обозначили конечную цель — получение результатов локальных измерений уровня шума морской акватории с показателями неопределённости 1 дБ для гидрофонов и 1–1,5 дБ для рекордеров, что обеспечило бы достоверность и сопоставимость результатов измерений в различных акваториях разными пользователями. Однако в настоящее время не существует стандартов для поверки и калибровки рекордеров и гидроакустических приёмников, применяемых в морских условиях. Ситуацию усугубляет тот факт, что рекордеры не обладают «акустическим» совершенством конструкции измерительного гидрофона и могут искажать звуковое поле в точке приёма на 15 и более децибел. Результаты калибровок подводных рекордеров, применяемых для долгосрочного мониторинга подводного шума в морских акваториях европейских стран, свидетельствуют о том, что в настоящее время выдвинутым в директивах требованиям не соответствуют ни качество аппаратуры, ни методы её калибровки. При этом если задачу калибровки гидрофона на частотах ниже 1 кГц можно решить с помощью акустической камеры, то применить акустическую камеру для калибровки рекордера невозможно (габариты приёмника много больше габаритов рабочего объёма камеры, дифракционные эффекты могут быть значительны даже на таких низких частотах). До настоящего времени на частотах от 1 кГц и ниже отсутствуют методы калибровки рекордеров, прослеживаемые к национальным эталонам. Для решения этой проблемы ЕВРАМЕТ инициировал в рамках проекта EMPIR Call 2015 – EURAMET тему 15RPT02 (UNAC-LOW) по разработке стандарта на калибровку гидрофонов и гидроакустиче-

ских рекордеров на частотах от 20 Гц до 1 кГц. Предусмотрено включение разрабатываемого стандарта в Рамочную директиву ЕС по морской стратегии, чтобы придать ему статус международного стандарта, обязательного к использованию при измерениях подводного шума.

На 10-м совещании CCAUV CIRM (ноябрь 2015 г.) среди актуальных задач современной метрологии акустических измерений названы:

- расширение возможностей эталонной базы;
- повышение точности калибровки приёмника звука;
- расширение номенклатуры характеристик, измеряемых при калибровке.

При этом на первый план выходит проблема валидации — калибровки приёмника применительно к условиям его эксплуатации и решаемой измерительной задаче. В отношении подводной акустики это означает, что дальнейшее повышение точности калибровки эталонного гидрофона на тональном сигнале будет иметь смысл только для ограниченного круга специалистов, занимающихся лабораторными измерениями. Создаваемая система международных стандартов требует калибровать не гидрофоны, а приёмники подводного шума. К разработке методик такой калибровки в рамках темы 15RPT02 приступили шесть метрологических институтов из Великобритании, Италии, Швеции, Дании, Турции. На рисунке 4 обозначены зоны ответственности, закреплённые за этими институтами. В этих зонах будет осуществляться постоянный мониторинг подводного шума, в том числе создаваемого торговыми судами, ветроэнергетическими установками, подводными нефте- и газопроводами и т.п.



Рис. 4. Зоны ответственности постоянного мониторинга подводного шума

Обратим внимание на стрелки, направленные в сторону внутренних вод России. Также озабоченность вызывает отсутствие стрелок с территории России. Если учесть планы европейских государств классифицировать все гражданские суда по уровню их шумоизлучения и оградить свои прибрежные воды от захода в них судов с высоким уровнем шумового воздействия, то следствием могут стать ограничения либо запрет выхода российских судов из Чёрного и Балтийского морей.

Национальная сертификация судов по излучаемому подводному шуму не решит этой проблемы. Для выполнения требований, устанавливаемых европейскими документами, потребуется не только создание соответствующей гидроакустической измерительной аппаратуры, но и взаимное признание результатов её калибровок (в соответствии с принципами «Соглашения о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации» от 1992 г.), основные показатели для которого — согласованность и прослеживаемость результатов калибровки, прошедшей международную аккредитацию. В связи с этим показателен пример ситуации, сложившейся в 90-е годы, — метрологическое обеспечение мониторинга шумового загрязнения морской акватории в проекте «Сахалин-2» осуществляет Национальная физическая лаборатория (НФЛ) Великобритании. Российской Федерации, имеющей выходы в Баренцево, Балтийское и Чёрное моря, придётся соответствовать европейским нормам: для коммерческих судов — по измерению их шумности; применительно к нефте- и газопроводам, морским нефтедобывающим платформам и объектам инфраструктуры — постоянный мониторинг подводного шума, в том числе вдоль подводных трасс строящегося «Турецкого потока», Керченского моста, «Северного потока 2» и т.п.

В то же время без участия России остаются неохваченными Баренцево море, прибрежные зоны Северного и Дальневосточного регионов, значительные области Чёрного и Балтийского морей, что в значительной мере снижает полноценность результатов мониторинга, а также достоверность оценок последствий шумового загрязнения морской среды. Осознавая всю сложность вопросов, связанных с привлечением России к Европейской программе (одна из известных проблем — возможность записи шума, излучаемого военными кораблями), участники дискуссии ЕВРАМЕТ (февраль 2016 г.) высказались в пользу сотрудничества с РФ в целях исключения дублирования, обеспечения полноты и сопоставимости результатов исследований.

В рамках проекта EMPIR Call 2015 ЕВРАМЕТ поставил следующие научно-технические цели:

- развитие прослеживаемых измерительных возможностей для калибровки гидрофонов на частотах от 20 Гц до 1 кГц, охватывающих, согласно руководящим принципам Рамочной директивы ЕС по морской стратегии, третьоктавные полосы частот от 63 до 125 Гц;

- развитие методов, обеспечивающих прослеживаемость результатов калибровки, которые помогут национальным метрологическим институтам и поверочным лабораториям калибровать автономные подводные акустические записывающие устройства, предназначенные для длительного мониторинга океана на частотах от 20 Гц до 1 кГц, включая третьоктавные полосы частот от 63 до 125 Гц;
- формирование индивидуального подхода для каждого участника проекта с целью использования в течение длительного периода разработанных измерительных возможностей, включая нормативно-правовое обеспечение, проведение совместных исследований, системы контроля качества и аккредитации, способствующих развитию целостного метрологического подхода в области подводной акустики, что способствует значительному увеличению научного потенциала в этом направлении.

По результатам исследований погрешность акустического мониторинга и прогнозирования шумового загрязнения моря с учётом неопределённости входных параметров и распространения звука не должна превышать 3 дБ (*Report No. M100004/64. WG "Lärm/Energie". Federal Agency for Nature Conservation of Germany*). Стандарт ANSI S12.64-2009 устанавливает нормы на неопределённость измерения уровней излучаемого кораблём подводного шума: 1,5 дБ — точный метод (*Grade A*); 3 дБ — инженерный метод (*Grade B*). Вместе с тем прослеживаемость результатов калибровки используемых средств измерений сегодня обеспечивается только рекомендацией МЭК на калибровку гидрофона, которую выполняют на гармонических сигналах с фиксированными частотами.

По данным НФЛ Великобритании, при калибровке по МЭК 60565 неравномерность частотной зависимости чувствительности и характеристик направленности гидроакустического рекордера AURAL M2 достигает 17 дБ в пределах третьоктавной полосы [14]. Использование таких характеристик приводит к результатам, неприемлемым с точки зрения современной точности измерений подводного шума. Неравномерность характеристик того же рекордера, усреднённых в третьоктавных частотных полосах, немногим превышает 2 дБ, что удовлетворяет требованиям класса точности *Grade B* по измерению шума корабля.

Разработанные во ФГУП «ВНИИФТРИ» и апробированные на международных и ключевых сличениях методы позволяют выполнять калибровку гидрофона на шумовых и ЛЧМ-сигналах. Одним из преимуществ такой калибровки является возможность по её результатам определять не только чувствительность гидрофона в соответствии с МЭК 60565, но и энергетическую чувствительность приёмника подводного звука в полосах частот, стандартизованных для измерения подводного шума. Использование энергетической чувствительности в полосе частот позволяет, с одной стороны, повысить достоверность оценок метрологических характеристик преобразователя

при приёме широкополосного подводного шума, с другой стороны, адекватно учесть эти характеристики при измерениях. Вместе с тем прямое использование методов калибровки гидрофонов не решает задачу калибровки рекордера.

Аналогом гидроакустического рекордера в воздушной акустике является шумомер — приёмник, микрофон которого вынесен на некоторое расстояние от корпуса. Современный шумомер позволяет одновременно измерять десятки параметров, характеризующих шум как в диффузном, так и в свободном поле. Процесс стандартизации приборов и методов измерений в воздушной акустике продолжается, однако накопленный опыт позволяет чётко разделять параметры шумомера, определяемые при его калибровке, в зависимости от вида измеряемых звуковых полей и сигналов. При развитии системы метрологического обеспечения строго соблюдается принцип, заложенный в идею шумомера, — неразрывность норм и требований к шумомеру, методов его калибровки и поверки. Аналогичную задачу предстоит решать в гидроакустике.

Необходимость расширения номенклатуры метрологических характеристик, определяемых при калибровке приёмника подводного звука, становится очевидной. Уже сегодня понятны требования к номенклатуре метрологических характеристик гидроакустического приёмника, которые позволят измерять уровень шума окружающей среды, уровень звукового давления шума корабля с заданным частотным взвешиванием, для акустического импульса — измерять уровень звуковой экспозиции, среднее квадратическое и пиковые значения. Номенклатура таких характеристик может быть построена на основе квазинепрерывных частотных характеристик приёмника по полю. Наличие таких характеристик, измеренных в зависимости от угла падения звуковой волны, позволяет расчётным путём получить характеристику направленности в полосе частот по полю, чувствительность приёмника в диффузном поле и другие метрологические характеристики приёмника. Энергетическую чувствительность можно рассчитать как среднее квадратическое значение (СКЗ) в полосе частот квазинепрерывной частотной характеристики гидрофона [15]. Совокупность подробных частотной и фазовой характеристик позволяет правильно измерить пиковое значение импульсного акустического сигнала.

Отметим, что получение таких характеристик требует больших объёмов измерительной информации, обеспечить которые тонально-импульсный метод не может. Для измерения квазинепрерывной амплитудно-фазовой частотной зависимости предпочтительно использовать сигналы с распределённой по частоте мощностью, например шумовой или ЛЧМ-сигнал, которые в условиях, отягощённых реверберацией звука в гидроакустическом бассейне, позволяют выполнить измерения по полю с эталонной точностью [15].

Применение широкополосных сигналов для калибровки рекордеров является актуальной научной задачей, поскольку остаются нерешёнными вопросы, связанные с калибровкой в бассейне по свободному полю на частотах ниже 1 кГц, обеспечением условий дальнего поля (локально плоской падающей волны), учётом рассеяния звука на удалённых от точки приёма элементах конструкции рекордера, определением чувствительности по диффузному полю и использованием дифракционных поправок.

Методы и сигналы для калибровки акустических приёмников

На рисунках 5 и 6 представлены частотные характеристики чувствительности рекордера AURAL 2M, измеренные в НФЛ тонально-импульсным методом на частотах от 1 до 100 кГц [14]. Частотные характеристики на рис. 5 получены при фронтальном падении звуковой волны на рекордер, характеристики на рис. 6 — при боковом падении.

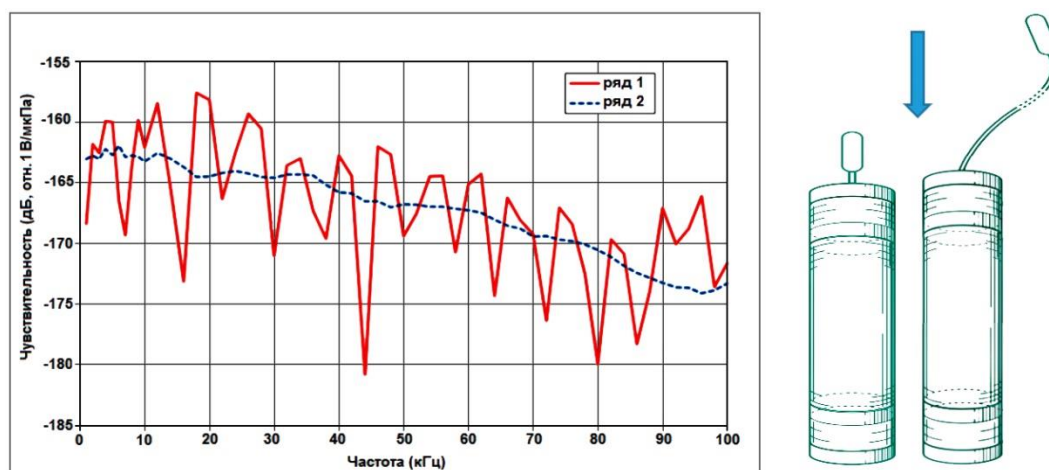


Рис. 5. Частотные характеристики чувствительности рекордера при фронтальном падении звуковой волны: ряд 1 — гидрофон закреплён жёстко на корпусе; ряд 2 — гидрофон вывешен на кабеле

Кривые 1 на рис. 5 и 6 — гидрофон жёстко закреплён вблизи торцевой поверхности корпуса, кривые 2 — гидрофон вывешен на кабеле на удалении от корпуса. Малые различия в поведении зависимостей, представленных кривыми 2, и их незначительные осцилляции позволяют сделать вывод о слабом влиянии звуковой волны, рассеянной корпусом рекордера, на звуковое поле в удалённом от корпуса месте расположения гидрофона как при фронтальном, так и при боковом падении звуковой волны. Небольшие различия в поведении зависимостей на рис. 6 означают, что при боковом падении звука на рекордер искажения звукового поля в месте размещения

гидрофона малы как для удалённого от корпуса гидрофона, так и для гидрофона, жёстко закреплённого вблизи корпуса. При фронтальном падении волны на рекордер с жёстко закреплённым гидрофоном влияние рассеянной корпусом звуковой волны весьма значительно. Зависимость, представленная кривой 1 на рис. 5, искажена осцилляциями, размах которых достигает 18 дБ. Период осцилляций составляет примерно 8 кГц, что соответствует расстоянию 9 см от активного элемента гидрофона до источника рассеяния звуковой волны — торцевой поверхности корпуса рекордера.

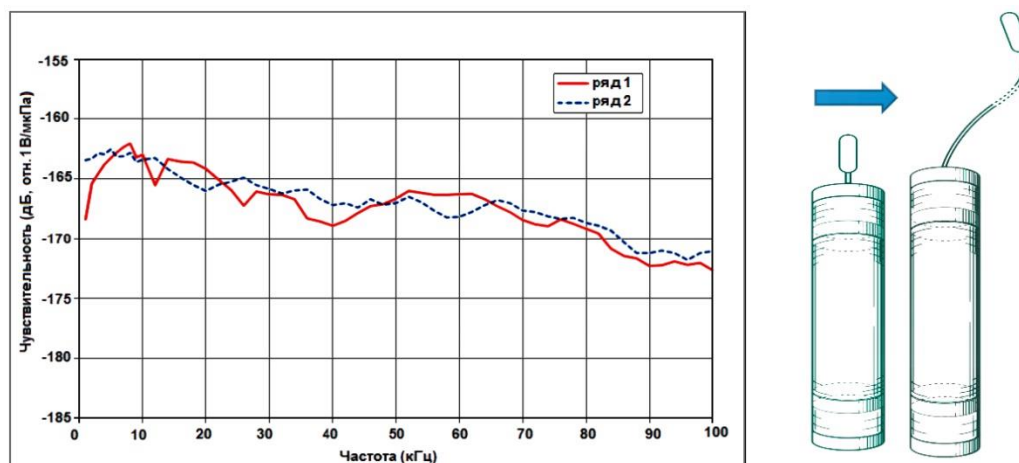


Рис. 6. Частотные характеристики чувствительности рекордера при боковом падении звуковой волны: ряд 1 — гидрофон закреплён жёстко на корпусе; ряд 2 — гидрофон вывешен на кабеле

Обратим внимание, что на представленных рисунках с уменьшением частоты размах осцилляций зависимости не уменьшается, как можно было того ожидать исходя из соотношения между длиной звуковой волны, падающей на рекордер, и габаритами рекордера. Причин этому может быть несколько. Первая — редкий шаг по частоте при измерениях тонально-импульсным методом не позволяет детально представить поведение осцилляций на графике, и влияние рекордера может быть существенно бóльшим, о чём можно судить по представленной зависимости. Вторая — большая погрешность тонально-импульсного метода на нижнем пределе частотного диапазона измерений. Наконец, неудачное крепление гидрофона, при котором звуковая волна, распространяющаяся по корпусу рекордера, оказывает существенное влияние.

В пользу проявления большой погрешности тонально-импульсного метода на низких частотах говорит сравнение частотных зависимостей, представленных кривыми 1, при фронтальном и боковом падениях звука. На частоте 1 кГц значения чувствительности практически не различаются, хотя

по поведению осцилляций зависимости резко различаются. Если при фронтальном падении завал частотной характеристики на частоте 1 кГц можно объяснить периодичностью осцилляций, то при боковом падении размах осцилляций значительно меньше, а глубина завала остаётся прежней.

Широкополосные сигналы в воздушной акустике

Тонально-импульсный метод решает проблемы калибровки гидрофона, однако малая информативность результатов калибровок, полученных тонально-импульсным методом, затрудняет его использование для калибровки гидроакустического приёмника. Опыт НФЛ наглядно показал, что применение стандартной процедуры калибровки тонально-импульсным методом приводит также к неприемлемым ошибкам в оценке неравномерности частотной характеристики (ЧХ) гидроакустического приёмника. Для калибровки гидроакустических приёмных модулей во ВНИИФТРИ успешно применяли широкополосный сигнал [15–17]. Однако арсенал методов измерений, использующих широкополосные сигналы для выполнения метрологических работ в гидроакустике, явно недостаточен, что заставляет обратиться к опыту, накопленному в архитектурной акустике.

Проблему измерения передаточного импеданса пары излучатель — приёмник в воздушной акустике решают, помещая пару в свободное звуковое поле безэховой камеры. Однако пара громкоговоритель — слушатель обычно находится не в свободном звуковом поле, а в помещении с отражающими звук стенами. При этом внимание воздушных акустиков сосредоточено не на измерении характеристик передатчика и приёмника, а на определении акустических характеристик помещения: передаточной функции (ПФ) и соответствующей ей импульсной характеристики (ИХ), из которых получают многие акустические параметры, связанные с качеством восприятия звука. Опыт применения частотно-модулированных сигналов в качестве сигналов возбуждения показал значительно более высокую устойчивость таких измерений к искажениям в сравнении с псевдошумовыми сигналами.

Исторически один из первых способов регистрации ПФ основан на использовании частотно-модулированного сигнала возбуждения, который поступал от аналогового генератора, синхронизированного с механизмом подачи бумаги самописца. Полученная запись представляет частотную зависимость напряжения выходного сигнала. Чтобы эту зависимость интерпретировать как модуль ПФ, при измерениях амплитуду сигнала возбуждения поддерживали постоянной, независимо от частоты. Запись пары излучатель — приёмник в помещении представляет собой не ПФ помещения и не ПФ пары в свободном звуковом поле, а ПФ пары в реверберационном звуковом поле помещения.

Подавить влияние отражений звука в помещении при измерениях ПФ с использованием линейно частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала позволяет вариант метода спектрометрии временных задержек (СВЗ) с использованием временной задержки [18–21]. Метод СВЗ основан на том, что на входе приёмника мгновенные частоты прямого и отражённых помещением ЛЧМ-сигналов различаются. Генератор формирует синусный и косинусный ЛЧМ-сигналы. Излучают синусный ЛЧМ-сигнал. Для получения действительной и мнимой частей ПФ принятый сигнал умножают на синусный и косинусный сигналы генератора, задержанные на время распространения прямого сигнала. Умножители выполняют функцию смесителя при супергетеродинном приёме в радиотехнике, создавая компоненты суммарной и разностной частот. Разностные частоты выделяют с помощью фильтров низких частот (ФНЧ). После введения временной задержки мгновенные частоты сигналов генератора и принятого прямого сигнала близки, их разностная частота будет очень низкой и, следовательно, выходной сигнал разностной частоты не будет ослаблен ФНЧ. Изменения амплитуд выходных сигналов ФНЧ во времени представляют частотную зависимость действительной и мнимой частей ПФ.

Изменение частоты по линейному закону приводит к ухудшению отношения сигнал/шум на низких частотах, где выходной сигнал излучателя резко уменьшается. Для борьбы с этим эффектом в методе СВЗ сужают полосу пропускания ФНЧ, что приводит к необходимости уменьшать скорость изменения частоты ЛЧМ-сигнала.

Другим недостатком являются пульсации на низких частотах. При высоких мгновенных частотах суммарные частоты достаточно велики и подавляются ФНЧ. На низких частотах суммарная частота оказывается близкой либо меньшей частоты среза ФНЧ, что проявляется в возникновении паразитных «биений» в восстановленной амплитудно-частотной характеристике.

Уменьшение скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала и пропорциональное сужение полосы пропускания ФНЧ приводит к ослаблению «биений». Более эффективным является способ так называемого «зеркального» повторения измерений: описанную последовательность операций применяют как к синусному, так и к косинусному сигналу, за исключением низкочастотной фильтрации. Для получения действительной и мнимой части ПФ действительная часть результата второго измерения добавляется к действительной части, полученной первым измерением, а мнимая часть результата второго измерения вычитается из мнимой части первого измерения. При этом компоненты суммарных частот будут подавлены [22–24], что исключает принципиальную необходимость низкочастотной фильтрации.

Полученные результаты будут включать ПФ помещения. Для измерения ПФ громкоговорителя используют ФНЧ, чтобы подавить отражения звука в помещении, шумовую помеху и гармоники громкоговорителя. Однако

даже после кропотливой регулировки частоты среза ФНЧ метод СВЗ не обеспечивает полного подавления отражений из-за ограниченной крутизны фильтров нижних частот.

При измерениях с использованием БПФ анализа излучаемого и принимаемого сигналов громкоговоритель возбуждают широкополосным сигналом (квазишумовой, М-последовательность и т.п.), используя накопление по реализациям, вычисляют спектры мощности и взаимный спектр сигнала возбуждения и сигнала на выходе приёмника. Комплексную ПФ вычисляют делением комплексно сопряжённого взаимного спектра на спектр мощности сигнала возбуждения [25]. Особенностью двухканального БПФ является возможность оценить отношение сигнал/шум, не прерывая излучение, как отношение $v^2 / (1 - v^2)$, где v^2 — функция когерентности, которую получают делением квадрата модуля взаимного спектра на произведение спектров мощности [26].

К недостаткам метода можно отнести большую продолжительность и недостаточную точность измерений из-за необходимости усреднять большое число данных. Кроме того, БПФ даёт правильные результаты только при обработке сигналов, повторяющихся с периодом, равным длине блока БПФ. Для непериодических сигналов начальная и конечная точки обычно не совпадают, что существенно искажает результат БПФ. Эти искажения уменьшают, применяя оконную обработку, однако возникающий при этом эффект сглаживания ухудшает частотное разрешение, наиболее пагубно сказываясь на низких частотах.

Самым трудоёмким способом получения ПФ является использование чистых тонов с пошаговым увеличением частоты. Способ применяют как для измерения ПФ помещения, так и для измерения ПФ пары излучатель — приёмник [27]. В последнем случае при необходимости исключить влияние отражений принятый сигнал оценивают на временном интервале, предшествующем моменту прихода первого отражения. Использование БПФ для оценки амплитуды чистого тона накладывает дополнительное ограничение — чтобы избежать «размытия» спектральных составляющих, длительность подвергаемой БПФ реализации должна быть кратной периоду чистого тона. Получение информации об измеряемой ПФ происходит на этапе существования сигнала, что является явным недостатком метода в сравнении с методами восстановления ПФ с использованием широкополосных сигналов.

Использование импульса в качестве сигнала возбуждения кажется естественным способом получения ИХ, а также самым простым подходом к получению ПФ на основе БПФ [28, 29]. Если в качестве импульса возбуждения использовать импульс в виде функции Дирака, то реакция приёмника является искомой ИХ. Использование импульса — удобный способ чисто электрических измерений, при которых нет отражений, а влияние шумов и нелинейных искажений незначительно. Чтобы излучить сигнал близкий к функции

Дирака, импульс генератора должен быть очень коротким. Для того, чтобы обеспечить приемлемое отношение сигнал/шум, импульс возбуждения громкоговорителя должен быть предельно мощным, что приводит к искажениям излучённого сигнала. При этом линейные и нелинейные искажения сигнала разделить невозможно — частотная характеристика и гармоники оказываются неотличимыми.

Усечение принятого сигнала по времени, даже приходящееся на шумовой шлейф, приводит к искажениям ПФ, которые неизбежно сказываются на результате измерений в области низких частот. Поскольку энергия короткого импульса мала, а спектр очень широкий, то по помехозащищённости метод значительно уступает рассмотренным выше. Периодическое повторение импульса возбуждения позволяет увеличить отношение сигнал/шум, но приводит к усечению по времени.

Измерения с использованием М-последовательности оказались довольно популярными в акустике, но имеют несколько недостатков. Основными являются искажения прямоугольной формы сигнала излучателем и антиалайзинговым фильтром, а также временная нестабильность громкоговорителя. Для низкочастотных измерений наиболее нежелательным свойством М-последовательностей является их равномерный спектр, что приводит к малому соотношению сигнал/шум в области низких частот [30, 31].

Использование периодического повторения широкополосного сигнала возбуждения даёт выигрыш в требуемых вычислительных ресурсах, позволяет применять для измерений одноканальную систему. Использование одного канала позволяет исключить погрешности, обусловленные неидентичностью электрических трактов в двухканальной системе. Другие заметные преимущества периодического повторения широкополосного сигнала возбуждения отсутствуют.

Частотная характеристика громкоговорителя существенно отличается от равномерной, поэтому при измерениях ПФ помещения результирующая характеристика будет искажена частотной характеристикой громкоговорителя. Для того чтобы исключить искажения, обусловленные громкоговорителем, необходимо использовать частотную коррекцию излучаемого сигнала. Такую коррекцию можно выполнить, зная частотную характеристику громкоговорителя. Получить ЧХ громкоговорителя в безэховой камере не составляет труда. Ситуацию ухудшает зависимость ЧХ от направления. Более того, ЧХ громкоговорителя, измеренная в безэховой камере, становится бесполезной в помещении с отражениями. Поскольку звуковое давление в точке расположения микрофона либо слушателя создаётся как прямой волной громкоговорителя, так и волнами, излучёнными громкоговорителем в различных направлениях и отражёнными стенами помещения. Для решения этой проблемы при акустических измерениях в помещении ISO 3382 предписывает,

чтобы используемый громкоговоритель был «все­направленным» — условие, которое на практике невозможно удовлетворить на частотах более 2 кГц.

Наряду с конструированием ненаправленного громкоговорителя при измерениях акустических характеристик помещения применяют ЧХ акустической мощности громкоговорителя [29]. Этапы получения спектра акустической мощности громкоговорителя представлены зависимостями 1–6 на рис. 7. Измерения выполняют, излучая шумовой сигнал в реверберационной камере (зависимость 1). Спектры звуковых давлений, измеренных в различных точках реверберационной камеры, усредняют. ЧХ акустической мощности получают умножением усреднённого спектра (зависимость 2) на функцию, обратную зависимости времени реверберации от частоты (зависимость 3). Полученную ЧХ (зависимость 4) сглаживают скользящим усреднением в выбранной частотной полосе, например 1/6 или 1/3 октавы.

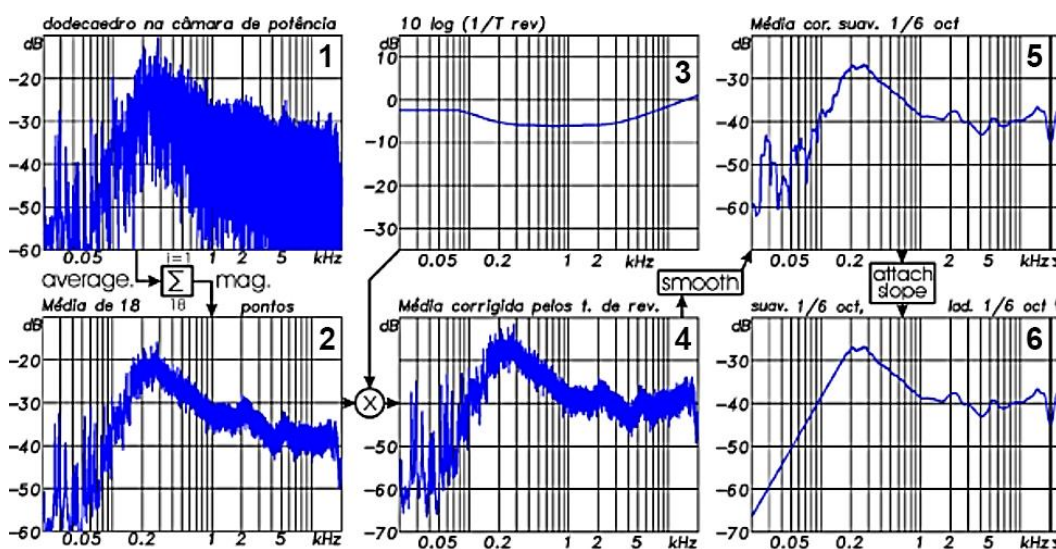


Рис. 7. Этапы получения спектра акустической мощности громкоговорителя в диффузном поле реверберационной камеры

На низких частотах сглаженная ЧХ (зависимость 5) искажена влиянием собственных мод реверберационной камеры, плотность которых недостаточна для эффективного усреднения на низких частотах. Для получения ПФ громкоговорителя авторы заменяют низкочастотный участок ПФ наклонной кривой с теоретическим уменьшением чувствительности динамика 12 дБ/октава для акустической системы закрытого типа или 24 дБ/октава для системы открытого типа (зависимость 6). Комплексную ПФ авторы получают, дополняя полученную таким образом ЧХ акустической мощности фазочастотной характеристикой, измеренной в безэховой камере в опорном направлении громкоговорителя.

Полученная ЧХ представляет собой частотную зависимость чувствительности громкоговорителя на излучение по мощности в полосе частот усреднения, применённого при сглаживании. Аналогом этой характеристики для приёмника звука является чувствительность по мощности в полосе частот, усреднённая в телесном угле 4π . Если перейти к терминам, используемым при описании приёмника звука, то чувствительность в полосе частот, усреднённую в телесном угле 4π , называют чувствительностью по диффузному полю, которую широко используют в воздушной акустике при измерениях в диффузном и реверберационных звуковых полях.

В методе гомоморфной времяселективной постобработки (ГПО) экспериментально полученную ЧХ также заменяют наклонной прямой на низких частотах, несмотря на то что измерения выполняют в заглушенной камере [33]. Заглушённую камеру принято называть «безэховой», но это справедливо лишь в ограниченном диапазоне частот. С уменьшением частоты звукопоглощающие свойства покрытия камеры ухудшаются, что приводит к появлению отражений, которые искажают измеренную ЧХ осцилляциями. Дополнительным источником искажений является малое отношение сигнал/шум, поскольку в качестве излучателя используют обратимый преобразователь.

Помимо указанных проблем возможности измерений на низких частотах ограничивают следующие факторы:

- крутые наклоны ЧХ излучателя, который ведёт себя как монополь на частотах с длиной излучаемой волны, много большей размеров излучателя, требуют высокой стабильности частоты сигнала и высокого разрешения по частоте;
- повышение отношения сигнал/шум накоплением увеличивает продолжительность измерительного эксперимента;
- на результат низкочастотных измерений сильное влияние оказывают помехи питающей сети, вибрация, перекрёстная электрическая помеха, внешний инфразвук и т.д.

Разработка метода измерений ЧХ на низких частотах требует как минимум решения проблемы устранения влияния отражений звука и обеспечения достаточного отношения сигнал/шум.

Выполненный анализ будет неполным без рассмотрения особенностей влияния на низких частотах оконной обработки, которая используется в большинстве современных методов измерений ЧХ. Эти особенности рассмотрим на примере гомоморфной времяселективной постобработки, которую применяют при калибровочных работах в воздушной акустике.

Этапы получения подробной частотной характеристики микрофона по полю методом времяселективной гомоморфной (относительно преобразования Фурье) постобработки представлены на рис. 8. В помещении с отражениями измеряют подробную комплексную частотную зависимость пары

излучатель — приёмник. К полученной искажённой отражениями частотной зависимости применяют обратное преобразование Фурье, переходя, таким образом, из частотной области в квазивременную область временных задержек — квефренций.

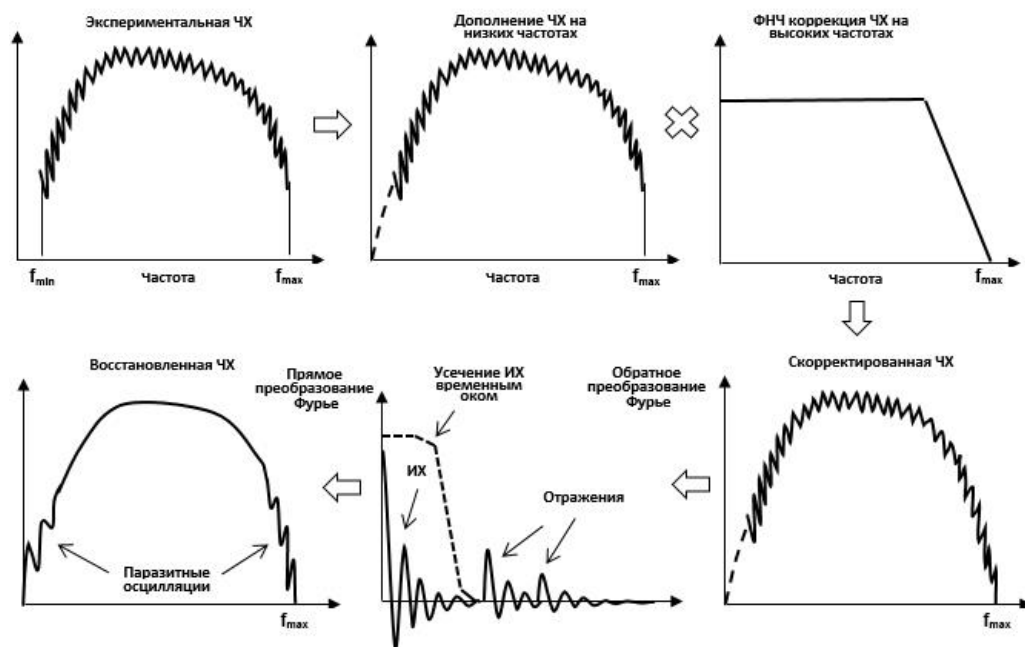


Рис. 8. Схема процедуры удаления отражений из комплексной ЧХ

Полученный кепстр представляет собой последовательность из искомой ИХ пары излучатель — приёмник в свободном поле и сдвинутых относительно неё по оси квефренций в порядке прихода отражений в точку приёма копий ИХ.

Полученный кепстр усекают окном по квефренции $\tau_q < \tau_{ref}$, оставляя не обнулённой свободную от отражений часть исходного кепстра. Частотную характеристику в свободном поле получают прямым преобразованием Фурье усечённого кепстра. Результирующая частотная зависимость не будет искажена отражениями, но при этом может существенно отличаться на низких частотах от искомой ЧХ в свободном поле. Преобразование Фурье (прямое либо обратное) преобразует свёртку в произведение и наоборот. Если усечение по квефренции представить как умножение кепстра на квазивременное окно (прямоугольной либо заданной формы) продолжительностью τ_q , то преобразование Фурье усечённого кепстра есть свёртка искомой ЧХ и спектра применённого окна, что эквивалентно усреднению искомой ЧХ в эффективной полосе частот Δf_{eff} , ухудшающему частотное разрешение.

Применяемое окно не должно искажать искомую ИХ (должно быть равно единице в интервале квефренций искомой ИХ и полностью устранять задержанные копии ИХ). Единичное прямоугольное окно удовлетворяет этим требованиям, но большие боковые лепестки спектра такого окна всегда вносят паразитную осцилляцию в ЧХ. Возникновение этой осцилляции обусловлено тем, что реальная ЧХ не затухает полностью в границах окна, и усечённая ИХ приобретает резкий скачок, что *нарушает положенный в основу метода принцип гомоморфности*. В наибольшей степени эта осцилляция проявляется на низких частотах, где значения ЧХ сравнимы с амплитудой осцилляции. Влияние скачка можно уменьшить, применяя временное окно со сглаженной характеристикой пропускания.

Другими словами, при реализации условий свободного поля происходят два действия, находящиеся в диалектическом противоречии. Одно действие имеет собой положительный результат — частотную зависимость очищают от искажений, вызванных отражениями, но результат другого действия противоположен по смыслу первому — искомую частотную характеристику искажают («размывают»), усредняя по частоте, что составляет «плату» за выигрыш от действия первого. При этом ширина частотной полосы «размытия» Δf_{eff} зависит от типа и параметров применяемого окна, а её связь с временем $\Delta \tau_{ref}$, предшествующим отражениям, подчинена известному соотношению неопределённости $\Delta f_{eff} \geq 1/\Delta \tau_{ref}$.

Помимо размывания по частоте использованию метода ГПО для калибровки гидроакустических приёмников препятствуют два недостатка. Первый недостаток, как и при пошаговом увеличении частоты чистого тона, обусловлен чрезмерной продолжительностью измерений подробных ЧХ. Второй вызван необходимостью сохранять в процессе эксперимента гомоморфность постобработки. На практике это означает необходимость измерять ЧХ, что называется «от нуля до нуля», то есть в частотном диапазоне, далеко простирающемся за границы рабочего диапазона излучателя и приёмника как в сторону низких, так и в сторону высоких частот.

При этом на низких частотах экспериментальную ЧХ искусственно достраивают до нулевой частоты, заменяя её кривой с наклоном 12 дБ/окт, и корректируют на высоких частотах, заменяя обрыв экспериментальных данных ЧХ, убывающей до нуля зависимостью, поскольку обрыв нарушает казуальность ЧХ, что неизбежно сказывается на ИХ. Чтобы обеспечить необходимое отношение сигнал/шум, калибровку микрофона с использованием ГПО выполняют в заглушенной камере, которую в данном случае используют для изоляции от внешних шумов [33]. В отличие от воздушной акустики обеспечить такие условия при измерениях в лабораторном гидроакустическом бассейне не представляется возможным.

По результатам выполненного анализа можно сделать следующее заключение. Измерения модуля ПФ с помощью самописца, управляющего раз-

вёрткой частоты генератора, можно выполнять в двух зонах гидроакустического бассейна, которые с большой степенью условности можно отнести к зоне свободного и зоне диффузного звукового поля. При этом размеры зоны свободного поля настолько малы, что она находится в пределах зоны ближнего поля приёмника и/или излучателя. Зона диффузного поля имеет большие размеры и удалена от излучателя, но качество диффузного поля не позволяет выполнять измерения с погрешностью менее 3 дБ [34].

Метод СВЗ не получил распространения в практике калибровочных работ в гидроакустике. Скорость звука в воде в пять раз больше скорости звука в воздухе, соответственно в пять раз меньше запаздывание отражений относительно прямой волны. Это обстоятельство, а также большие амплитуды отражённых волн вынуждают применять фильтры с очень узкой полосой пропускания. Это приводит к недопустимым искажениям («выглаживанию») измеряемой ЧХ вследствие большой постоянной времени узкополосного фильтра. В низкочастотной области проявляется другой, присущий СВЗ недостаток — искажения ЧХ осцилляциями. Этот эффект обусловлен тем, что на низких частотах суммарные частоты оказываются в полосе пропускания фильтра.

Плохая помехозащищённость ограничивает возможность применять БПФ анализ при излучении широкополосного (шумового или квазишумового) сигнала. Накопление большого числа реализаций для повышения отношения сигнал/шум увеличивает время эксперимента, особенно на низких частотах. Многократные измерения при накоплении реализаций вынуждают применять оконную обработку, ухудшая тем самым частотное разрешение. В наибольшей степени это ухудшает результаты на низких частотах. Приемлемую точность удаётся получить на частотах выше нескольких килогерц [17].

Малая помехозащищённость характерна и для измерений с использованием короткого одиночного импульса возбуждения, что также препятствует его применению для калибровки гидроакустического приёмника. Применение повторяющихся импульсов приводит к усечению по времени ИХ и соответствующим искажениям ЧХ.

Малое соотношение сигнал/шум в области низких частот и искажения сигнала прямоугольной формы излучателем и антиалайзинговым фильтром сводят на нет все преимущества использования М-последовательностей при калибровке в гидроакустическом бассейне.

Отдельного внимания заслуживают приёмы, используемые в методе ГПО для предварительной обработки ЧХ. Достаивание ЧХ на низких частотах и корректировку ЧХ на высоких частотах можно рассматривать как умножение равномерной ЧХ на функцию с крутым нарастанием, и спадом, и плоской вершиной. Такое умножение приводит к «затягиванию» ИХ, подвергаемой оконной обработке, что увеличивает скачок при усечении ИХ.

Представляется целесообразным другое использование априорной информации о поведении ЧХ — выравнивание обрабатываемой частотной

зависимости с тем, чтобы максимально приблизить ИХ, подвергаемую оконной обработке, к δ -функции Дирака. При этом должна сохраняться возможность обратной коррекции. Такой приём аналогичен априорному и апостериорному редактированию, предложенному в [16]. Представляется, что исключение глубокого провала зависимости на низких частотах при её выравнивании будет иметь по крайней мере два преимущества. Первое — исчезает область малых значений на низких частотах, в которой паразитная осцилляция вызывает наибольшие искажения. Второе — уменьшение скачка усечённой ИХ приведёт к уменьшению амплитуды самой паразитной осцилляции. При обратной коррекции влияние осцилляции не изменится.

Обратим внимание, что недостатки упомянутых методов измерений в наибольшей степени проявляются на низких частотах. При измерении ЧХ акустической мощности в реверберационной камере ЧХ на низких частотах вынуждены заменять наклонной прямой [32]. Эта замена вызвана большими осцилляциями ЧХ, обусловленными неустранимым недостатком реверберационной камеры — малой плотностью мод собственных колебаний на низких частотах.

При решении задач по борьбе с шумовым загрязнением морской среды в гидроакустике становятся актуальными измерения окружающего шума, при выполнении которых необходимо применять чувствительность приёмника подводного звука по диффузному полю [35]. Чтобы измерить такую чувствительность, крайне затруднительно применить диффузное звуковое поле. Из бака, заполненного водой (гидроакустический бассейн), не удастся сделать ни хорошей безэховой, ни хорошей реверберационной камеры [34]. Оценка шумового загрязнения моря также предполагает измерения подводного шума, излучаемого движущимся судном. При измерениях шума движущегося источника целесообразно применять чувствительность в полосе частот, усреднённую в нормированном телесном угле.

В рассмотренном выше примере измерения частотной характеристики акустической мощности громкоговорителя получают характеристику, усреднённую в телесном угле 4π . Из такой характеристики невозможно выделить характеристику в телесном угле, меньшем 4π . В этом проявляется один из недостатков частных динамических характеристик — из одной частной характеристики невозможно получить другую частную характеристику. В то же время любую частную характеристику можно получить из полной динамической характеристики [15, 36]. Пользуясь тем, что точность измерений в свободном поле безэховой камеры превышает точность измерений в диффузном поле (которая для воздушной и подводной акустики примерно одинакова), в воздушной акустике стандартизован пересчёт характеристик по свободному полю в характеристики по диффузному полю [37].

В [36] было предложено в качестве полной динамической характеристики гидрофона использовать лабораторную модель гидроакустического приём-

ника в виде семейства квазинепрерывных частотных характеристик при различных углах падения звуковой волны. Подобную модель можно получить для гидрофона, поскольку его ЧХ может быть измерена вплоть до самых низких частот. Попытке построить лабораторную модель гидроакустического приёмника препятствует проблема измерений ЧХ до столь низких частот, ниже которых ЧХ приёмника можно заменить ЧХ гидрофона. При этом следует помнить, что факторы, определяющие направленные свойства гидрофона и гидроакустического приёмника, существенно различаются. Направленность приёмника определяется не только направленностью гидрофона, но и влиянием рассеяния звука на элементах конструкции приёмника. Следовательно, лабораторная модель приёмника должна учитывать влияние этого рассеяния.

Кроме этого, при построении лабораторной модели следует помнить, что наиболее типичной задачей, решаемой с помощью гидроакустического приёмника, являются измерения шума в 1/3-октавных полосах частот. То есть лабораторная модель должна позволять вычислять энергетические чувствительности приёмника в полосе частот 1/3-октавного фильтра как в свободном, так и в диффузном звуковых полях.

Помимо верификации при поверке такая лабораторная модель обеспечит пользователю возможность решать задачу валидации — получать метрологические характеристики приёмника, необходимые для цели измерения [38].

Низкочастотная калибровка по полю в незаглушённом бассейне

Тонально-импульсный метод

Чувствительность в свободном поле определена как отношение выходного напряжения холостого хода электроакустического преобразователя, *предназначенного для приёма звука с определённого направления и на определённой частоте*, к звуковому давлению в невозмущённом свободном поле бегущей плоской звуковой волны [39, 40]. В данном определении нас будут интересовать понятия частота и свободное поле.

Рассмотрим процедуру измерения чувствительности гидрофона по методу взаимности (абсолютный метод) с использованием в качестве излучателя обратимого преобразователя. Калибровка по методу взаимности основана на понятии передаточного импеданса пары излучатель — приёмник в свободном звуковом поле:

$$Z_{PH}(f) = \frac{U_{PH}(f)}{I_P(f)},$$

где $I_P(f)$ — ток в цепи излучателя P ; $U_{PH}(f)$ — электрическое напряжение на выходе приёмника H в свободном звуковом поле. Чтобы получить значение передаточного импеданса $Z_{PH}(f_0)$, необходимо аппаратно реализовать фор-

мулу измерений напряжения приёмника на частоте f_0 , которая представляет собой свёртку частотной зависимости $U_{PH}(f)$ и δ -функции на частоте f_0 [41]:

$$U_{PH}(f_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_{PH}(f) \delta(f - f_0) df. \quad (1)$$

То есть, чтобы получить значение напряжения на частоте, необходимо использовать сигнал, спектральное представление которого имеет вид δ -функции. На практике в качестве такого сигнала применяют гармонические сигналы различной длительности, при этом вместо формулы (1) реализуют формулу

$$U_{PH}(f_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_{PH}(f) A(f - f_0) df. \quad (2)$$

Чем больше длительность сигнала, тем «ближе» форма его спектра $A(f)$ к δ -функции. Частотную зависимость напряжения приёмника измеряют, используя гармонические сигналы с различными частотами, при этом частотное разрешение измерений и, соответственно, качество получаемой экспериментальной зависимости будут определяться длительностью гармонических сигналов (а не близостью их частот). Это происходит потому, что спектр гармонического сигнала конечной длительности имеет вид функции $\sin(x)/x$ и, в отличие от δ -функции, принимает ненулевые значения на всей частотной оси, включая область слева от нуля оси частот.

Обратим внимание на важные различия формул (1) и (2): δ -функция отлична от нуля в единственной точке f_0 на оси частот, вследствие чего её можно рассматривать как характеристику пропускания идеального узкополосного фильтра. Поскольку для инженерных приложений интерес представляют положительные частоты, это свойство δ -функции позволяет заменить нулём нижний предел интегрирования в формуле (1). Такая замена несправедлива для формулы (2). Результат измерений по формуле (1) не зависит от поведения частотной зависимости $U_{PH}(f)$ на частотах, отличных от f_0 . Результат измерений по формуле (2) включает в себя значения $U_{PH}(f)$ на всех частотах как справа, так и слева от нуля оси частот. Покажем, как эти различия проявляются при калибровке гидрофона в области близких к нулю частот.

При измерениях в гидроакустическом бассейне ограниченных размеров условия свободного поля реализуют, сокращая длительность гармонического сигнала до времени прихода первого отражения t_1 (тонально-импульсный метод). Спектр тонального импульса существенно отличается от δ -функции. На практике это отличие принято выражать шириной центрального лепестка функции $\sin(x)/x$, которая определяет разрешение измерений по частоте, равное $2/t_1$. Если в формуле (2) вместо спектра тонального импульса подставить центральный лепесток функции $\sin(x)/x$, на который приходится основная часть энергии импульса [41], то результатом свёртки будет усреднение зависимости в частотном интервале от $f_0 - 1/t_1$ до $f_0 + 1/t_1$. Поэтому при измерениях тонально-импульсным методом получают не $U_{PH}(f_0)$ в свободном

звуковом поле, а его некоторую, полученную усреднением, оценку «по свободному полю».

Рассмотрим поведение частотной зависимости $U_{PH}(f)$ в области близких к нулю частот. Излучательная способность обратимого преобразователя (чувствительность по току в режиме излучения) $S_P(f)$ связана с его чувствительностью на приём $M_P(f)$ соотношением:

$$S_P(f) = J^{-1}(f)M_P(f),$$

где $J(f) = \frac{2}{j\rho f} \exp(ikr_0)$ — параметр взаимности; k — волновое число; j —

мнимая единица; ρ — плотность воды; f — частота; r_0 — опорное расстояние, равное 1 м. Звуковое давление, создаваемое излучателем, пропорционально его чувствительности по току $S_P(f)$ и току возбуждения излучателя $I_P(f)$. При этом для звукового давления, создаваемого обратимым излучателем, получим:

$$P(f) = J^{-1}(f)I_P(f)M_P(f).$$

Напряжение на выходе приёмника с чувствительностью $M_H(f)$ связано со звуковым давлением $P(f)$, которое создаёт обратимый преобразователь в точке расположения приёмника, соотношением:

$$U_{PH}(f) = M_H(f)P(f).$$

То есть в свободном звуковом поле поведение частотной зависимости напряжения на выходе приёмника задаёт не только частотная зависимость чувствительности самого калибруемого приёмника, но и частотная зависимость звукового давления, создаваемого излучателем.

Учитывая, что на низких частотах ток в цепи излучателя пропорционален частоте [42], получим, что даже если чувствительность обратимого излучателя на приём равномерна, начиная от нуля оси частот, то создаваемое излучателем звуковое давление будет пропорционально квадрату частоты и равно нулю при $f_0 = 0$. То есть измеряемая частотная зависимость напряжения для пары излучатель — приёмник $U_{PH}(f)$ будет принципиально неравномерной (кривая 2 на рис. 9). Прямоугольниками на рис. 9 показаны частотные интервалы усреднения от $f_0 - 1/t_1$ до $f_0 + 1/t_1$ и положения центрального лепестка спектра тонального импульса при измерениях тонально-импульсным методом для случаев, когда частота f_0 близка к нулю оси частот и удалена от него.

Результат усреднения по формуле (2) практически не скажется на точности измерения $U_{PH}(f_0)$, если зависимость $U_{PH}(f)$ в частотном интервале усреднения слабо зависит от частоты. Такое поведение характерно для частотных зависимостей, измеряемых при калибровке гидрофона по свободному полю на средних и высоких частотах. На частотах, удалённых от нуля оси частот, результат свёртки частотной зависимости напряжения приёмника и спектра тонального импульса близок к значению частотной зависимости напряжения на частоте заполнения тонального импульса. При выполне-

нии низкочастотных калибровок на ключевых сличениях ССАUV/W-K1 минимальная глубина погружения пары излучатель — приёмник составляла 2,5 м. Условия свободного поля обеспечивали временной селекцией тонального импульса. Частотное разрешение измерений, оценённое по ширине центрального лепестка спектра тонального импульса, составляло 600 Гц. При этом на частотах от 1 кГц и выше погрешность, обусловленная частотным разрешением измерений (установлением амплитуды сигнала), была оценена от 0,6 до 3% [43]. При калибровке гидрофона по свободному полю на частотах выше нескольких килогерц оказывается достаточным частотное разрешение 1000 Гц и более. Это подтверждают эксперименты с калибровками гидрофонов в водных резервуарах, многократно различающихся по размерам [44].

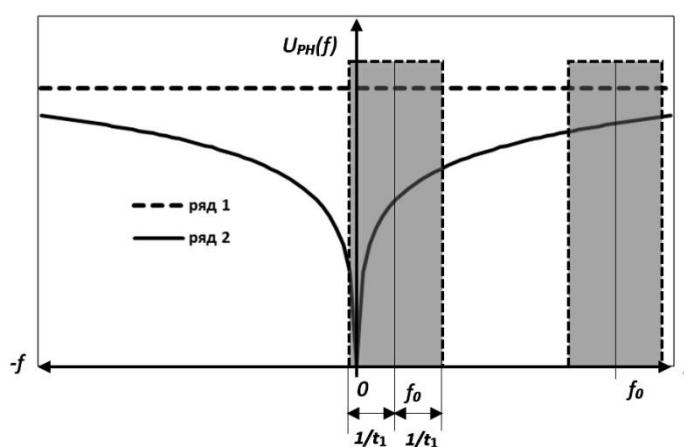


Рис. 9.

Картина кардинально меняется при калибровке гидрофона в области, примыкающей к нулю оси частот. Для казуальной системы, к которой относится пара излучатель — приёмник в звуковом поле, реакция не может опережать воздействие. Импульсная характеристика такой системы существует только на положительной части временной оси. В соответствии со свойствами Фурье преобразования, частотная характеристика казуальной системы существует на всей оси частот, причём модуль частотной характеристики симметричен относительно оси, проходящей через нуль, как это изображено на рис. 9. Узкий и глубокий провал частотной характеристики можно трактовать как антирезонанс системы с очень высокой добротностью на нулевой частоте. Одно из свойств резонансных систем состоит в том, что чем ближе частота возбуждения к резонансу, тем значительнее проявляется переходной процесс. На практике это проявляется в том, что сигнал на выходе приёмника не успевает установиться до окончания тонального импульса.

Таким образом, конечное разрешение по частоте ограничивает нижнюю частоту калибровки гидрофона тонально-импульсным методом.

Рассмотрим гипотетический случай, когда частотная зависимость напряжения пары излучатель — приёмник равномерна, начиная от нуля оси частот (показана пунктирной прямой 1 на рис. 9). Такая частотная зависимость присуща безынерционной системе, в которой переходной процесс отсутствует. В этой ситуации измерение напряжения приёмника с использованием тонального импульса длительностью t_1 дало бы правильный результат для любой частоты f_0 , сколь угодно близкой к нулю оси частот. Несмотря на конечное разрешение измерений по частоте, получаемая оценка по свободному полю будет совпадать со значением $U_{PH}(f_0)$ в свободном звуковом поле. К сожалению, на практике подобная ситуация невозможна. Наличие антирезонанса не зависит ни от свойств излучателя, ни от свойств приёмника и обусловлено отсутствием излучения звуковых волн на нулевой частоте. Вследствие свёртки существенно неравномерной частотной зависимости $U_{PH}(f)$ результат измерений напряжения $U_{PH}(f_0)$ тонально импульсным методом на частотах меньших $2/t_1$ будет искажён тем значительнее, чем больше прямоугольник на рис. 9 перекрывает область антирезонанса. Попытки «выровнять» измеряемую частотную зависимость на низких частотах, например предыскажением спектра тонального импульса или применением корректирующих электрических цепей [45, 46], приводят к уменьшению искажений сигнала переходным процессом, но не позволяют преодолеть ограничение на нижнюю частоту f_H калибровки тонально-импульсным методом $f_H \geq 1/t_1$. Частоту 1 кГц воспринимают как нижнюю частоту калибровки гидрофона по свободному полю в бассейне. На самом деле частота 1 кГц — это нижняя частота метода временной селекции тонального импульса, который применяют для калибровки по свободному полю, но никак не нижняя частота калибровки гидрофона по свободному полю [45].

Анализируя формулу (2), мы стремились показать, что измерению напряжения приёмника на частоте тонального импульса препятствует форма самой определяемой в эксперименте частотной зависимости, в том числе на частотах, удалённых от частоты измерений. Выражаясь «вульгарно», форма самой измеряемой частотной зависимости влияет на принимаемый сигнал, искажая его переходным процессом. Чтобы исключить это влияние — переходной процесс в коротком принимаемом сигнале — можно построить математическую модель, описывающую переходной процесс в системе излучатель — приёмник, и экстраполировать сигнал в установившееся состояние (например, методом Прони) [47–49]. Трудности, связанные с такой экстраполяцией, обусловлены тем, что учитывающая влияние переходных процессов модель сигнала является нелинейной, требуется нелинейный алгоритм подгонки, для которого необходимы хорошие начальные оценки параметров модели. Но такая модель строится в том числе на результатах измерения ЧХ.

Если бы удалось измерить ЧХ, то задача калибровки на этом была бы решена. Подобный подход применим только для типовой частотной зависимости, то есть когда для одного объекта в идеальных условиях точно измеряют частотную зависимость, а затем построенную на основании этих измерений модель применяют для аналогичных объектов. Примером могут служить контрольные измерения характеристик громкоговорителей и телефонов при их серийном производстве.

Чтобы, работая с сигналом, ослабить искажения переходным процессом, увеличивают продолжительность сигнала, захватывая несколько первых отражений [50]. Используя результаты измерений во всём частотном диапазоне калибровки, строят модель, учитывающую переходные процессы и влияние отражений. Использование более продолжительных сигналов улучшает частотное разрешение измерений и позволяет «прописать» частотную характеристику ближе к антирезонансу, вплоть до частот, на которых до прихода первого отражения удаётся наблюдать лишь часть периода сигнала. Описанный способ малопригоден для практического применения: «расширенная» модель включает неприемлемо большое число параметров, подлежащих определению при решении обратной задачи (366 параметров в [50]). Обработка экспериментальных данных включает отбраковку противоречащих модели результатов применения метода МНК. На качество экстраполяции сигнала влияет плохая обусловленность многопараметрической модели. При этом плохое отношение сигнал/шум на низких частотах усугубляет проблему устойчивости результата. Из критичных факторов авторы [50] отмечают влияние температуры и точности определения времени прихода отражений. Последнее обстоятельство не позволяет применить метод в бассейне, облицованном звукопоглощающими клиньями.

В качестве итога проведённого анализа можно сделать следующий вывод. Чтобы детально «прописать» ЧХ в области низкочастотного антирезонанса, требуется высокое частотное разрешение измерений, что обуславливает необходимость использования продолжительного сигнала. Однако в этом случае принимаемый сигнал будет искажён отражениями звуковых волн в бассейне. То есть решить с приемлемым качеством проблему низкочастотной калибровки, оставаясь в рамках модели «сигнал», не удаётся.

Проблему низкочастотной калибровки можно решить, если от сигнала перейти к свойствам физической системы, например к её комплексной ЧХ. При использовании ЧХ пропадает необходимость построения сложных математических моделей переходного процесса либо реверберационного звукового поля в бассейне.

Техника СКВУ

Метод скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) отличается от тонально-импульсного метода тем, что измерения частотной зави-

симости напряжения приёмника выполняют в реверберационном звуковом поле бассейна (в присутствии отражённых звуковых волн). При этом принципиальных ограничений на продолжительность измерений и, соответственно, разрешение измерений по частоте не возникает. Чтобы получить зависимость по свободному полю (подавить искажения, обусловленные отражениями звука в бассейне), разрешение по частоте у измеренной зависимости искусственно ухудшают, внося в результат усреднение в частотных интервалах, подобранных специальным образом (обрабатывают скользящим взвешенным усреднением) [15]:

$$\dot{U}_{PH}(f, \Delta f_{\text{вы}}) = \frac{1}{\prod_{i=1}^n 1/\tau_i} \int_{f-\Delta f_{\text{вы}}/2}^{f+\Delta f_{\text{вы}}/2} \dot{U}_{PH}(f-f') W_{\text{вы}}(f') df', \quad (3)$$

где $\dot{U}_{PH}(f, \Delta f_{\text{вы}})$ — частотная зависимость выходного напряжения приёмника по свободному полю; n — количество отражений, подлежащих подавлению; τ_i — запаздывание i -й отражённой волны в точке приёма; $\Delta f_{\text{вы}}$ — частотный интервал взвешенного усреднения; $W_{\text{вы}}(f)$ — взвешивающая функция, полученная свёрткой n единичных прямоугольных окон шириной τ_i .

Существенными для решаемой задачи преимуществами метода СКВУ являются минимальное, в сравнении с применяемыми в метрологической практике методами, искажение усреднением по частоте и возможность обрабатывать компактный фрагмент частотной зависимости, измеряемой в рабочем диапазоне излучателя [15].

Поскольку обрабатывают не сигнал, а частотную зависимость, метод даёт возможность применять к ней разнообразные способы частотной коррекции, основанные на использовании априорной и апостериорной информации [16, 51, 52]. Подчеркнём важную для дальнейших рассуждений особенность: обработке СКВУ подвергают частотную зависимость, измеренную с очень высоким разрешением по частоте, которое на практике определяется не временем прихода первого отражения (тонально-импульсный метод), а например, продолжительностью излучения и скоростью перестройки частоты ЛЧМ сигнала. Полученная частотная зависимость искажена отражениями, но благодаря высокому разрешению по частоте содержит детальную информацию о поведении $J^{-1}(f)$ и $I_P(f)$, в том числе на самых низких частотах в области антирезонанса.

Отражения звука в бассейне не являются препятствием для электрических измерений, поэтому частотную зависимость тока излучателя можно получить до самых низких частот. Зависимость параметра взаимности от частоты известна. Это позволяет исключить в экспериментальной частотной зависимости изменения, обусловленные методом калибровки (параметр взаимности $J(f)$) и способом измерения тока излучателя $I_P(f)$, применённым в эталонной установке, то есть частотные зависимости, которые не обусловлены свойствами калибруемого гидрофона.

Такие коррекции позволяют максимально «выравнивать» подвергаемую обработке усреднением частотную зависимость и приблизить её к рассмотренной выше гипотетической ситуации с безынерционной системой. Это многократно ослабляет искажения результата измерений, обусловленные конечным разрешением по частоте. При использовании метода СКВУ ничто не препятствует применению коррекций в области, прилегающей к нулю оси частот.

Возможность использовать метод СКВУ для калибровки гидрофона в бассейне на частотах существенно меньших 1 кГц была подтверждена как рутинными калибровками, так и международными сличениями, включая ключевые сличения МКМВ. Для проверки возможности калибровки гидрофона на частотах, примыкающих к нулю оси частот, был поставлен следующий эксперимент.

В качестве излучателя применяли обратимый гидрофон ИТС1001 с активным элементом диаметром 100 мм. В качестве приёмников использовали гидрофоны: рабочий эталон 1-го разряда ГИЗ4 и гидрофон В&К8104. Гидрофоны ГИЗ4 и В&К8104 были предварительно откалиброваны по давлению на частотах от 1 до 1000 Гц в акустической камере малого объёма ГЭТ 55-2017. После чего была выполнена калибровка гидрофона В&К8104 по свободному полю в гидроакустическом бассейне ГЭТ 55-2017, минимальный размер которого (глубина) составляет 6 м.

При калибровке в бассейне применяли метод сличения с опорным гидрофоном. Метод взаимности требует измерений передаточных импедансов трёх пар излучатель — приёмник. В отличие от метода взаимности при калибровке методом сличения достаточно измерять выходные напряжения опорного и калибруемого гидрофонов и контролировать неизменность тока излучателя. В эксперименте использовали модифицированный метод сличения, при котором чувствительность определяли не по отношению напряжений, а по отношению передаточных импедансов опорного и калибруемого гидрофонов. В качестве опорного гидрофона использовали рабочий эталон ГИЗ4. Используя один и тот же электрический тракт, регистрировали ток в цепи излучателя и выходные напряжения для двух пар излучатель — приёмник: излучатель — опорный гидрофон и излучатель — калибруемый гидрофон. Оцифрованные сигналограммы тока и напряжения записывали в память ПЭВМ.

В качестве сигналов использовали квадратурно дополненную пару (косинусный и синусный) ЛЧМ-сигналов $i_{\cos}(t)$ и $i_{\sin}(t)$, мгновенную частоту которых непрерывно изменяли от 2000 Гц до нуля и далее до 2000 Гц, сохраняя непрерывность фазы сигнала при переходе частоты через нуль. Излучения ЛЧМ-сигнала повторяли через паузу, превосходящую время реверберации в бассейне. Для повышения отношения сигнал/шум использовали синхронное накопление принятых сигналов.

Применение сигнала такого вида имеет ряд преимуществ. Частотную зависимость, полученную при изменении частоты от нуля до 2000 Гц, обычно относят к области положительных частот комплексной частотной характеристики. Для излучаемого сигнала зависимость, полученную при изменении частоты от 2000 Гц до нуля, можно отнести к области отрицательных частот, понимая в описываемом эксперименте под частотой не количество колебаний в секунду, а производную по времени фазы сигнала. Второе преимущество заключается в том, что сохранение непрерывности фазы сигнала при переходе частоты через нуль позволяет корректно учесть искажения, обусловленные реверберацией звука в бассейне. Ещё одно преимущество, важное при проведении исследований, заключается в возможности выявлять влияние эффектов, обусловленных нестационарностью ЛЧМ-сигнала [17, 53]. При изменении знака приращения фазы излучаемого сигнала эти эффекты проявляются в изменении искажений измеряемой зависимости остаточными переходными процессами в системе излучатель — приёмник, а также изменении картины реверберационных искажений вследствие запаздывания в точке приёма эхосигналов относительно прямого сигнала излучателя.

На рисунке 10 изображены сигналограммы тока в цепи излучателя и напряжения на выходе гидрофона пары излучатель — гидрофон, очищенные от шумовой помехи синхронным накоплением.

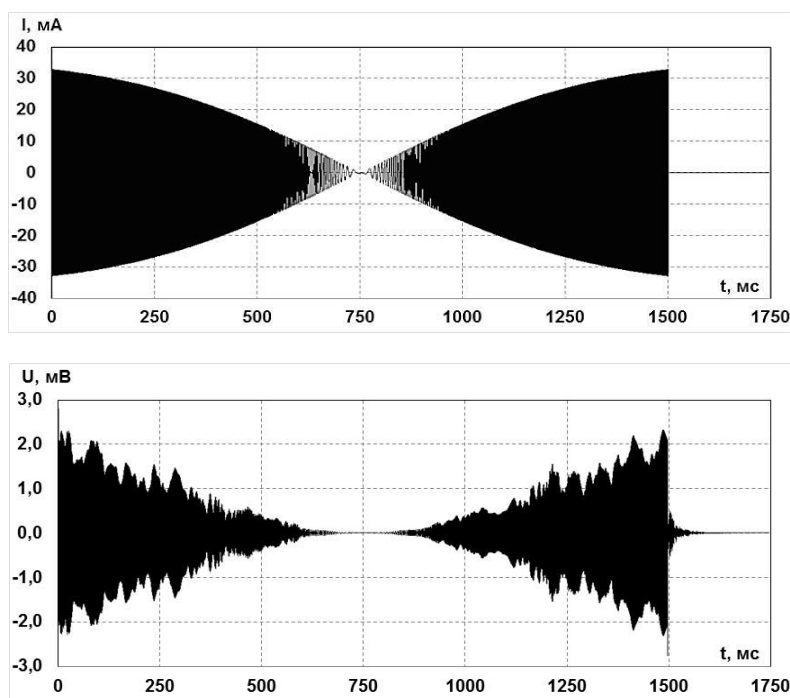


Рис. 10. Сигналограммы тока в цепи излучателя и напряжения

Обратим внимание на то, что в отличие от сигналограммы тока, симметричной относительно момента перехода через нулевую частоту, симметричность сигналограммы напряжения нарушена реверберационными искажениями.

Из зарегистрированных в памяти ПЭВМ косинусной и синусной (т.е. квадратурно дополненных) сигналограмм образовывали квадратурную и синфазную составляющие комплексных сигналограмм тока $i(t) = i_{\cos}(t) + j i_{\sin}(t)$ и (с учётом временной задержки τ_d на распространение прямого сигнала излучателя) напряжения $u(t) = u_{\cos}(t - \tau_d) + j u_{\sin}(t - \tau_d)$. Чтобы из полученных комплексных сигналов перейти к частотным зависимостям, выполняли операцию детектирования $Z(t) = u(t) / i(t)$, получая тем самым огибающую сигнала [16]. При этом применяли меры, позволяющие избежать больших искажений, обусловленных остаточной помехой при малом полезном сигнале в окрестности антирезонанса. Затем, исходя из параметров ЛЧМ-сигнала, в огибающей $Z(t)$ переменную t (время) заменяли переменной f (частота):

$$Z_{PH}(f) = Z(t) \Big|_{t \rightarrow f}.$$

Полученную комплексную частотную зависимость электрического передаточного импеданса пары излучатель — приёмник в реверберационном поле $Z_{PH}(f)$ умножали на $1/(jf)$ (корректировали на частотную зависимость параметра взаимности, также применяя меры, чтобы исключить деления на нуль) и обрабатывали по методу СКВУ.

Синфазная и квадратурная составляющие скорректированной комплексной частотной зависимости передаточного импеданса изображены на рис. 11 для симметричного относительно нуля частот интервала от -2000 до 2000 Гц.

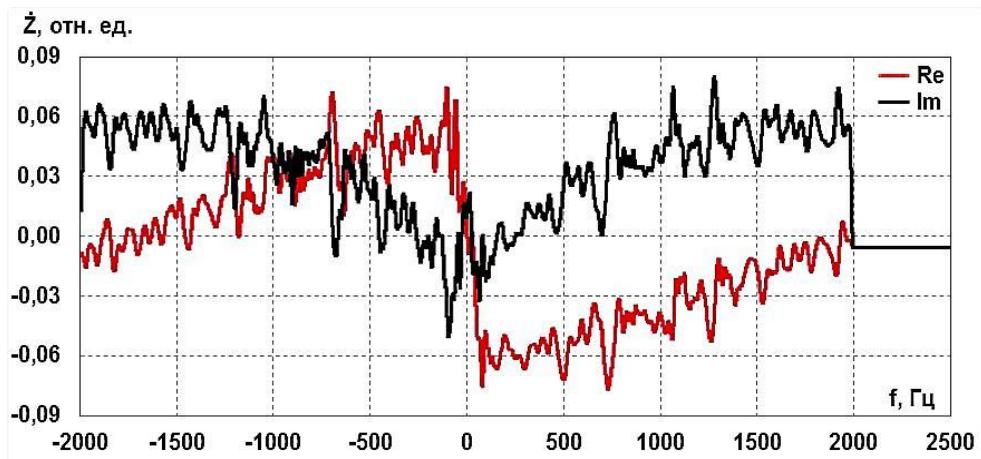


Рис. 11. Синфазная и квадратурная составляющие скорректированной комплексной частотной зависимости

Представляется целесообразным следующее замечание. Следствием постулата о казуальности (причинности) физически реализуемой системы (реакция такой системы на воздействие не может опережать воздействие во времени) является чётная сопряжённость комплексной ЧХ системы. Применительно к комплексной ЧХ передаточного импеданса пары излучатель — приёмник — чётная сопряжённость

$$Z_{PH}(f) = Z_{PH}^*(-f),$$

где Z_{PH}^* — комплексное сопряжение к Z_{PH} , означает, что каждой частотной компоненте $Z_{PH}(f_i)$ в области положительных частот соответствует компонента в области отрицательных частот $Z_{PH}(-f_i)$ с той же амплитудой и противоположной фазой или, что эквивалентно, равной действительной частью и противоположной по знаку мнимой частью (синфазная и квадратурная составляющие на рис. 11). Учёт свойства чётной сопряжённости позволяет упростить эксперимент по определению частотной зависимости передаточного импеданса, ограничив измерения только положительными либо только отрицательными частотами с тем, чтобы, воспользовавшись, например, операциями комплексного сопряжения или преобразования Гильберта [41], получать комплексную частотную зависимость для отрицательных частот по частотной зависимости для положительных частот и наоборот. Применяя этот приём, следует помнить о переходных процессах, возникающих в системе излучатель — приёмник в моменты начала и завершения излучения. При изменении частоты ЛЧМ-сигнала только в положительной либо отрицательной области начало либо завершение излучения неизбежно попадает в область примыкающих к нулю частот, в которой даже самый незначительный переходной процесс, накладываясь на шумовую помеху, делает результат измерений непригодным для дальнейшей обработки. При изменении частоты по предложенной выше схеме переходные процессы оказываются за пределами представляющего интерес частотного диапазона.

Несмотря на принимаемые меры, синфазная и квадратурная составляющие искажены помехой вблизи нуля оси частот, где полезный сигнал практически отсутствует. На рисунке 11 искажения помехой малозаметны на фоне реверберационных искажений. Чтобы показать искажения помехой, обратимся к рис. 12, на котором изображены амплитудно- и фазочастотная зависимости передаточного импеданса.

Особо заметны искажения помехой на фазочастотной зависимости (см. рис. 12б). Эксперименты показали, что искажения помехой сосредоточены в сравнительно узком интервале, симметричном относительно нуля частот. На ширину этого интервала влияют расстояние между излучателем и приёмником, чувствительности излучателей и приёмников, качество экранировки преобразователей, количество синхронных накоплений, помеховая

обстановка во время эксперимента и т.п. В описываемых экспериментах ширина интервала составляла 70–140 Гц.

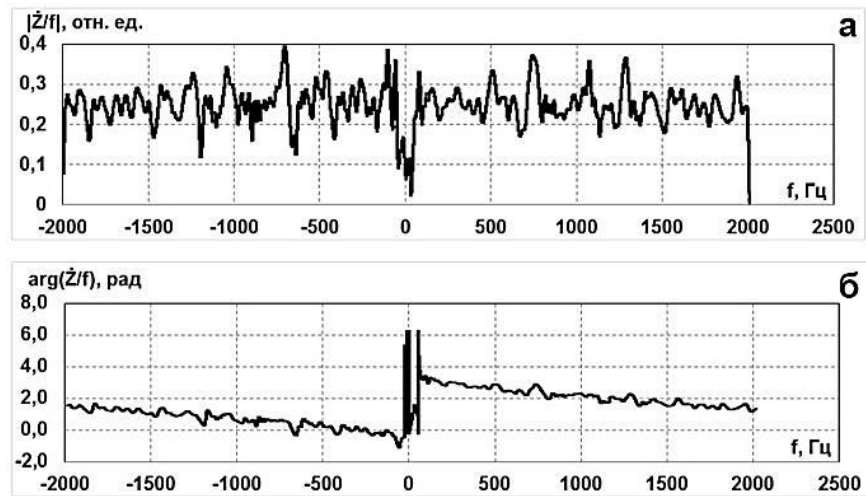


Рис. 12. Амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б) зависимости передаточного импеданса пары излучатель — приёмник в реверберационном звуковом поле бассейна

Для подавления реверберационных искажений к синфазной и квадратурной составляющим передаточного импеданса применяли обработку по методу СКВУ. Принцип обработки по методу СКВУ основан на рассмотрении реверберационных искажений как суммы вкладов отражений, приходящих в точку приёма последовательно во времени. Отражение, задержанное относительно прямого сигнала излучателя на время t_i , накладывает на измеренную частотную зависимость осцилляционное искажение, повторяющееся с периодом $1/t_i$. Обратим внимание, что речь идёт о частотных зависимостях, поэтому период осцилляционных искажений имеет размерность частоты. Подавление реверберационных искажений выполняется последовательным подавлением искажений, вызванных отдельными отражениями, и для отражения, задержанного на время t_i , достигается скользящим равновзвешенным усреднением в частотном интервале шириной $1/t_i$. Скользящее усреднение применяют отдельно к синфазной и квадратурной составляющим комплексной частотной зависимости. Установлено, что для практически полного подавления реверберационных искажений достаточно подавить усреднением три первых значимых отражения [15–17]. Результат применения нескольких равновзвешенных усреднений эквивалентен одному взвешенному усреднению. Эффективная ширина частотного интервала такого усреднения незначительно превосходит $1/t_1$ [15]. Очевидно, что результатом усреднения будет ухудшение разрешения по частоте получаемой частотной зависимости до $1/t_1$, что является неизбежной платой за «подавление» отражений. Отметим,

что после явно выполняемого при обработке по методу СКВУ усреднения в частотном интервале с эффективной шириной $1/t_1$ разрешение по частоте оказывается вдвое лучшим, чем частотное разрешение в результате неявного усреднения частотной зависимости, измеренной тонально-импульсным методом.

В эксперименте задержка первого отражения составляла около 4 мс, при этом эффективная ширина частотного интервала усреднения составляла примерно 250 Гц. На рисунке 13 представлены амплитудно- и фазочастотная зависимости передаточного импеданса, очищенные от реверберационных искажений по методу СКВУ. На графике амплитудной зависимости виден глубокий провал в окрестности нуля частот.

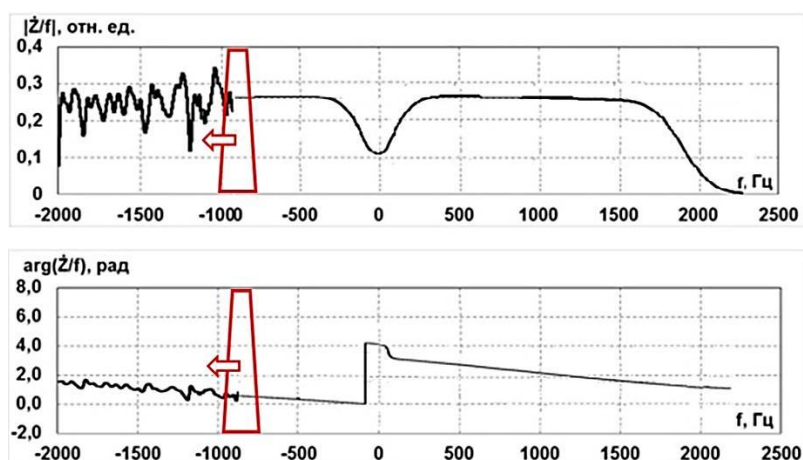


Рис. 13. Подавление интерференционных осцилляций скользящим комплексным взвешенным усреднением

Фазочастотная зависимость тоже искажена. Возникновение этих искажений можно объяснить, обратившись к рис. 12, на котором виден провал амплитудной зависимости и резкие искажения фазочастотной зависимости. Ширина интервала, искажённого помехой, соизмерима с эффективной шириной частотного интервала усреднения, что и объясняет провал амплитудной зависимости на рис. 13 на 45% и нарушение получаемой частотной зависимости за пределами интервала, искажённого помехой. Эти нарушения являются побочным эффектом скользящего усреднения, который преобразует короткий пик либо провал в фигуру с фронтами, растянутыми на ширину эффективного интервала усреднения СКВУ.

Влияние помехи на результат СКВУ удаётся уменьшить применением достаточно простых приёмов. Первый заключается в «спрямлении» измеренной частотной зависимости в частотном интервале, искажённом помехой. Результат такого «спрямления» показан на рис. 14.

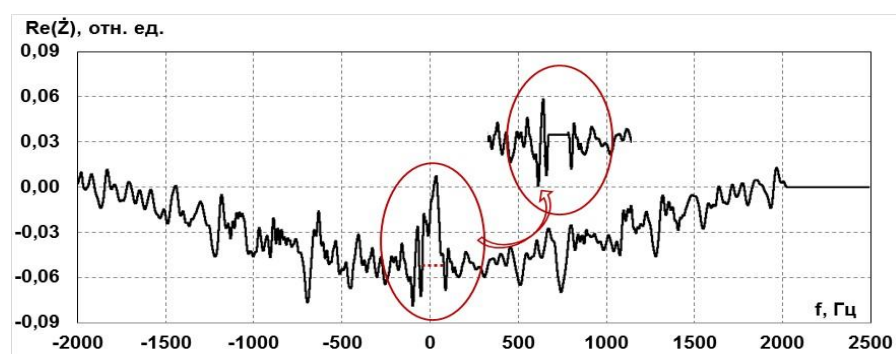


Рис. 14. Результат «спрямления» измеренной частотной зависимости

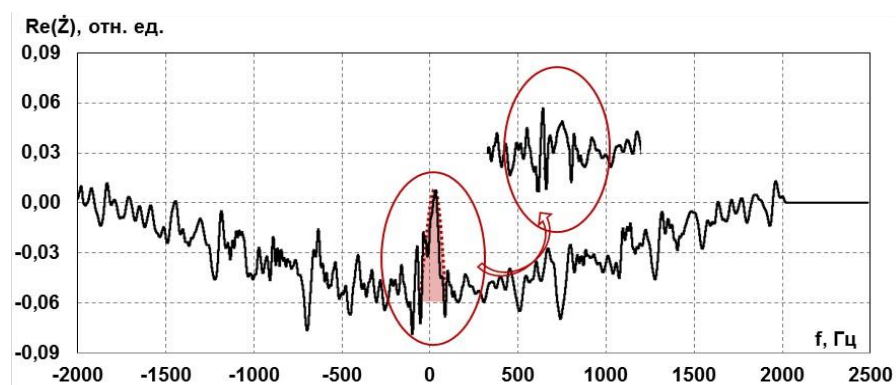


Рис. 15.

В случаях, когда искажения имеют вид узких и резких выбросов и провалов, можно использовать нелинейную обработку, названную в [54] «методом парикмахера», который заключается в «простригании» выбросов и провалов, выходящих за норму, устанавливаемую исходя из выбранного критерия.

Когда искажения помехой имеют вид пьедестала с незначительными осцилляциями, можно аппроксимировать пьедестал гладкой кривой и вычесть её перед обработкой по методу СКВУ, как это продемонстрировано на рис. 15.

Описанные приёмы дают примерно равнозначные результаты. Полностью устранить влияние помехи не удаётся. При этом в получаемой после применения СКВУ частотной зависимости на месте провала может образоваться горб. Однако влияние искажённого помехой интервала удаётся уменьшить в 7–10 раз, что можно оценить по зависимостям на рис. 16.

В описываемых экспериментах остаточные искажения получаемых по методу СКВУ амплитудно-частотных зависимостей на частотах, не превосходящих по абсолютной величине ширину эффективного интервала усреднения СКВУ, были уменьшены до величин, не превосходящих 3–5%.

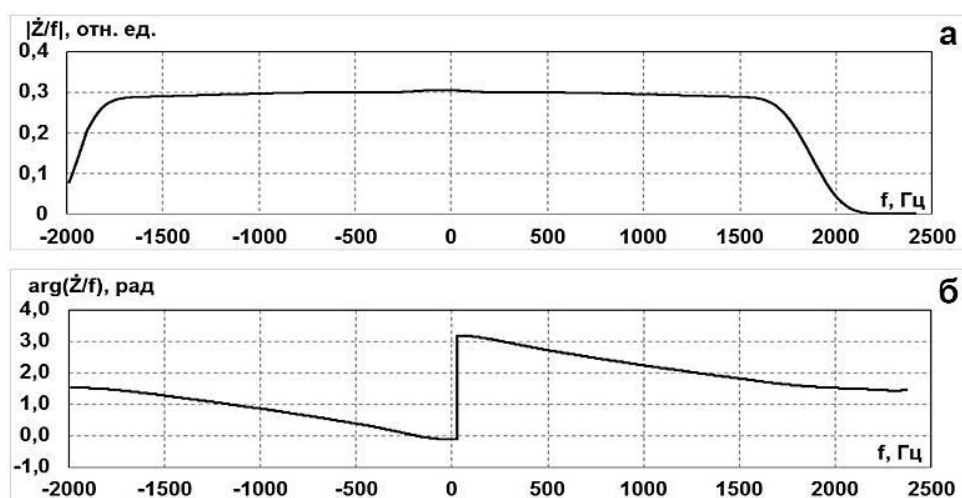


Рис. 16. Уменьшение влияния искажённого помехой интервала

Использование амплитудно-частотных и фазочастотных зависимостей передаточных импедансов справа от нуля оси частот позволяет рассчитать зависимость от частоты комплексной чувствительности приёмника. Частотная зависимость модуля комплексной чувствительности представляет собой обычную частотную зависимость чувствительности, используемую при измерениях уровней звукового давления. В рамках настоящей статьи рассматриваются задачи калибровки применительно к измерениям уровней звукового давления. Калибровка измерителей пиковых значений подводного звука, несомненно, потребует иного использования фазочастотной характеристики. Однако в настоящее время устоявшееся мнение о том, каким образом выполнять измерения пиковых значений, отсутствует. Соответственно отсутствуют проверенные практикой способы нормирования и использования фазочастотных характеристик для этих целей.

В воздушной акустике удалось стандартизовать измерение пиковых значений, опираясь на строго нормированный способ реализации и форму комплексной ЧХ фильтра «С» шумомера. Стандарт ИСО установил нижнюю границу 20 Гц диапазона частот при измерениях шума, излучаемого в воду морским копром [55]. В то же время в стандарте не указаны ни способы измерений либо реализации ЧХ гидроакустического приёмника, ни допуски на форму его комплексной ЧХ чувствительности.

В дальнейшем изложении фазочастотным характеристикам не будет уделяться отдельного внимания, однако предложенный метод позволяет измерять фазочастотные характеристики приёмника на частотах вплоть до предельно низких, на которых характеристики приёмника по полю можно заменить характеристиками гидрофона по давлению.

Эксперименты по подтверждению корректности метода

Низкочастотная калибровка гидрофона

Чтобы проверить близость результатов калибровки гидрофона в бассейне по свободному полю и по давлению в акустической камере малого объема описанным выше способом, в частотном диапазоне до 1700 Гц получили зависимости передаточных импедансов по свободному полю для пары излучатель — опорный гидрофон $Z_{и-о}(f)$ и пары излучатель — калибруемый гидрофон $Z_{и-г}(f)$. На рисунке 17 указанные зависимости приведены нормированными на частоту.

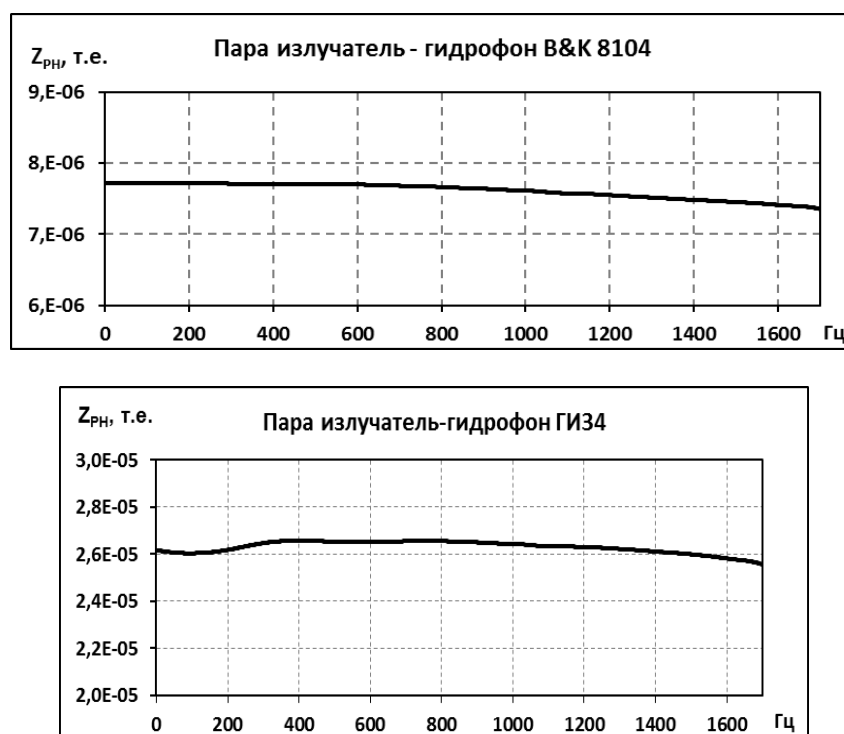


Рис. 17. Зависимость передаточных импедансов по свободному полю

Чувствительность по свободному полю рассчитывали по формуле:

$$M_H(f) = M_o(f) \frac{z_{и-г}(f)r_{и-г}}{z_{и-о}(f)r_{и-о}}, \quad (4)$$

где $M_o(f)$ — чувствительность опорного гидрофона; $r_{и-г}$ — расстояние между излучателем и калибруемым гидрофоном; $r_{и-о}$ — расстояние между излучателем и опорным гидрофоном. На рисунке 18 рядами 1 и 2 приведены частотные зависимости чувствительности калибруемого гидрофона, полученные в акустической камере и в бассейне.

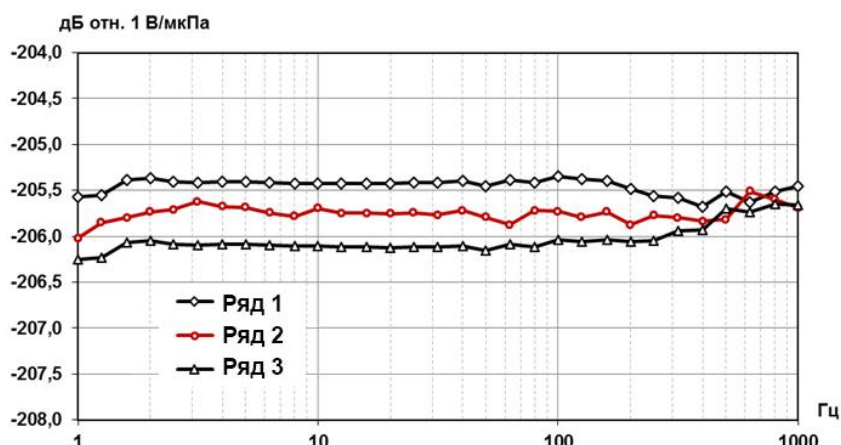


Рис. 18. Частотные зависимости чувствительности гидрофона, полученные в акустической камере (ряд 2) и в бассейне на глубинах 3 м (ряд 1) и 1,5 м (ряд 3)

При рассмотрении результатов калибровки в бассейне, которые на рис. 18 представлены на частотах вплоть до 1 Гц, следует понимать, что значения на частотах меньших 70 Гц получены в результате описанной выше интерполяции частотных зависимостей передаточных импедансов на частотном интервале, искажённом помехой. Тем не менее расхождения результатов калибровки по свободному полю и по давлению не превосходят 0,3 дБ, что при погрешностях выполненного эксперимента можно считать хорошим совпадением.

Чтобы оценить влияние частотного разрешения измерений на результаты калибровки с использованием метода СКВУ, калибровка в бассейне была повторена на глубине 1,5 м. При этом ширина эффективного частотного интервала усреднения увеличивается примерно вдвое, что влечёт за собой пропорциональное ухудшение частотного разрешения измерений. Результаты калибровки представлены на рис. 18 рядом 3.

Ухудшение частотного разрешения измерений вдвое слабо повлияло на близость результатов калибровки по полю и по давлению. Различия результатов калибровки по полю, полученных при значительно различающихся значениях разрешения по частоте, не превысили 0,6 дБ, что существенно меньше погрешности рабочих эталонов для калибровки измерительных гидрофонов 1–1,5 дБ. Полученные результаты можно интерпретировать как подтверждение возможности выполнять калибровку по свободному полю гидрофона, ЧХ чувствительности которого не имеет осцилляционных изменений в частотном интервале усреднения СКВУ, в малом бассейне глубиной 3 м на «сверхнизких» частотах.

Для метода СКВУ результат усреднения не скажется на точности измерения $Z_{PH}(f_0)$, если зависимость $Z_{PH}(f)$ в частотном интервале усреднения слабо

зависит от частоты. Частотная зависимость, полученная в результате обработки по методу СКВУ, искажена остаточными осцилляциями с амплитудой $\frac{a}{2\pi t} \frac{\partial Z}{\partial f}$, пропорциональной наклону полученной зависимости $\frac{\partial Z}{\partial f}$ отношению амплитуд a первой отражённой и прямой волн. Для первого группового отражения (водная поверхность, стены и дно бассейна) соотношение амплитуд прямой и суперпозиции отражённых волн не превышает 50%. При таком соотношении амплитуда остаточной осцилляции, которая определяет погрешность метода СКВУ, не превышает 0,1 дБ, если изменения передаточного импеданса в диапазоне 1000 Гц не превышают 50%. Поскольку перед применением СКВУ выполняют коррекции на частотную зависимость тока и параметра взаимности, наклон частотной зависимости, получаемой в результате обработки по методу СКВУ, будут определять неравномерность частотной зависимости чувствительности гидрофона и погрешности результатов измерений, использованных для выполнения коррекции. Типичные изменения, вызываемые этими факторами, значительно меньше 50%.

На рассмотренный выше метод низкочастотной калибровки гидрофона в лабораторном бассейне получен патент РФ на изобретение № 2655049 «Способ калибровки гидрофона по полю на низких частотах» с приоритетом от 26.07.2017 г., публикация [56] с описанием разработанного метода включена в библиографию стандарта МЭК на калибровку гидрофона IEC 60565-1 FDIS.

Ключевые сличения МКМВ

ССАUV.W-K1 — первые ключевые сличения результатов калибровок гидрофонов Консультативного комитета по акустике, ультразвуку и вибрации (ССАUV) МКМВ были проведены в период с 2000 по 2004 г. В этих сличениях участвовал Государственный специальный эталон единицы звукового давления в водной среде ГЭТ 55-91. Основной целью сличений было подтверждение эквивалентности национальных эталонов участников сличений для обоснования калибровочных и измерительных возможностей и составления СМС-данных в базе KCDB CIPM в диапазоне частот от 1 до 500 кГц.

Поскольку ССАUV.W-K1 были первыми ключевыми сличениями в области гидроакустических измерений, помимо основной задачи участникам сличений предстояло решить ряд задач, связанных с сопоставимостью результатов калибровок опорных гидрофонов по полю. Все участники ключевых сличений использовали метод взаимности в свободном поле сферической волны с тремя преобразователями и (за исключением ВНИИФТРИ) применяли стандартную процедуру калибровки в соответствии с публикацией МЭК 565 и национальными стандартами [57–59]. Условия свободного поля обеспечивали тонально импульсным режимом излучения и приёма. Во ВНИИФТРИ была применена модифицированная процедура метода взаим-

ности [15], использующая акустическую голографию для локализации и оценки параметров источников рассеяния звуковой волны. Это позволило российской стороне при обсуждении факторов, влияющих на сопоставимость результатов, обратить внимание участников на необходимость при калибровках на ключевых сличениях уточнить понятие «гидрофон» с учётом влияния рассеяния звука на корпусе и креплениях гидрофона. По результатам обсуждения было принято решение использовать на следующих ключевых сличениях стандартизованное крепление гидрофона. Среди исходных данных, представленных российской стороной и использованных при обсуждении этой проблемы, были результаты калибровки опорного гидрофона от 500 Гц и выше. Однако данные на частотах ниже 1 кГц не вошли в официальный отчёт по сличениям, поскольку кроме РФ ни один из участников не смог выполнить калибровку по свободному полю на частоте ниже 1 кГц, и лишь четыре участника получили результаты на частоте 1 кГц.

На последовавших за ключевыми сличениями двусторонних российско-китайских пилотных сличениях КООМЕТ 473/RU/09 китайской стороной были представлены данные низкочастотных калибровок по полю от 1 кГц, ВНИИФТРИ выполнил такие калибровки на частотах от 250 Гц. Значительно продлить диапазон калибровки по полю в сторону низких частот позволило применение (для апробации на этих пилотных сличениях) разработанной во ВНИИФТРИ техники СКВУ. Корректно выполнить сличения результатов калибровок по полю на частотах от 250 Гц удалось на российско-китайских дополнительных сличениях КООМЕТ 531/RU/11, на которых технику СКВУ использовали оба участника.

Одной из основных задач вторых ключевых сличений ССАUV.W-K2, начавшихся в 2015 г. и продолжающихся по настоящее время, стала калибровка опорного гидрофона по свободному полю на предельно низких частотах. Для обеспечения сопоставимости условий измерительного эксперимента все участники используют стандартизованный в МЭК 60565 тонально-импульсный метод измерений. Два участника сличений дополнительно применяют технику СКВУ: НААРИ (Китай) при выполнении калибровок на низких частотах с использованием ЛЧМ-сигнала, ВНИИФТРИ — с использованием ЛЧМ-сигнала на низких частотах и при излучении шумового сигнала (по рекомендациям Технического комитета «Акустика. Ультразвук. Вибрация» ЕВРАМЕТ для проверки сопоставимости результатов калибровок на шумовом и тонально-импульсном сигналах) на средних частотах.

Перечисленное не исчерпывает задач, которые поставил перед собой ВНИИФТРИ, участвуя в ключевых сличениях. В качестве целевой предельно низкой частоты Техническим протоколом сличений ССАUV.W-K2 установлена частота 250 Гц, которой удалось достичь лишь трём лабораториям из семи, участвующих в сличениях. Для калибровок на самых низких частотах ВНИИФТРИ усовершенствовал технику СКВУ и применил изложенную

выше измерительную процедуру, что позволило российской стороне представить данные от 125 Гц. Неопределённость результатов калибровок на частотах от 125 Гц до 1 кГц была оценена, не превосходящей 0,4 дБ при коэффициенте охвата $k = 2$. Бюджет неопределённостей результатов калибровки опорного гидрофона В&К 8104 на частотах ниже 10 кГц представлен в таблице.

Таблица

Источник неопределённости	Вклад неопределённости, (%)	Число степеней свободы
Тип А		
Неопределённость, оценённая статистическими методами	$\leq 1,3$	12
Тип В		
Неточность квантования АЦП	0,6	
Неточность сопротивления в цепи излучателя R	0,2	∞
Неточность оценки отношения U_{PT}/U_{PH}	$\leq 4,6$	∞
Неточность оценки отношения $U_{TH}/(R \cdot I_T)$	$\leq 3,3$	∞
Неточность коэффициента усиления	0,6	∞
Неопределённость из-за усреднения передаточного импеданса пары излучатель — приёмник в свободном поле	$\leq 0,5$ (125 Hz – 10 kHz)	∞
Неисключённые остатки электрической перекрёстной помехи	$\leq 1,9$ (125 Hz – 10 kHz)	∞
Нарушение сферичности звукового поля (условий дальнего поля)	$\leq 4,0$	∞
Неисключённые остатки отражений звука от границ бассейна	$\leq 0,5$ (125 Hz – 10 kHz)	∞
Неточность измерения расстояния между акустическими центрами преобразователей	0,5	∞
Нарушение обратимости преобразователя	$\leq 2,0$	∞
Неточность коррекции электрической нагрузки	1,0	∞
Число эффективных степеней свободы	12	
Суммарная неопределённость	$\leq 2,8\%$	
Расширенная неопределённость	(%)	(дБ)
Расширенная неопределённость при коэффициенте охвата $k = 2$	$\leq 5,6\%$	0,4

Результаты низкочастотной калибровки опорного гидрофона типа В&К 8104 представлены на рис. 19.

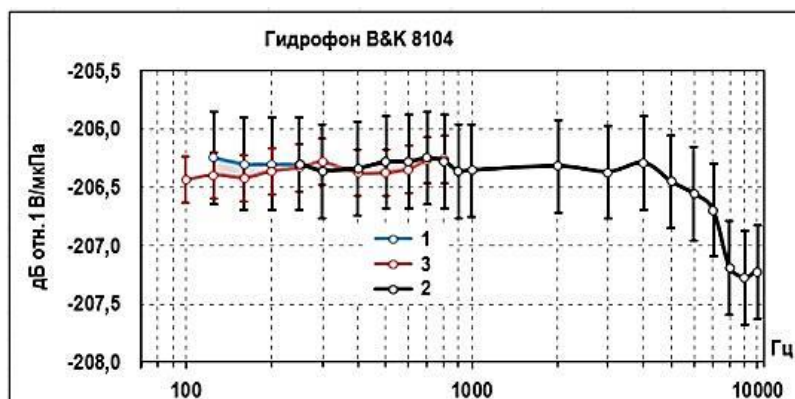


Рис. 19. Результаты низкочастотной калибровки опорного гидрофона типа В&К 8104: ряд 1 и 2 — по полю в бассейне; ряд 3 — в камере малого объема ГЭТ 55-2017

Поскольку сличения не завершены, и мы не располагаем официальными данными других участников, рядом 3 представлены результаты контрольных калибровок опорного гидрофона в камере малого объема ГЭТ 55-2017. Камеру малого объема ГЭТ 55-2017 также применяли для выполнения контрольных калибровок независимым методом на частотах ниже 1 кГц в сличениях КООМЕТ 473/RU/09 и 531/RU/11. Полученные отклонения результатов калибровок в бассейне и в камере малого объема подтвердили стабильность метрологических характеристик камеры. Малые отклонения кривых 1 и 3 на рис. 19 служат подтверждением правильности результатов низкочастотной калибровки, представленных российской стороной на ключевых сличениях ССАUV.W-K2. Показанные на рис. 19 неопределенности позволяют оценить эквивалентность результатов калибровок в камере и в бассейне. Эта эквивалентность прослеживается как на участке от 250 Гц до 1 кГц, охваченном предыдущими сличениями, так и на частотах ниже 250 Гц, что подтверждает метрологические характеристики изложенной измерительной процедуры.

Расширение частотного диапазона калибровки гидрофона по полю в область низких частот с 2000 по 2017 г. иллюстрирует рис. 20.

Полученные результаты не следует воспринимать как стремление заменить простую и точную калибровку гидрофона в камере малого объема более сложной процедурой измерений в бассейне. Задача описанных работ — создание и экспериментальная проверка способа низкочастотной калибровки по свободному звуковому полю, пригодного как для гидрофона, так и для гидроакустического рекордера.

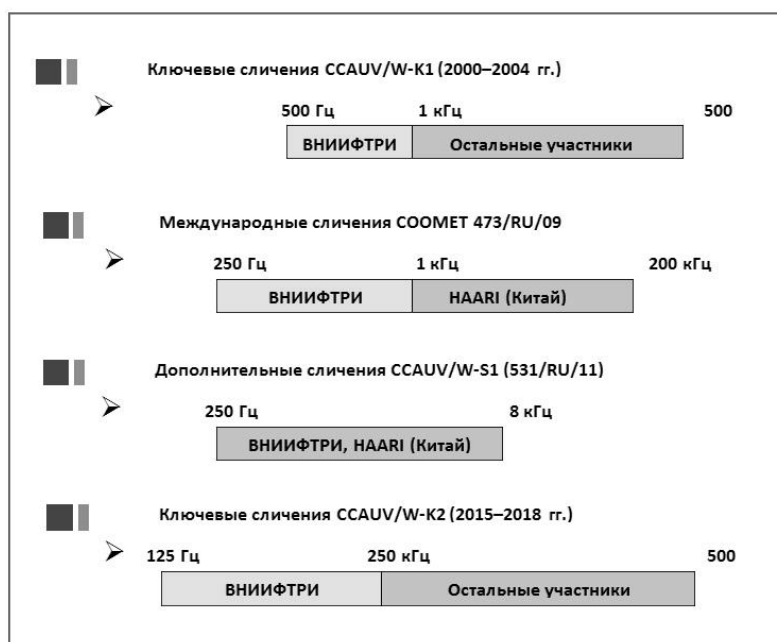


Рис. 20.

Повторимся, что калибровка рекордера в акустической камере невозможна из-за его габаритов, более того, такая калибровка (даже если бы её удалось каким-либо образом осуществить) не имела бы практического значения, поскольку её результаты представляли бы чувствительность по давлению вместо требуемой чувствительности по полю.

Моделирование рассеяния звука корпусом рекордера

При калибровке рекордера очень важно не привнести в измеряемые характеристики искажения, обусловленные несовершенством применяемых методов измерений. С другой стороны, также важно не отнести на счёт применяемых методов измерений несовершенство конструкции самого рекордера. Правильность результатов, полученных с использованием метода СКВУ, была многократно проверена (включая ключевые и международные сличения результатов калибровок гидрофонов) на высоких и средних частотах. В описанных выше экспериментах с применением разработанной измерительной процедуры, основанной на технике СКВУ, была выполнена калибровка по свободному полю гидрофона в диапазоне низких частот. Однако сравнение результатов калибровок по свободному полю и по давлению даже на самых низких частотах не может являться окончательным подтверждением безупречности работы метода в ситуации, когда гидрофон находится вблизи источника рассеяния звука (например, корпуса рекордера).

Необходимы количественные оценки, насколько точно разработанная измерительная процедура работает при измерении ЧХ чувствительности с большим размахом осцилляций на самых низких частотах.

В отсутствие возможности прямого сравнения (в настоящее время методу СКВУ нет альтернативы при измерениях чувствительности по свободному полю на низких частотах в бассейне), нужны не только уверенность, что метод СКВУ правильно работает при измерении ЧХ на самых низких частотах, но и количественные оценки точности метода.

Наличие описанного выше способа измерения частотной зависимости пары излучатель — приёмник на низких частотах методом СКВУ даёт возможность проверки любого из компонентов, участвующих в измерениях: излучателя, приёмника либо собственно метода СКВУ. Для выполнения такой проверки в качестве частотно независимого компонента была выбрана граница раздела сред вода — воздух с известным коэффициентом отражения. Использование такого подхода позволило не только подтвердить корректность метода при низкочастотной калибровке гидроакустического приёмника, но и привело к созданию нового метода измерения частотной зависимости коэффициента отражения звука от поверхности, на который получен патент.

Прямой путь подтверждения корректности метода — использование калиброванного рассеивателя звука, расположенного вблизи гидрофона. Однако конструкции рассеивателя с точно известными параметрами рассеяния не существует. Моделировать вызванные рассеянием звука осцилляции, искажая измеряемую ЧХ электрическими цепями, нельзя, поскольку осцилляции должны быть обусловлены акустическими волнами, создаваемыми излучателем, то есть модель должна быть акустической. Поэтому было принято решение вместо эталонного рассеивателя использовать эталонное отражение звука.

Как отражающая поверхность граница раздела вода — воздух обладает следующими замечательными свойствами:

- коэффициент отражения точно известен, практически равен единице и не зависит от частоты;
- фаза коэффициента отражения точно известна как для звукового давления, так и для колебательной скорости и градиента звукового давления и не зависит от частоты;
- большие размеры поверхности бассейна обеспечивают пренебрежимо малое влияние краевых эффектов на параметры отражённых звуковых волн, начиная с частот в сотни герц;
- соотношение длины волны и размеров бассейна позволяет использовать законы и соотношения геометрической акустики.

Частотная зависимость чувствительности гидрофона, измеренная при падении на гидрофон прямой звуковой волны излучателя и волны, отражённой границей раздела вода — воздух, будет искажена осцилляцией, возника-

ющей вследствие интерференции прямой и отражённой волн. Интерференционная осцилляция описывается гармонической функцией, амплитуда, частота и фаза которой однозначно определяются геометрическими параметрами эксперимента и коэффициентом отражения. Справедливость этого утверждения неоднократно подтверждена многочисленными экспериментами, в том числе с использованием тональных импульсов.

Чтобы использовать свойства границы раздела вода — воздух (отражение звука, известное с эталонной точностью), был выполнен эксперимент, идея которого состояла в том, чтобы внести в измеряемую ЧХ «эталонные» искажения с заранее известными параметрами и убедиться в том, что параметры искажения, измеренные с использованием метода СКВУ, совпадают с предсказанными. Другими словами, если правильно измерили искажения, то правильно измерили и саму ЧХ.

Схема эксперимента изображена на рис. 21. Размещение преобразователей в бассейне показано условно. В бассейне ГЭТ 55-2017 измеряли частотные зависимости пары излучатель — приёмник, в качестве излучателя использовали гидрофон ИТС1001, приёмника — гидрофон В&К8104. Измерения выполняли в частотном диапазоне до 2 кГц с использованием процедуры, описанной в разделе «Техника СКВУ». Пару излучатель — приёмник размещали на равном расстоянии от боковых стенок бассейна на глубинах: 1,5; 3; 4,5 м.

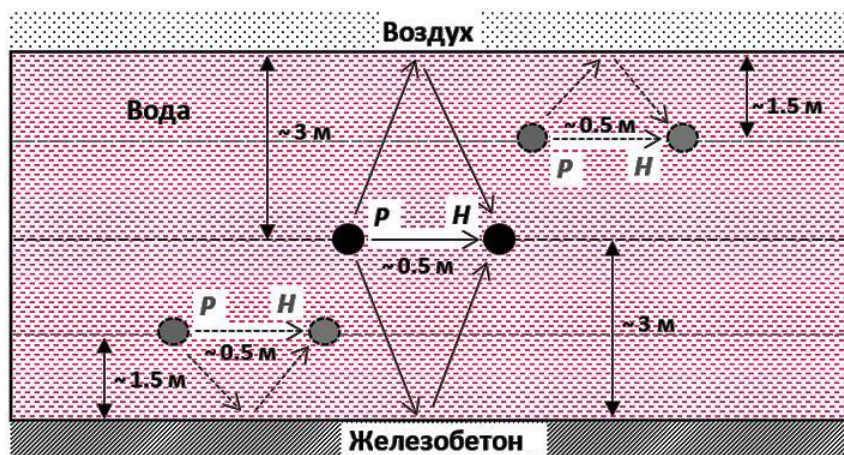


Рис. 21. Схема размещения пары излучатель — приёмник в бассейне

Одним из преимуществ метода СКВУ является возможность выбирать отражения, влияние которых подлежит подавлению. При рутинных калибровках стремятся подавить влияние всех отражений. Если влияние одного из отражений не подавить, то это проявится в осцилляциях получаемой частотной зависимости. В эксперименте воспользовались этой особенностью

метода СКВУ и при измерениях частотных зависимостей передаточных импедансов пары излучатель — приёмник оставляли неподавленными искажения первым по времени прихода отражением.

Отражение от поверхности воды в бассейне

На рисунке 22 приведена частотная зависимость передаточного импеданса $Z'_{PH}(f)$ пары излучатель — приёмник, размещённой на глубине 1,5 м, при измерении которой пропускали первое отражение и подавляли влияние второго и последующих отражений.

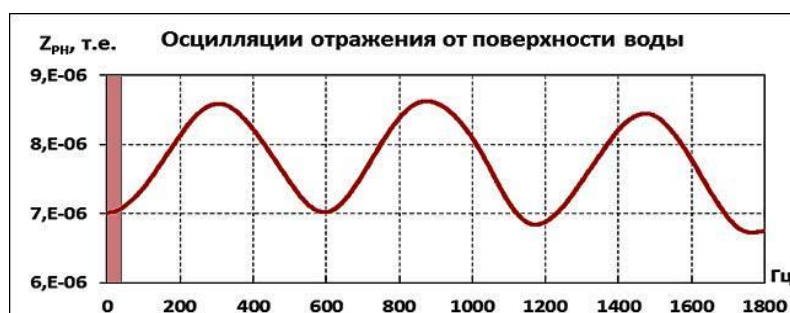


Рис. 22. Частотная зависимость, искажённая отражением от границы раздела вода — воздух

Частотные зависимости на рис. 22 и других рисунках настоящего подраздела скорректированы на частотную зависимость параметра взаимности. Полосой красного цвета выделен участок шириной 70 Гц, на котором подавляли влияние шумовой помехи. Полученные на этом участке значения частотной зависимости следует рассматривать как результат интерполяции. При выбранной глубине первое по времени прихода отражение — это звук, отражённый от границы раздела сред вода — воздух, для которой параметры, характеризующие отражения звука, хорошо известны. Наблюдаемые осцилляции частотной зависимости имеют вид гармонической функции, период и амплитуда которой практически не меняются в частотном диапазоне эксперимента. Период осцилляций Δf составляет примерно 581 Гц, что соответствует разности хода 2,54 м прямой и отражённой от поверхности воды в бассейне волн в эксперименте.

$$M_H(f) = M_o(f) \frac{z_{и-г}(f)r_{и-г}}{z_{и-о}(f)r_{и-о}}$$

Частотную зависимость $Z'_{PH}(f)$, обработанную по методу СКВУ и искажённую отражением от одиночного источника, можно представить в виде произведения частотной зависимости в свободном поле $Z_{PH}(f)$ (в отсутствие отражения) и функции, описывающей осцилляцию [12]:

$$Z'_{PH}(f) = Z_{PH}(f)[1 + W_R \cos(k\Delta r + \varphi_R)], \quad (5)$$

где $W_R = w_R G(\Delta r) \frac{r_{PH}}{r_{PRH}}$ — амплитуда осцилляций; w_R и φ_R — модуль и аргумент комплексного коэффициента отражения; k — волновое число; r_{PH} и r_{PRH} — длины пробега прямой и отражённой волн; $\Delta r = r_{PRH} - r_{PH}$ — разность хода прямой и отражённой волн; $G(\Delta r)$ — коэффициент, характеризующий подавление осцилляции при обработке частотной зависимости по методу СКВУ.

Для оценки амплитуды и фазы осцилляций в этом же эксперименте методом СКВУ получили частотную зависимость по свободному полю $Z_{PH}(f)$, подавив влияние отражений, начиная с первого. Функция осцилляции, которую получили по формуле

$$W_R \cos(k \Delta r + \varphi_R) = \left[\frac{Z'_{PH}(f)}{Z_{PH}(f)} - 1 \right] \cdot 100\%, \quad (6)$$

приведена на рис. 23.



Рис. 23. Функция осцилляции отражения от границы раздела вода — воздух

Размах осцилляций составил 20,6%, на основании этого амплитуда осцилляций W_R была принята равной 10,3%. Однако наибольший интерес представляет поведение осцилляций вблизи нуля оси частот. С приближением частоты к нулю оси частот поведение зависимости не изменяется, что можно воспринимать как подтверждение правильности результатов, полученных с использованием разработанной измерительной процедуры на низких частотах.

Обратим внимание на фазу осцилляции в нуле оси частот, где осцилляция достигает минимума. Заметим, что своего минимума осцилляции достигают также на частотах 581 и 1162 Гц. Как уже упоминалось, разность хода прямой и отражённой волн в эксперименте составила 2,54 м, что соответствует длине волны на частоте 581 Гц и двойной длине волны на частоте 1162 Гц. Поскольку при отражении от границы раздела сред вода — воздух волна,

падающая из воды, меняет фазу на противоположную (см. приложение 2 в [60]), то на частотах кратных 581 Гц, отражённая волна приходит в точку приёма в противофазе с прямой волной. Это обуславливает минимумы осцилляций на частотах 1162 и 581 Гц, частота следующего минимума равна нулю герц, однако формально к ней применимы те же рассуждения, что и показали результаты эксперимента.

Чтобы не утруждать читателя изучением учебников по акустике, на рис. 24 приведена осциллограмма прямого и первого, отражённого от поверхности воды в бассейне, импульсных сигналов. На осциллограмме видно, что отражённый и прямой импульсы в противофазе.

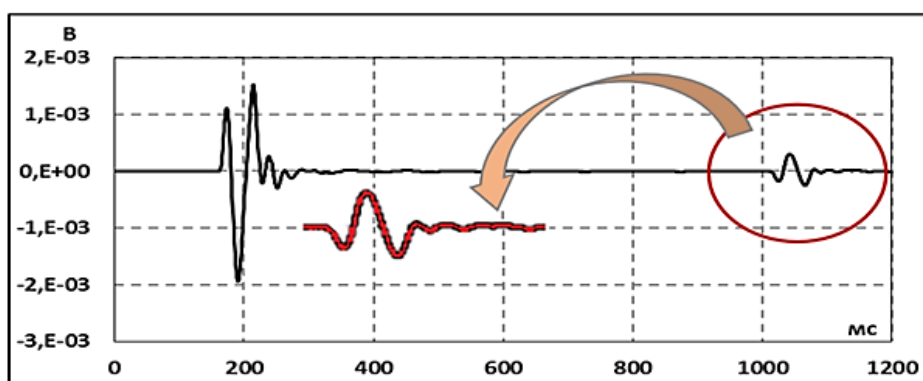


Рис. 24. Осциллограмма прямого и первого, отражённого от поверхности воды, импульсов

Обратимся к формуле, которая описывает осцилляцию с произвольной фазой в комплексной форме:

$$\left[\frac{\dot{Z}'_{PH}(f)}{\dot{Z}_{PH}(f)} - 1 \right] = W_R e^{-j\varphi_R} e^{-jk\Delta r}.$$

Если в этой формуле исключить набег фазы при распространении волны на расстояние Δr , например, умножив функцию осцилляций на $e^{jk\Delta r}$, получим комплексную зависимость $W_R e^{-j\varphi_R}$, по которой можно проследить изменение фазы отражения вплоть до самых низких частот. Тем самым появляется способ судить о фазе отражений по фазе осцилляций измеренной частотной зависимости пары излучатель — приёмник.

На рисунке 25 изображены преобразование Фурье (кепстр) функции осцилляций и функция пропускания пространственного фильтра $G(\tau)$, реализуемого в описываемом эксперименте обработкой по методу СКВУ [15]. По оси абсцисс графиков отложены значения $\tau = \Delta r/c$, которые имеют смысл временных задержек.

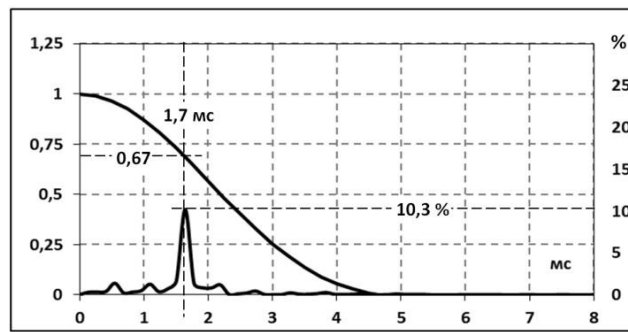


Рис. 25.

В эксперименте значение отношения $r_{PRH} / r_{PH} = 6,42$ определили по отношению временных задержек прямого и первого отражённого сигнала относительно начала излучения. Периоду осцилляций 581 Гц на оси абсцисс графика соответствуют задержка $\tau = 1,7$ мс и значение функции пропускания 0,67. При этом значение модуля коэффициента отражения, которое рассчитывали по формуле

$$w_R = \frac{W_R}{G(\Delta r)} \frac{r_{PRH}}{r_{PH}},$$

составило 98,7%, что весьма близко к теоретическому значению [60].

Отражение от дна бассейна

В отличие от отражения звуковой волны на границе раздела сред вода — воздух, при отражении звуковой волны от стального корпуса рекордера изменения знака фазы не происходит. Чтобы смоделировать случай такого отражения, пару излучатель — приёмник располагали на глубине 4,5 м с тем, чтобы первое отражение было от дна бассейна. На рисунке 26 приведена осциллограмма прямого и первого, отражённого от дна бассейна, импульсных сигналов, по которой видно, что фазы этих импульсов близки.

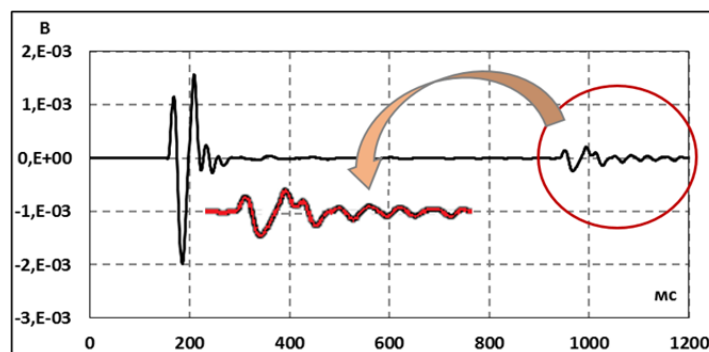


Рис. 26. Осциллограмма прямого и первого, отражённого от дна бассейна, импульсов

На рисунке 27 представлена частотная зависимость передаточного импеданса пары излучатель — приёмник, при измерении которой пропускали отражение от дна (первое отражение) и подавляли влияние второго и последующих отражений.

По поведению зависимости на самых низких частотах можно судить о том, что полученный результат не противоречит характеру отражений от дна бассейна: отражение от среды с более высоким волновым сопротивлением (большим ρc) происходит с сохранением фазы [60]. То есть применение разработанной процедуры измерений привело к правильному результату.

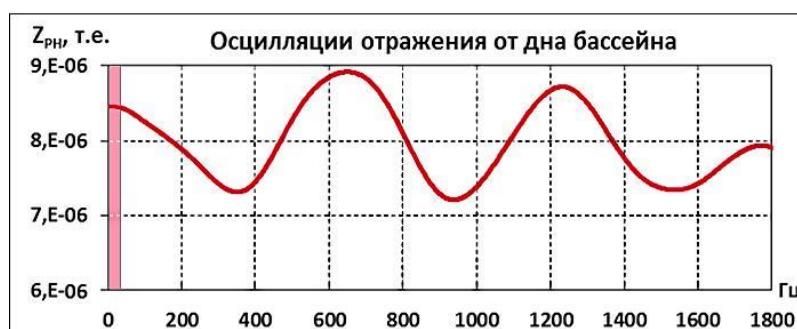


Рис. 27. Частотная зависимость, искажённая отражением от дна бассейна

Групповое отражение

Эксперименты с отражением от поверхности и дна бассейна показали возможность применять разработанную процедуру для измерения на самых низких частотах зависимостей с осцилляциями, обусловленными одиночным источником рассеяния звука. При испытаниях приёмников звука, используемых в воздушной акустике, — шумомеров — было установлено, что искажения частотной характеристики микрофона обуславливают осцилляции от нескольких источников рассеяния, расположенных на корпусе шумомера. На низких частотах размах осцилляций частотной характеристики уменьшается. Этому способствуют две причины: рассеяние уменьшается с уменьшением частоты и сложение в точке приёма рассеянных волн от разных источников с разными фазами. Поскольку шумомер и рекордер похожи по конфигурации корпуса, при калибровке рекордера также следует ожидать аналогичного поведения осцилляций частотной характеристики. Ситуация с приходом в точку приёма волн с разными фазами и амплитудами, которые слабо зависят от частоты, была смоделирована в бассейне. В качестве источников таких волн были использованы отражения от поверхности воды, дна и стенок бассейна, амплитуды которых слабо зависят от частоты.

При расположении пары излучатель — приёмник на глубине 3 м в центре бассейна ГЭТ 55-2017 времена прихода отражений от поверхности воды,

дна и стенок бассейна различаются не более чем на 0,35 мс, что, с одной стороны, примерно соответствует различию временных задержек отражений от торцов рекордера, а с другой стороны, позволяет при обработке по методу СКВУ относиться к этим отражениям, как к одному групповому отражению. Такое групповое отражение можно либо подавлять, либо оставлять без подавления.

На рисунке 28 приведена частотная зависимость передаточного импеданса пары излучатель — приёмник на глубине 3 м, искажённая групповым отражением.

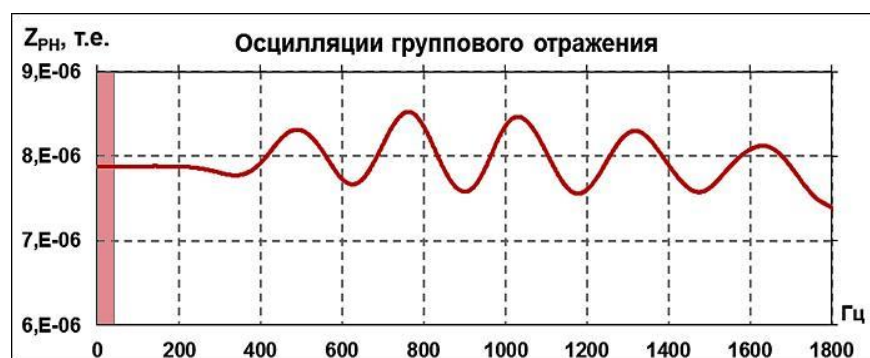


Рис. 28. Частотная зависимость, искажённая групповым отражением

Наиболее заметным отличием этой зависимости от зависимостей на рис. 23 и 27 является затухание осцилляций с уменьшением частоты. При измерениях частотных зависимостей с использованием ЛЧМ-сигналов применяют операцию детектирования, результатом которой является огибающая. При использовании квадратурно дополненных ЛЧМ-сигналов операцию детектирования выполняют умножением принятого ЛЧМ-сигнала на комплексно сопряжённый излучённый сигнал. При наличии паразитной постоянной составляющей в принятом ЛЧМ-сигнале такое умножение приводит к появлению паразитной осцилляции в результирующей зависимости. Поведение этих осцилляций отличается от поведения осцилляций, вызванных отражениями, и поэтому они не подавляются при обработке по методу СКВУ. В наибольшей степени этот эффект проявляется на низких частотах, на которых амплитуда полезного сигнала мала, а период очень значителен, что затрудняет компенсацию паразитной постоянной составляющей.

Период осцилляций на рис. 28 слабо изменяется с частотой, а на частотах ниже 400 Гц размах осцилляций резко уменьшается. Уменьшение размаха можно объяснить тем, что с уменьшением частоты разность фаз волн, отражённых от стенок и дна бассейна, стремится к нулю, и в точке приёма они складываются в противофазе с волной, отражённой от поверхности воды,

уменьшая тем самым размах осцилляции группового отражения. При этом на низкочастотном участке зависимости не проявляются осцилляции, обусловленные паразитной постоянной составляющей. Это свидетельствует об эффективности разработанной процедуры измерений, в которой совмещены операции детектирования и коррекции на частотную зависимость параметра взаимности.

Полученный результат даёт уверенность в том, что разработанная процедура измерений позволит исследовать эффекты уменьшения дифракционных искажений, обусловленных влиянием корпуса рекордера, при уменьшении частоты.

Выполненные эксперименты показали, что разработанная измерительная процедура позволяет расширить частотный диапазон калибровки по свободному полю в бассейне с минимальным размером 6 м с 250 [58] до 70 Гц, используя малую неравномерность частотной характеристики чувствительности гидрофона на низких частотах.

Способность процедуры измерять частотные зависимости с большими и малыми осцилляциями вплоть до самых низких частот позволяет использовать её не только для целей калибровки. Предложенный на основе выполненного эксперимента «Способ измерения частотной зависимости коэффициента отражения звука от поверхности» защищён патентом РФ на изобретение № 2655478 с приоритетом от 26.07.2017 г. Высокая точность определения коэффициента отражения от поверхности воды показывает возможность исследовать с помощью разработанной процедуры акустические свойства материалов и объектов на низких частотах, не доступных тонально-импульсному методу. Такие исследования можно выполнять различными способами. Один из них состоит в сравнении в одном эксперименте амплитуд осцилляций от поверхности воды и испытуемого образца при выполнении двух измерений: одно со свободной поверхностью воды, а второе с образцом, расположенным на поверхности воды.

Для образцов, которые невозможно расположить на поверхности воды (например, образец, состоящий из клиньев), такое сравнение затруднено. В этой ситуации можно использовать прямое измерение коэффициента отражения, основанное на определении амплитуды осцилляции, не подавленной пространственным фильтром СКВУ, и последующей коррекцией амплитуды осцилляции с учётом пропускания фильтра, как было показано в эксперименте с отражением от поверхности воды.

Методические указания МИ 874-85 «Бассейны гидроакустические измерительные. Методика аттестации» предписывают определять нижнюю граничную частоту градуировки гидрофонов в бассейне исходя из минимального коэффициента поглощения (максимального коэффициента отражения), взятого из сертификата (паспорта) на данный тип покрытия. При этом не учитывается тот факт, что коэффициенты поглощения и отражения зависят

от угла падения звуковой волны. В сертификате указывают коэффициенты при нормальном падении звука, а при измерениях в бассейне угол падения отличается от нормального для всех отражающих поверхностей, кроме нормальных к прямой, проходящей через приёмник и излучатель. Разработанная процедура позволяет оценить влияние отражений для точек размещения излучателя и приёмника непосредственно перед началом измерений, учитывая влияние всей подводной конструкции бассейна. При разработке гидроакустической барокамеры возникают дополнительные сложности, связанные с тем, что поведение облицовочного материала в условиях меняющихся температуры и гидростатического давления неизвестно. Всё это делает весьма актуальными задачи предварительных исследований облицовочного материала для барокамеры. Для решения этих задач разработанная измерительная процедура предпочтительнее тонально-импульсного метода, поскольку позволяет получать результаты на значительно более низких частотах.

В открытом измерительном бассейне удаётся минимизировать влияние подводных конструкций координатных устройств, поскольку габаритные узлы направляющих и механизмов перемещения можно разместить над водой. В отличие от открытого бассейна, значительную часть таких механизмов вынужденно размещают внутри барокамеры. При тонально-импульсном методе измерений переходной процесс в системе излучатель — приёмник маскирует отражения от близкорасположенных элементов координатного устройства. Это затрудняет как само обнаружение источника отражения, так и оценку его влияния. Использование разработанной измерительной процедуры позволяет ставить не только задачи обнаружения и оценки влияния, но и подавления влияния источника отражения.

Применение разработанной процедуры позволит существенно расширить функциональные возможности гидроакустической барокамеры.

Литература

1. Исаев А.Е., Цыганков С.Г., Кистович А.В., Николаенко А.С., Черников И.В. Повышение достоверности экспертной оценки инструментальной погрешности измерения УПШ / Сб. трудов Научно-практической конференции «Гидроакустика». Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2015. С. 122–132.
2. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Черников И.В. Калибровка приёмника для измерений окружающего подводного шума / Материалы 6-й Международной науч.-техн. конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях». СПб.: Судометрика, 2016. С. 179–186.
3. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Лабораторная калибровка гидроакустического приёмника по полю на низких частотах // Измерительная техника. 2018. № 01. С. 54–59.

4. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Измерение частотной зависимости коэффициента отражения звука в условиях незаглушённого бассейна // Измерительная техника. 2018. № 04. С. 53–56.
5. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Калибровка в лабораторном бассейне рекордера с вынесенным гидрофоном // Измерительная техника. 2018. № 07. С. 62–65.
6. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Чувствительность приёмника при измерениях подводного шума // Измерительная техника. 2018. № 09. С. 61–65.
7. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Способ калибровки гидрофона по полю на низких частотах. Патент на изобретение № 2655049. Опубликовано: 23.05.2018. Бюл. № 15.
8. Исаев А.Е. Николаенко А.С. Способ измерения частотной зависимости коэффициента отражения звука от поверхности. Патент на изобретение № 2655478. Опубликовано: 28.05.2018. Бюл. № 16.
9. Исаев А.Е. Критерий качества реализации условий свободного поля при градуировке гидроакустического приёмника в бассейне с отражающими границами // Измерительная техника. 2014. № 5. С. 48–53.
10. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Калибровка рекордера подводного звука и вопросы прослеживаемости создаваемых средств измерений к первичным эталонам // Альманах современной метрологии. 2019. № 1 (17). С. 94–108.
11. Еняков А.М., Панин О.А., Сильвестров С.В. Проблемы и перспективы стандартизации измерений подводного шума, излучаемого коммерческими судами // Альманах современной метрологии. 2015. № 5. С. 117–156.
12. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive).
13. COUNCIL DIRECTIVE 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora.
14. Nayman G., Lepper P., Robinson S. The calibration and characterization of autonomous underwater recorders / Proc. of the 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics UA2014: ed. J.S. Papadakis, L. Bjorno. Rhodes, Greece. 2014. P. 1103–1108.
15. Исаев А.Е. Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008. 369 с.
16. Матвеев А.Н. Разработка и исследование методов градуировки гидроакустического приёмника при излучении сигналов с линейной частотной модуляцией: дис. ... канд. техн. наук. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2015.
17. Черников И.В. Разработка и исследование методов и средств градуировки гидроакустических приёмников по полю с использованием шумового

- сигнала: дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.11.06. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016.
18. Heyser Richard C. Acoustical Measurements by Time Delay Spectrometry // J. AES. 1967. V. 15. P. 370–382.
 19. Heyser Richard C. Loudspeaker Phase Characteristics and Time Delay Distortion // J. AES. 1969. V. 17. P. 30–41.
 20. Heyser Richard C. Determination of Loudspeaker Signal Arrival Times. Parts I–III // J. AES. 1971. P. 734–743, 829–834, 902. Or AES Loudspeakers Anthology. V. 1–25. P. 225.
 21. Heyser Richard C. Time Delay Spectrometry — An Anthology of the Works of Richard C. Heyser // AES. New York, 1988.
 22. Vanderkooy J. Another Approach to Time-Delay Spectrometry // J. AES. July 1986. V. 34. P. 523–538.
 23. Greiner R., Wania J., Noejovich G. A Digital Approach to Time Delay Spectrometry // J. AES. July 1989. V. 37. P. 593–602.
 24. D'Antonio P., Konnert J. Complex Time Response Measurements Using Time-Delay Spectrometry (Dedicated to the late Richard C. Heyser) // J. AES. September 1989. V. 37. P. 674–690.
 25. Herlufsen H. Dual Channel FFT Analysis (Part I, II) // Brüel & Kjær Technical Review. 1984. No. 1. Available on the web.
 26. Shoukens J., Pintelon R. Measurement of Frequency Response Functions in Noise Environments // IEEE Trans. Instrumentation and Measurement. December 1990.
 27. Shoukens J., Pintelon R., Rolain Y. Broadband versus Stepped Sine FRF Measurements // IEEE Trans. Instrumentation and Measurement. April 2000. No. 2.
 28. Berman J.M., Fincham L.R. The Application of Digital Techniques to the Measurement of Loudspeakers // J. AES. 1977. V. 25. P. 370–384. Or AES Loudspeakers Anthology. V. 1–25. P. 436.
 29. Fincham L.R. Refinements in the Impulse Testing of Loudspeakers // J. AES. March 1985. V. 41. P. 133–140.
 30. Dunn C., Hawksford M.O. Distortion Immunity of MLS-Derived Response Measurements // J. AES. May 1993. P. 314. Available on the web.
 31. Borish J., Angell J. An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response Using Pseudo-Random Noise // J. AES. 1983. V. 33. P. 478–488.
 32. Müller S., Massarani P. Transfer-Function Measurement with Sweeps // J. AES. 2001. V. 49. I. 6. P. 443–471.
 33. Barrera-Figueroa S., Rasmussen K., Jacobsen F. A time-selective technique for free-field reciprocity calibration of condenser microphones // J. Acoust. Soc. September 2003. Am. 114 (3). P. 1467–1476.
 34. 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.
35. Robinson S. Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks. PL Report СМАМ 034. 1999. ISSN 1369-6785.
36. 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.
37. ГОСТ Р 53188.2-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Шумомеры. Часть 2. Методы испытаний.
38. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр. Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д.И. Менделеева, Белорус. гос. ин-т метрологии. Изд. 2-е, испр. СПб.: НПО «Профессионал», 2010. 82 с.
39. Р50.2.037-2004. ГСИ. Измерения гидроакустические. Термины и определения. М.: Госстандарт России.
40. IEC 60050-801(1994) Международный электротехнический словарь. Глава 801. Акустика и электроакустика.
41. Рандалл Р.Б. Частотный анализ. Дания: ДК-2850 Нерум, 1989. 379 с.
42. Кулиев Ю.Н. и др. Пьезоприемники давления. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1976. 152 с.
43. Robinson S.P. et al. An international key comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 1 to 500 kHz // J. ASA. 2006. V. 120. No. 3. P. 1366–1373.
44. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Повышение частотного разрешения при обработке акустических сигналов методом скользящего комплексного взвешенного усреднения // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 2. С. 277–283.
45. Исаев А.Е. Нижняя частота градуировки гидрофона «по полю» при излучении тональных сигналов в незаглушённом бассейне // Измерительная техника. 2010. № 1. С. 20–24.
46. Исаев А.Е. Уменьшение влияния переходного процесса при градуировке гидрофонов «по полю» на низких частотах с использованием квадратурно-дополненных гармонических сигналов // Измерительная техника. 2010. № 4. С. 20–24.
47. Beatty L.G., George J.D., Robinson A.Z. Use of the complex exponential expansion as a signal representation for underwater acoustic calibration // J. Acoust. Soc. 1978. Am. 63. P. 1782–1794.
48. Ainsleigh P.L., George J.D. Modeling exponential signals in a dispersive multipath environment // IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1992. V. 5. P. 457–640.
49. Ainsleigh P.L., George J.D. Signal modeling in reverberant environments with application to underwater electroacoustic transducer calibration // J. Acoust. Soc. 1995. Am. 98. P. 270–279.

50. Robinson S.P., Nayman G., Harris P.M., Beamiss G.A. Signal-modeling methods applied to the free-field calibration of hydrophones and projectors in laboratory test tanks // *Measurement Science and Technology*. 2018. V. 29, I. 8. Article id. 085001.
51. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Градуировка приёмника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ-сигнала // *Акустический журнал*. 2013. Т. 59. № 6. С. 773–781.
52. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Комплексная градуировка приёмника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности // *Акустический журнал*. 2014. Т. 60. № 1. С. 48–55.
53. Исаев А.Е., Черников И.В. Использование сигналов с распределённой по частоте мощностью для лабораторной градуировки гидроакустического приёмника // *Измерительная техника*. 2015. № 10. С. 64–67.
54. Маслов В.К. Современные технологии анализа и обработки информации в физико-технических измерениях. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». 2010. 583 с.
55. ISO 18406:2017 Гидроакустика. Измерение излучаемого подводного звука от ударов при забивке свай.
56. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Лабораторная калибровка гидроакустического приёмника по полю на низких частотах // *Измерительная техника*. 2018. № 01. С. 54–59.
57. Градуировка гидрофонов. Международная электротехническая комиссия. Стандарт МЭК. Публикация 565 (565 A). Издание первое 1977. М.: Изд-во стандартов, 1981.
58. American National Standard «Procedures for Calibration of Underwater Electroacoustic Transducers». ANSI S1.20. 1988.
59. National Standard of China «GB/T 3223-1994 Acoustics — Free field calibration method of underwater sound transducers».
60. Румынская И.А. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1979. 209 с.