IV. Гидроакустические приборы и системы

УДК 53.089.68

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАССОГАБАРИТНОЙ МОДЕЛИ РЕКОРДЕРА А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, А.М. Поликарпов

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

В работе исследуются акустические свойства рекордера. Описывается массогабаритная модель рекордера, преимущества предложенной конструкции, приводятся результаты экспериментов на низких частотах. Исследуются факторы, влияющие на метрологические характеристики рекордера.

Значительное внимание уделяется локализации источников рассеяния на корпусе рекордера.

Предложена измерительная процедура (ИП) выполнения исследований акустических свойств т-рекордера. Приводятся выводы по результатам экспериментов. Подтверждается преимущество предложенной ИП, дающей возможность выполнять калибровки на таких низких частотах, где влияние дифракции пренебрежимо мало.

Сформулированы некоторые рекомендации по разработке и компоновке приёмника. Предложена процедура калибровки акустического приёмника в условиях лабораторного бассейна.

Обсуждаются проблемы валидации рекордера, проблема обеспечения прослеживаемости создаваемого средства измерений к первичным эталонам. Говорится о необходимости включения разработанных методов ВНИИФТРИ в стандарт на калибровку рекордеров.

Ключевые слова: рекордер, малогабаритная модель, измерительная процедура, акустические свойства, калибровка, условия лабораторного бассейна.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE MASS-DIMENSIONAL MODEL OF THE RECORDER A.E. Isaev, A.S. Nikolaenko, A.M. Polikarpov

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

The acoustic properties of the recorder are investigated in this work. The mass-dimensional model of the recorder and the advantages of the proposed design are described, the results of experiments at low frequencies are presented. The factors affecting the metrological characteristics of the recorder are investigated.

Considerable attention is paid to the localization of scattering sources on the recorder body.

A measurement procedure (IP) for studying the acoustic properties of an m-recorder is proposed. Conclusions are given based on the results of experiments.

Conclusions are given based on the results of experiments. The advantage of the proposed IP is confirmed, which makes it possible to perform calibrations at such low frequencies where the influence of diffraction is negligible.

Some recommendations for the development and configuration of the receiver are formulated. A procedure for calibrating an acoustic receiver in laboratory pool conditions is proposed.

The problems of the validation of the recorder, the problem of ensuring the traceability of the created measuring instrument to primary standards are discussed. The necessity of including the developed by VNIIFTRI methods in the standard for calibrating of recorders is considered.

Key words: recorder, small-scale model, measuring procedure, acoustic properties, calibration, laboratory pool conditions.

Эксперименты с массогабаритной моделью рекордера

Стенд для исследования акустических свойств рекордера

Для измерений ЧХ и характеристик направленности рекордера были созданы измерительный стенд, координатное устройство и массогабаритная модель рекордера. Структурная схема стенда приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема стенда

В состав стенда входят: управляющая система на базе персональной ЭВМ со встроенным в системный корпус устройством АЦП/ЦАП (формирование сигналов возбуждения излучателя, преобразование сигналограмм в цифровую форму, регистрация цифровых сигналограмм в памяти ПЭВМ); усилитель мощности Tabor 9200A (усиление по току и напряжению сигнала возбуждения излучателя); SR560 — малошумящий усилитель электрических напряжений; блоки входного согласующего усилителя и устройства коммутации тока возбуждения излучателя.

Устройство позиционирования рекордера монтируется на мостовом устройстве бассейна ГЭТ 55-2017, обеспечивает угловые перемещения рекордера на $\pm 90^{\circ}$ относительно опорного направления и представляет собой кронштейн *1* с установленными на нём стрелкой отсчёта угла поворота *2* и посадочными местами для оси поворотного механизма *3* (см. рис. 2).

На оси поворотного механизма установлены поворотная балка 4 со шкалой угловых перемещений 5 и скользящая втулка 6, к которой крепится трос

с талрепом, поддерживающий поворотную балку. Механизм углового перемещения приводится в движение шаговыми двигателями промышленной моторизованной поворотной платформы 8MR190-2-4247 под управлением контроллера шаговых двигателей (КШД) 8SMC4-USB-B9. Рекордер вывешивают горизонтально с помощью подвесов 7 на поворотной балке так, чтобы ось вращения проходила через геометрический центр активного элемента гидрофона рекордера. Излучатель вывешивают на собственном кабеле справа или слева от оси поворотного устройства, как это показано на рис. 2, что обеспечивает измерение круговых характеристик направленности.



Рис. 2. Устройство позиционирования рекордера

Программный комплекс стенда включает в себя программный модуль удалённого управления измерительными приборами, электронными блоками и устройством позиционирования, модуль процедуры измерений акустических сигналов (включая синхронное накопление ЛЧМ сигналов), модуль обработки по методу СКВУ и отображения результатов измерений из состава программного обеспечения ГЭТ 55-2017. Программный комплекс дополнен модулем формирования ЛЧМ сигналов, допускающим перемену знака приращения мгновенной фазы при переходе через нуль частоты, модулем коррекции экспериментальной зависимости на частотную зависимость параметра взаимности и тока излучателя, модулем компенсации разрыва фазочастотной зависимости при переходе через нуль частоты, модулем коррекции экспериментальной зависимости в окрестности нуля частот (кор-

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

рекция на частотном интервале искажений помехой). Модуль коррекции реализует алгоритмы:

- «спрямления» экспериментальной частотной зависимости;
- «простригания» выбросов и провалов;
- аппроксимации пьедестала помехи гладкой кривой с последующим вычитанием.

Программный модуль обработки по методу СКВУ модифицирован с целью обеспечения возможности выбора отражений, подлежащих подавлению.

Постобработка дополнена расчётом функции пропускания пространственного фильтра, реализуемого обработкой СКВУ в эксперименте.

Массогабаритная модель рекордера

Для того чтобы обеспечить сопоставимость результатов исследований ВНИИФТРИ и данных, опубликованных НФЛ, был создан массогабаритный макет рекордера «AURAL M2» (далее m-рекордер). Внешний вид m-рекордера представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид массогабаритного макета рекордера

Корпус трекордера выполнен из нержавеющей стали в виде герметичного толстостенного пустотелого цилиндра длиной 400 мм и диаметром 150 мм. Вес трекордера — 25 кг в надводном и 9 кг в подводном положении. В качестве чувствительного элемента использован гидрофон В&К 8104, который закреплён на корпусе так, что акустический центр его активного элемента расположен на оси симметрии корпуса. Толщину стенок корпуса и габариты трекордера старались выбрать так, чтобы его акустические свойства были близки к свойствам прототипа. С помощью двух хомутов, закреплённых вблизи торцов корпуса, трекордер крепится к подвесам поворотной балки на тонких тросах.

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

Преимущества предложенной конструкции устройства позиционирования

Значительные габариты и вес рекордера не позволяют применить при его исследованиях штатные системы подводного позиционирования гидрофонов. Дополнительная сложность состоит в том, что центр масс рекордера находится на значительном расстоянии от акустического центра гидрофона. Для измерения характеристик направленности необходимо поворачивать рекордер таким образом, чтобы ось вращения проходила через акустический центр гидрофона. Также необходимо исключить смещения акустического центра гидрофона от оси вращения вследствие эксцентриситета, который неизбежно возникает при жёстком креплении рекордера из-за несовпадения центра масс и оси вращения. При решении этих задач был использован опыт подобных работ в воздушной акустике, когда устройство позиционирования разрабатывают с учётом особенностей исследуемого изделия. При этом устройство позиционирования должно вносить минимальные искажения звукового поля. Наличие свободной поверхности воды в бассейне позволило исключить влияние на звуковое поле громоздких элементов устройства позиционирования, разместив их над водой. Гибкий подвес маятникового типа автоматически обеспечивает размещение рекордера строго под поворотной балкой, горизонтальность которой в нагруженном состоянии можно регулировать с помощью талрепа. Акустический центр гидрофона и ось вращения совмещают, смещая подвесы по поворотной балке и контролируя смещение, например с помощью отвеса.

Результаты исследований предложенной конструкции устройства позиционирования показали, что при вращении рекордера на 180° в надводном и подводном (на глубине 3 м) положениях смещения акустического центра гидрофона относительно оси вращения не превосходят 1,8 мм. При расстоянии между излучателем и гидрофоном 2,5 м такие изменения приводят к пренебрежимо малой (менее 0,1%) ошибке измерения амплитудно-частотных характеристик и характеристик направленности рекордера. Ошибка в измерении фазочастотной характеристики на частоте 20 кГц не превосходит 9°. В надводном положении смещения акустического центра гидрофона проверяли с помощью отвеса, который закрепляли на оси устройства позиционирования. При исследованиях в подводном положении излучали и принимали рекордером короткий импульсный сигнал. Смещения акустического центра гидрофона оценивали по изменению задержки принятого импульсного сигнала относительно импульса излучателя.

Устройство позиционирования показало свою практичность при эксплуатации, достаточную точность и хорошие акустические свойства, которые можно оценить по частотным зависимостям чувствительности m-рекордера на рис. 4. Рядом 2 представлена частотная зависимость чувствительности m-рекордера при фронтальном падении волны (вдоль оси рекордера) и рас-

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

стоянии 93 мм между акустическим центром активного элемента гидрофона и торцом m-рекордера, что соответствует положению гидрофона на прототипе. Период осцилляций частотной зависимости близок к периоду осцилляций частотной зависимости чувствительности прототипа, вызванных отражением звука от переднего торца корпуса. К сожалению, по осцилляциям зависимости, представленной рядом 2, сложно установить наличие других источников рассеяния звуковой волны, хотя признаки влияния таких источников можно заметить. При испытаниях шумомеров, применяемых в воздушной акустике, обычно проявляются осцилляции, обусловленные источниками рассеяния, расположенными вблизи заднего торца шумомера.



Рис 4.

Чтобы уменьшить эффект затенения удалённых от переднего торца источников рассеяния, расстояние между акустическим центром активного элемента гидрофона и торцом m-рекордера было увеличено до 150 мм. Рядом 1 представлена частотная зависимость чувствительности m-рекордера при таком расположении гидрофона. Осцилляции с периодом 5 кГц обусловлены рассеянной волной, запаздывающей в точке приёма относительно прямой волны излучателя на 0,21 мс. При фронтальном падении звуковой волны на m-рекордер это соответствует источнику, удалённому от гидрофона на 150 мм (передний торец корпуса m-рекордера). На полученной зависимости проявились осцилляции с периодом 1,2 кГц, что соответствует источнику, расположенному на расстоянии 600 мм (вблизи заднего торца m-рекордера). Заметных осцилляций, которые соответствовали бы другим источникам рассеяния (например, от креплений устройства позиционирования) на частотной зависимости не обнаружено.

В целом акустические характеристики рассеяния на конструкции m-peкордера оказались достаточно близки к характеристикам прототипа. Об этом, кроме периода, свидетельствует сопоставимый размах осцилляций, а также характер поведения частотных зависимостей. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что созданный макет достаточно полно отражает акустические свойства рекордера «AURAL M2» и что его можно использовать для отработки методики калибровки гидроакустического рекордера.

Исследования акустических свойств т-рекордера

Экспериментальные исследования заключались в измерении частотных зависимостей чувствительности трекордера при различных углах падения звуковой волны. Чувствительность т-рекордера определяли методом сличения с опорным гидрофоном типа В&К8104. При измерениях в качестве излучателя использовали обратимый гидрофон ITC1001 на низких частотах, на высоких частотах — гидрофон ОП2 с диаметром активного элемента 20 мм. Пары излучатель — приёмник располагали в центре бассейна на глубине 3 м. Расстояние между излучателем и опорным гидрофоном составляло 0,5 м, между излучателем и т-рекордером — 2, 2 м. Угол падения звуковой волны изменяли от 0° до 180°, поворачивая m-рекордер с шагом 10° относительно его опорного направления вокруг вертикальной оси, проходящей через акустический центр гидрофона т-рекордера. Излучали ЛЧМ сигналы в двух частотных диапазонах: от 600 Гц до 20 кГц и от -2000 до 2000 Гц. В частотном диапазоне от -2000 до 2000 Гц применяли измерительную процедуру, описанную в [19]. Для повышения отношения сигнал/шум применяли когерентное накопление. Чтобы получить дополнительный выигрыш в отношении сигнал/шум при измерениях в диапазоне частот от -2000 до 2000 Гц, уменьшали скорость изменения частоты ЛЧМ сигнала. Скорость изменения частоты не оказывает влияния на отношение сигнал/шум для непосредственно измеряемой частотной зависимости, но с уменьшением скорости число отсчётов экспериментальной зависимости в частотном интервале усреднения по методу СКВУ увеличивается, повышая отношение сигнал/шум для частотной зависимости, получаемой в результате обработки по методу СКВУ. Этот приём не является универсальным, но в большинстве случаев даёт ощутимый эффект. Частотные зависимости тока в цепи излучателя измеряли, регистрируя падение напряжения на калиброванном низкоомном сопротивлении в цепи излучателя. Частотные параметры экспериментов выбрали так, чтобы обеспечить возможность сопоставления результатов в диапазоне перекрытия частотных зависимостей, полученных по методу СКВУ. В качестве частоты для представления объединённых результатов использовали среднюю частоту диапазона перекрытия.

Результаты экспериментов на низких частотах

Для удобства анализа результаты эксперимента представлены на двух рисунках. На рисунке 5 приведены частотные зависимости чувствительности m-рекордера на частотах ниже 3 кГц.



Рис. 5. Частотные зависимости чувствительности трекордера

Средняя частота диапазона перекрытия составляла 1450 Гц, что можно заметить по незначительным изломам экспериментальных кривых. Несовпадения частотных зависимостей на этой частоте составляют около 0,1 дБ, что можно считать подтверждением корректности применённой измерительной процедуры и стабильности работы измерительного стенда, включая координатное устройство. Полученные значения чувствительности плавно изменяются как при изменении частоты, так и при изменении угла падения звуковой волны, а расхождение частотных зависимостей носит закономерный характер и уменьшается с уменьшением частоты. Такое поведение частотных зависимостей типично для приёмников звука в воздухе: как правило, с уменьшением частоты влияние дифракционных эффектов уменьшается, что следует из общих законов акустики. На низких частотах эту закономерность можно использовать для экспертной оценки дифракции звука на корпусе рекордера. При этом экспертная оценка влияния дифракции будет количественной, поскольку опирается на количественные данные, полученные экспериментально вплоть до самых низких частот, на которых дифракционные эффекты пренебрежимо малы. Использование такой экспертной оценки позволяет определить частоту, ниже которой при установленной допустимой погрешности можно обоснованно использовать чувствительность гид-

62 Јидроакустические приборы и системы

рофона в качестве чувствительности рекордера. Оговоримся, что полученные результаты относятся только к влиянию на чувствительность рекордера дифракционных эффектов, которые исследовали в эксперименте. Эти результаты нельзя использовать для экспертной оценки акустической прозрачности, звукоизолирующих либо других акустических свойств материалов, использованных в конструкции рекордера. Получение таких количественных экспертных оценок требует своих экспериментов для каждой конструкции.

Поведение зависимостей, представленных на рис. 5, показывает, что дифракционные искажения имеют характер затухающих с уменьшением частоты осцилляций, заметных вплоть до частоты 250 Гц. Количественную оценку дифракционных искажений можно получить, используя размах осцилляций и величину расхождения частотных зависимостей. Расхождение зависимостей на частоте 3 кГц немногим превышает 2 дБ и уменьшается до 0,3 дБ на частоте 1 кГц. Зависимости сходятся к чувствительности гидрофона на частоте 250 Гц. Такое поведение зависимостей на низких частотах характерно для акустических приёмников с микрофоном, вынесенным из корпуса. На частотах ниже 150 Гц зависимости незначительно расходятся, что объясняется не возрастающим влиянием дифракции, а увеличением погрешности измерений в частотном интервале, примыкающем к нулю оси частот. Размах осцилляций на частотах ниже 1 кГц не превосходит 0,2 дБ.

На рисунках 6 и 7 представлены характеристики направленности m-peкордера, нормированные на значение чувствительности гидрофона на частоте 250 Гц. При приёме звука на частоте 600 Гц характеристика направленности имеет вид круговой: влияние дифракционных эффектов пренебрежимо мало вне зависимости от угла падения звуковой волны на m-peкордер. Характеристика направленности на частоте 1 кГц также близка к круговой, однако позволяет заметить незначительные: уменьшение чувствительности m-peкордера при боковом падении звука и увеличение при приёме звука с направления, противоположного опорному.



Рис. 6. Характеристики направленности т-рекордера

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)



Рис. 7. Характеристики направленности т-рекордера

Рассмотрение характеристик направленности на 1, 1,6 и 2,5 кГц позволяет проследить эволюцию дифракционных искажений. При углах падения звуковой волны 110°-150° глубина боковых провалов характеристик направленности увеличивается с частотой до 0,9 дБ, то есть на этих частотах дифракционные искажения соизмеримы с погрешностью калибровки гидрофона. Сравнение характеристик направленности на частотах 1,6 и 2,5 кГц позволяет проследить возникновение и развитие осцилляций характеристики направленности. Как и осцилляции частотной зависимости чувствительности, такое поведение характеристики направленности можно объяснить наличием одного или нескольких локализованных источников рассеяния звуковой волны [1]. Выявленное поведение осцилляций характеристик направленности т-рекордера весьма схоже с поведением осцилляций характеристик направленности шумомера [2]. Такое поведение свидетельствует о незначительном «затенении» звука корпусом — чувствительности m-peкордера при падении звуковой с опорного направления и направления, противоположного опорному, примерно одинаковы.

Благодаря применению разработанной измерительной процедуры появилась возможность следить за развитием дифракционных искажений, начиная с момента их зарождения на столь низких частотах, на которых до недавнего времени не выполняли калибровки по свободному полю не только рекордера, но и гидрофона. Эксцентриситет координатно-поворотных устройств, продолжительные переходные процессы и существенно худшее в сравнении с методом СКВУ разрешение по частоте при измерениях тонально-импульсным методом маскируют и не позволяют выявлять влияние дифракционных искажений на низких частотах. Кроме того, применение тонально-импульсного метода для измерения подробной зависимости чувствительности от частоты и угла падения звука наталкивается на неприемлемую трудоёмкость измерений. При этом продолжительность измерительного эксперимента

возрастает настолько, что условия эксперимента могут существенно измениться.

Наличие семейства квазинепрерывных частотных зависимостей позволяет заметить присутствие и количественно оценить влияние дифракционных искажений. Однако на таких низких частотах использование энергетической чувствительности в полосах частот не даёт сколь-нибудь заметного выигрыша и не позволяет исключить либо уменьшить влияние дифракции. Возможность такого уменьшения появляется на частотах существенно больших 10 кГц.

При измерении звука, излучаемого локализованным источником, нормируют неравномерность характеристики направленности гидрофона в двух угловых секторах: ±70° относительно вертикальной оси и ±22,5° относительно горизонтальной оси, выделенных различными цветами на рис. 6 и 7. Для представленных частот наибольшее изменение чувствительности т-рекордера в этих угловых секторах не превосходит 0,7 дБ, что удовлетворяет требованиям к приёмнику при измерениях шума корабля по классу А [3]. Если рассмотреть поведение чувствительности трекордера при всех направлениях падения звука (от 0° до 360°), то на частотах до 3 кГц включительно чувствительность т-рекордера отличается от чувствительности гидрофона не более чем на $\pm 1,2$ дБ. Совместный вклад зависимости дифракционных эффектов от частоты и угла падения звуковой волны немногим превосходит типичную погрешность калибровки измерительного гидрофона. Кроме вывода о том, что на частотах вплоть до 3 кГц в качестве чувствительности рекордера можно использовать значение чувствительности гидрофона, можно сделать вывод о возможности использования трекордера в диффузном звуковом поле, например для измерений окружающего шума [4, 5].

При измерениях окружающего шума правильным является использование чувствительности рекордера по диффузному полю, а не результатов калибровки гидрофона по свободному полю в соответствии с МЭК60565. Чтобы получить чувствительность по диффузному полю, не обязательно выполнять калибровку рекордера в диффузном звуковом поле. Можно воспользоваться расчётным методом, аналогичным используемому в воздушной акустике. По семейству подробных частотных зависимостей чувствительности рассчитать значения энергетической чувствительности в заданной 1/3-октавной полосе частот для различных углов падения звуковой волны [1]. Полученную зависимость усреднить по всем направлениям падения звука от 0° до 360° со взвешиванием либо без него. Поскольку на низких частотах энергетическая чувствительность m-рекордера и его чувствительность по свободному полю на средней частоте полосы частот практически совпадают, то при расчётах вместо энергетической чувствительности можно использовать чувствительность по свободному полю.

Результаты экспериментов на высоких частотах

Конструкция гидрофона достаточно хорошо отработана. На низких частотах характеристика направленности гидрофона практически круговая, а частотная характеристика — плоская. Слабая зависимость чувствительности гидрофона от частоты и угла падения звуковой волны означает возможность использовать на низких частотах чувствительность гидрофона, определённую в соответствии с МЭК60565 на частоте в опорном направлении, для измерений шума в полосах частот при любом направлении падения звуковой волны на гидрофон. Результаты исследований рекордера на низких частотах показали возможность при измерениях окружающего шума на частотах ниже 3 кГц использовать в качестве чувствительности рекордера чувствительность гидрофона.

На частотах выше 3 кГц поведение частотных зависимостей чувствительности m-рекордера резко меняется. На рисунке 8 приведены частотные зависимости во фронтальном секторе для углов падения звуковой волны от 0° до 70°. Неравномерность частотных зависимостей превышает 17 дБ, что ставит под сомнение саму возможность применять m-рекордер на этих частотах как средство измерений. Большая неравномерность характерна при падении волны с направлений, близких к фронтальному. С увеличением угла падения неравномерность частотных зависимостей чувствительности уменьшается и при углах 60° – 70° составляет примерно 4–5 дБ.



Рис. 8. Частотные зависимости чувствительности во фронтальном секторе углов падения звуковой волны

Такое поведение частотных зависимостей показывает наличие весьма значительного источника рассеяния, расстояние до которого составляет примерно 16 см, что можно оценить по периоду осцилляций с наибольшим размахом. Это соответствует расстоянию от активного элемента гидрофона

до ближней торцевой поверхности корпуса рекордера. Однако при углах падения волны 60° – 70° влияние этого источника уменьшается в несколько раз, что говорит об уменьшении эффективной площади рассеяния источника в точку приёма. Это наблюдение наталкивает на мысль, что акустические характеристики рекордера можно улучшить уменьшением эффективной площади рассеяния в точку приёма, изменив для этого соответствующим образом форму части корпуса рекордера, обращённую к гидрофону. Одновременно таким же образом необходимо изменять форму тыльного торца корпуса рекордера, поскольку, как было показано выше, «затенение» источника звука корпусом при падении звуковой волны с направления, противоположного фронтальному, незначительно.

На рисунке 9 показаны частотные зависимости чувствительности m-peкордера в боковом секторе углов. Рассмотрение частотных зависимостей показывает, что в боковом секторе от 60° до 120° неравномерность частотных зависимостей не превышает 4,5 дБ. При этом становятся хорошо заметными частые осцилляции, обусловленные удалённым от гидрофона источником.



Рис. 9. Частотные зависимости чувствительности в боковом секторе углов падения звуковой волны

На рисунке 10 приведены частотные зависимости чувствительности m-peкордера в тыльном секторе при углах падения звуковой волны 130°–180°. Размах осцилляций с увеличением угла падения звуковой волны возрастает почти до 23 дБ, однако при угле падения звуковой волны 180° частотная зависимость резко выравнивается. При этом если вблизи частот 4 кГц чувствительность при приёме волны с тыльного направления лишь немногим превышает чувствительность при фронтальном падении звуковой волны, то вблизи 10 кГц и частот других провалов фронтальной частотной характеристики это превышение достигает 7–8 дБ.



Рис. 10. Частотные зависимости чувствительности в тыльном секторе углов падения звуковой волны

Полученные зависимости дают целостную картину влияния корпуса на метрологические характеристики рекордера. Несмотря на сложный характер дифракции, эту картину удаётся наблюдать благодаря высокой детальности экспериментальных характеристик, качественному подавлению шумовой помехи вплоть до самых низких частот, точному угловому позиционированию рекордера. Частотные зависимости образуют семейство кривых, при рассмотрении которых можно обнаружить как наличие нескольких источников рассеяния на корпусе рекордера, так и изменение их влияния на ЧХ при изменении угла падения звуковой волны. Эти изменения удаётся проследить по плавному, явно подчиняющемуся закономерности, трансформированию ЧХ из одной в другую. Влияние дифракции осложняется эффектами, связанными с опережением звука, распространяющегося в воде, звуком, распространяющимся по корпусу рекордера, и затенением чувствительного элемента гидрофона корпусом рекордера. Как показали эксперименты, эффект опережения звука особенно заметен при падении звуковой волны с тыльного направления. Влияние затенения удобно проследить по эволюции характеристик направленности трекордера, представленных на рис. 11 для частот выше 3 кГц, с ростом частоты. На частоте 4,5 кГц влияние затенения проявляется в виде провалов, окружающих задний лепесток характеристики направленности. С нарастанием частоты форма заднего лепестка эволюционирует по сложному закону из плавного горба на частотах от 4,5 до 9,0 кГц в острый пик, окружённый глубокими провалами на частотах 11,5-18,5 кГц. Неравномерность характеристик направленности увеличивается с 4 дБ на 4,5 кГц до 18 дБ на 17,7 кГц.





Рис. 11. Характеристики направленности т-рекордера на частотах выше 3 кГц

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

В целом характеристики направленности настолько сложны, что при их рассмотрении затруднительно сделать какие-либо выводы, кроме вывода о невозможности использования m-рекордера для количественных измерений подводного шума как во фронтальном, так и в боковом угловых секторах.

Чтобы попытаться выявить какие-либо закономерности, для представленных на рис. 11 частот, которые принимали за центральные частоты частотных полос, получили угловые зависимости энергетической чувствительности в октавных и 1/3-октавных полосах частот. Их наложили на характеристики направленности для центральных частот. Оказалось, что с расширением полосы частот поведение характеристик направленности существенно не меняется, поэтому не удалось выявить каких-либо закономерностей. Характеристики направленности так же, как и частотные характеристики, сами по себе не дают наглядности, поскольку в зависимости от угла падения волны пространственное положение источников рассеяния меняется относительно точки приёма. Определение количества, расположения и силы источников по форме частотных характеристик и характеристик направленности весьма затруднено.

Разработанная процедура позволяет с высокой достоверностью определять метрологические характеристики гидроакустического приёмника, но в случае с m-рекордером она позволила с высоким качеством получить большое количество измерительной информации о чрезвычайно плохих метрологических характеристиках m-рекордера на частотах выше 3 кГц. Для неудачной конструкции гидроакустического приёмника высокая точность и достоверность результатов измерений характеристик могут быть использованы только для того, чтобы точно сказать насколько плох гидроакустический приёмник.

Локализация источников рассеяния на корпусе т-рекордера

В [1] описан приём, позволяющий определять положение источников рассеяния, формирующихся на калибруемом приёмнике, применяя сканирование по расстоянию до приёмника. В данной работе предложено использовать сканирование по углу и частоте для определения перемещений источников рассеяния в пространстве. Для этого было выполнено скользящее усреднение частотных зависимостей чувствительности в 1/3-октавной полосе частот. На рисунках 12–14 представлены усреднённые частотные зависимости чувствительности во фронтальном, боковом и тыльном угловых секторах. Усреднённые в 1/3-октавной полосе частот зависимости с ещё большей наглядностью демонстрируют «перетекание» осцилляций из одной характеристики в другую. Во фронтальном угловом секторе осцилляции усреднённых частотных зависимостей не возрастают с увеличением частоты в отличие от не усреднённых зависимостей. Этот эффект объясняется компенсацией увеличения рассеяния источником вследствие расширения полосы усредняемых частот.



Рис. 12. Частотные зависимости m-рекордера во фронтальном угловом секторе, усреднённые в 1/3-октавной частотной полосе



Рис. 13. Частотные зависимости m-рекордера в боковом угловом секторе, усреднённые в 1/3-октавной частотной полосе



Рис. 14. Частотные зависимости m-рекордера в тыльном угловом секторе, усреднённые в 1/3-октавной частотной полосе

Основное изменение зависимостей во фронтальном, боковом и тыльном угловых секторах — пропадание частых осцилляций, обусловленных рассеянием звука удалённым источником. Это означает, что усреднение привело к подавлению влияния рассеяния звука удалённым источником, и выявить перемещение этого источника по усреднённым зависимостям невозможно.

Для выявления положения и перемещения источников рассеяния в пространстве при изменении угла падения звуковой волны предложено использовать кепстральные характеристики рекордера, полученные преобразованием Фурье частотных характеристик. Произведение временной задержки на скорость звука *тс* равно разности хода прямой и отражённой волн в точку приёма. По разности хода, исходя из геометрических параметров эксперимента, можно оценить удалённость источника отражений от точки приёма.

Таким же образом по максимумам кепстра осцилляций частотной характеристики чувствительности можно судить об удалённости от точки приёма источника рассеяния звуковой волны, обусловившего эту осцилляцию частотной характеристики. А по семейству кепстральных характеристик можно отследить изменение удалённости источника рассеяния в зависимости от угла падения звуковой волны. Семейство кепстральных характеристик приведено на рис. 15 в трёхмерном изображении (разность хода прямой и рассеянной волн тс в см, угол падения волны, градации цвета — амплитуды). Переход от синего цвета через красный к жёлтому соответствует изменению амплитуды кепстра от минимума к максимуму.



Рис. 15. Траектории перемещения источников рассеяния (фронтальная и тыльная торцевые поверхности корпуса рекордера) при измерении характеристик направленности

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

72 Гидроакустические приборы и системы

В эксперименте при изменении угла падения звуковой волны излучателя *P* источники рассеяния R_1 и R_2 , расположенные в центрах торцевой и тыльной поверхностей m-рекордера, перемещаются вокруг точки приёма *H* (место расположения гидрофона) по круговым орбитам, как это изображено на рис. 16. При этом разности хода прямой и рассеянной источниками волн $r_{PR1H} = r_{PR1} + r_{R1H} - r_{PH}$ и $r_{PR2H} = r_{PR2} + r_{R2H} - r_{PH}$ изменяются, вызывая соответствующие изменения осцилляций частотной характеристики.

Кривыми 1 и 2 на рис. 15 показаны результаты расчёта зависимости разности хода прямой и рассеянной волн r_{PR1H} и r_{PR2H} при изменении угла падения звуковой волны излучателя от 0° до 180°. Этим кривым соответствуют траектории перемещения максимумов кепстра: на рис. 15а — для двух источников (не усреднённые частотные характеристики); на рис. 15б — для одного источника (усреднённые частотные характеристики).

Предложенный приём позволяет не только выявлять наличие, но и, исходя из геометрии эксперимента, определять траектории перемещения источников рассеяния. Наличие траектории многократно повышает надёжность обнаружения источников рассеяния, позволяет выделить среди них наиболее значимые и таким образом оценить эффективный размер и расстояние дальнего поля при калибровке приёмника. Возможность однозначного выделения источников рассеяния звуковой волны на корпусе рекордера позволяет описать влияние рассеяния с помощью упрощённой модели в виде конечного числа локализованных в пространстве точечных источников рассеяния, по аналогии с радиолокацией, блестящих точек [6]. Использование такой упрощённой модели позволяет определять эффективный размер рекордера при заданном угле падения волны по наибольшему расстоянию блестящей точки до прямой, проходящей через излучатель и точку приёма [15]. На рисунке 16 эти расстояния показаны для двух блестящих точек: R_1 — ближней к точке приёма и R_2 — удалённой от точки приёма.



Рис. 16. Изменение разности хода прямой и рассеянной волн при изменении угла падения звуковой волны

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

Улучшение акустических свойств рекордера

Предложенная измерительная процедура (ИП) позволила выполнить исследования акустических свойств m-рекордера весьма несовершенной конструкции. Представляет интерес использование ИП для измерения характеристик более совершенной конструкции гидроакустического приёмника с целью выяснения границ применимости ИП в бассейне заданных размеров. Для этого были выполнены работы по улучшению акустических свойств mрекордера.

Поскольку подробные ЧХ позволили не только определить удалённость доминирующих источников рассеяния, но и определить проблемные элементы конструкции корпуса m-рекордера, направлением работы стало ослабление влияния рассеяния на этих элементах и исследование их влияния с помощью разработанной ИП.

Традиционно в гидроакустике для ослабления рассеяния применяют материалы с акустическим импедансом, близким к волновому сопротивлению воды. Однако в воздушной акустике этот приём по понятным причинам не используется. Вместо согласования импедансов используют акустически обтекаемые формы шумомера и относят микрофон от корпуса. Если акустически обтекаемая форма позволяет уменьшить силу источника рассеяния, то увеличение расстояния между микрофоном и корпусом шумомера ослабляет не силу источника, а его влияние. Увеличение расстояния приводит к сокращению периода осцилляций, обусловленных рассеянием на корпусе. Разработанная ИП использует усреднение в частотном интервале, ширину которого определяют размеры используемого в эксперименте бассейна. Поэтому представляет интерес оценить влияние такого усреднения на получаемую ЧХ с тем, чтобы определить необходимость восстановления осцилляций для корректной оценки неравномерности ЧХ приёмника. Разработанная ИП допускает возможность восстановления осцилляций методом деконволюции.

Разработанная ИП позволяет выполнять измерения на низких частотах, где влияние рассеяния чрезвычайно мало. При этом уменьшение осцилляций с уменьшением частоты будет свидетельствовать о том, что причина осцилляций ЧХ — источник рассеяния, локализованный на корпусе приёмника, а не эффекты, связанные с механическим резонансом, вибрацией и т.п.

Возможность оценивать силу источника рассеяния и его удалённость от точки приёма в совокупности с возможностью получать подробные ЧХ позволяют рассчитать энергетическую чувствительность приёмника в полосе частот и оценить преимущества использования энергетической чувствительности в зависимости от характера рассеяния и угла падения звуковой волны.

Использование «акустически обтекаемой» формы корпуса

Принцип создания акустически обтекаемой формы, основанный на плавном уменьшении поперечного сечения в направлении точки приёма, был опробован в конструкции штанг для позиционирования преобразователей в установке ГЭТ 55-2011 [1]. Этот принцип согласуется с закономерностями, известными в том числе в радиолокации и воздушной акустике.

С целью получения акустически обтекаемой формы и обеспечения сопоставимости результатов на торцевые поверхности m-рекордера были установлены купола оживальной формы из тонкого пластика. В куполах имеются небольшие отверстия для заполнения водой. Внешний вид конструкции m-рекордера с куполами показан на рис. 17.



Рис. 17. Внешний вид т-рекордера с куполами

Частотные зависимости чувствительности при падении звуковой волны в угловом секторе от 0° до 70° представлены на рис. 18.



Рис. 18. Частотные характеристики чувствительности m-рекордера с куполами при изменении угла падения звуковой волны от 0° до 70°

Характер поведения зависимостей не претерпел принципиальных изменений в сравнении с т-рекордером без куполов. Частотные зависимости сходятся к чувствительности гидрофона на частотах ниже 1 кГц. Наибольший размах осцилляций частотных зависимостей — при фронтальном падении звуковой волны. При изменении угла падения звуковой волны частотные зависимости также образуют семейство кривых, плавно перетекающих из одной в другую. Вместе с тем неравномерность частотных зависимостей чувствительности рекордера уменьшилась с 18 до 7 дБ. Положение экстремумов осцилляций свидетельствует о том, что положения источников рассеяния практически не изменилось. Уменьшение размаха осцилляций показывает ослабление силы этих источников. Согласованность результатов, полученных при исследованиях т-рекордера с куполами и без них, подтверждает правильность предложенной измерительной процедуры. Поскольку в обоих экспериментах применяли усреднение в одинаковых частотных интервалах, расширение экстремумов зависимостей на рис. 18 в сравнении с экстремумами зависимостей на рис. 8 вызвано ослаблением рассеяния, а не усреднением.

На рисунке 19 приведены частотные зависимости чувствительности гидрофона m-рекордера при углах падения звуковой волны от 0° до 90°. Максимальное расхождение зависимостей, полученных в диапазоне частот измерений перед установкой гидрофона в m-рекордер, составляет 3,5 дБ, что соизмеримо с неравномерностью частотных зависимостей чувствительности на рис. 18. Таким образом, применением простейших средств удалось существенно ослабить рассеяние от корпуса m-рекордера и улучшить его акустические свойства.



Рис. 19. Частотные характеристики чувствительности гидрофона при изменении угла падения звуковой волны от 0° до 90°

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

Вместе с тем характер поведения частотных зависимостей, период и размах доминирующих осцилляций не позволяют использовать полученную конструкцию для измерения широкополосных сигналов и не дают возможности применить частотные коррекции при измерениях в полосах частот (например, в 1/3-октавных полосах).

Увеличение расстояния между гидрофоном и корпусом рекордера

Для уменьшения влияния рассеяния гидрофон установили на расстоянии 830 мм от фронтальной торцевой поверхности корпуса m-рекордера, сохранив купола. Внешний вид m-рекордера с отдалённым гидрофоном показан на рис. 20.



Рис. 20. Внешний вид т-рекордера с отдалённым гидрофоном

Как было упомянуто выше, этот приём используют в конструкции шумомера. Первые конструкции шумомера имели большие габариты, и чтобы исключить влияние корпуса, микрофон относили на достаточно большое расстояние, используя кабель. По мере совершенствования элементной базы габариты шумомера уменьшились и микрофон стали устанавливать на корпусе шумомера, как показано на рис. 21. При этом применяли меры по обеспечению акустической обтекаемости корпуса вблизи места расположения микрофона.



Рис. 21.

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

Частотная характеристика такого шумомера показана сплошной кривой на рис. 22. Обратим внимание на осцилляции ЧХ, возникающие на частотах выше 1 кГц. Эти осцилляции обусловлены рассеянием на заднем торце корпуса шумомера, не имеющем акустически обтекаемой формы.



Рис. 22.

Пунктирной кривой показана ЧХ шумомера при использовании осушителя ZF 0020, который крепится между микрофоном и предусилителем, что увеличивает расстояние между микрофоном и корпусом шумомера на 50 мм. Как видно по поведению пунктирной кривой, осцилляции ЧХ шумомера сохранились, но их период изменился обратно пропорционально расстоянию до заднего торца корпуса шумомера. Такое изменение свидетельствует о том, что источник, вызывающий осцилляции, расположен на заднем торце корпуса шумомера. Косвенное подтверждение этому можно получить, сопоставив характеристики направленности m-рекордера на рис. 11 и шумомера на рис. 23.



Рис. 23.

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

В обоих случаях диаграммы имеют характерный максимум при угле падения звуковой волны 180°, то есть в направлении, противоположном опорному. Для диаграммы направленности самого гидрофона, в отличие от рекордера и шумомера, на углах, соответствующих приёму с тыльного направления, характерно появление провала.

На рисунке 24 приведены ЧХ чувствительности при фронтальном падении звуковой волны: 1 — гидрофона; 2 — m-рекордера с куполами на корпусе и отдалённым гидрофоном.



Рис. 24. Частотные характеристики чувствительности при фронтальном падении звуковой волны: 1 — гидрофона; 2 — m-рекордера с отдалённым гидрофоном

На ЧХ т-рекордера хорошо заметны небольшие и частые осцилляции на частотах выше 5 кГц. Малый размах осцилляций позволяет наглядно и убедительно выполнить сравнение этих двух зависимостей.

Разработанная ИП позволила выявить осцилляции ЧХ, размах которых не превышает 1 дБ. Частотные зависимости практически совпадают на частотах ниже 5 кГц. При этом выявились недостатки ИП, которые в ранее рассмотренных экспериментах не оказывали существенного влияния на результаты. Увеличение расстояния между гидрофоном и корпусом приводит к двум последствиям: размах осцилляций частотной зависимости чувствительности уменьшается, а период осцилляций сокращается. Если период осцилляций становится сопоставимым с частотным интервалом усреднения, настраиваемого на подавление отражений от границ бассейна, усреднение дополнительно уменьшает размах осцилляций ЧХ относительно его действительного значения. Это уменьшение тем сильнее, чем дальше гидрофон отнесён от корпуса. В результате получают заниженную оценку размаха осцилляций ЧХ.

Применение деконволюции

Для усовершенствования ИП предложено дополнить её приёмом, позволяющим уменьшать искажения формы получаемой частотной зависимости путём коррекции характеристики пропускания пространственного фильтра, реализуемого обработкой по методу СКВУ.

При обработке по методу СКВУ характеристика пропускания пространственного фильтра формируется как произведение характеристик пропускания фильтров одиночных отражений. Характеристика пропускания фильтра одиночного отражения описывается функцией вида sin(x)/x [1]. Корректирующую функцию для фильтра *i*-го отражения, приходящего с задержкой τ_i относительно прямой волны излучателя, предложено строить на основе функции пропускания резонансного контура второго порядка:

$$A(\tau) = 1/\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\tau}{a\tau_i}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{\tau}{b\tau_i}\right)^2},$$

где a и b — безразмерные параметры, переменная τ имеет размерность времени.

Применение корректирующей функции такого вида проиллюстрировано на рис. 25. Кривой *1* изображена функция пропускания фильтра одиночного отражения, кривой *2* — корректирующая функция, кривой *3* — скорректированная функция пропускания.



Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

В подавляющем большинстве случаев размеры бассейна превышают размер калибруемого приёмника. При этом временная задержка первого отражения от стенок бассейна всегда много больше задержки отражения от элемента конструкции приёмника, наиболее удалённого от точки расположения гидрофона. В этой ситуации форма скорректированной характеристики пропускания на участке, примыкающем слева к положению ее первого нуля, не имеет практического значения. Параметры *a* и *b* подбирают так, чтобы поведение функции $A(\tau)$ было близким к поведению функции $[\sin(x)/x]^{-1}$ для $0 \le \tau \le 0,8 \tau_i$. При этом максимум корректирующей функции будет расположен левее первого нуля функции пропускания фильтра одиночного отражения. Это обеспечивает близкую к плоской вершину и крутой спад скорректированной функции пропускания.

Итоговую корректирующую функцию для n фильтров одиночных отражений получают как произведение n корректирующих функций. При использовании метода СКВУ обычно подавляют не более трёх отражений $(n \le 3)$. Обратим внимание, что значения параметров a и b не зависят от положения нуля корректируемой функции пропускания, поэтому в эксперименте они были общими для всех корректирующих функций. Исходя из практической целесообразности, критерием оптимальности при подборе параметров a и b служила минимальная неравномерность скорректированной итоговой функции пропускания в области задержек, меньших 2/3 задержки первого отражения. В описываемом эксперименте a = 0,805 и b = 2,672. На рисунке 26 приведены итоговая функция пропускания при подавлении трёх отражений обработкой по методу СКВУ — кривая 1, и скорректированная итоговая функция пропускания — кривая 2.



Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

Предложенная коррекция была опробована при калибровке m-рекордера с куполами и отдалённым гидрофоном в незаглушенном бассейне с размерами 6×6×10 м. Задержка времени прихода первого отражения от границ бассейна составляла 2,9 мс. Частотную зависимость чувствительности, полученную с использованием обработки по методу СКВУ, корректировали следующим образом. По задержкам отражений, подавленных обработкой по методу СКВУ, рассчитали функции коррекции фильтров одиночных отражений, по которым получили итоговую функцию коррекции. С помощью преобразования Фурье получили кепстр частотной зависимости, который умножили на итоговую корректирующую функцию. Искомую частотную зависимость получили обратным преобразованием Фурье скорректированного кепстра.

На рисунке 27 изображено преобразование Фурье (кепстр) ЧХ чувствительности трекордера, полученной в результате подавления первых трёх отражений от стенок бассейна (кривая *1*), и скорректированный кепстр произведение кепстра на итоговую корректирующую функцию (кривая 2).



Рис. 27. Исходный (кривая 1) и скорректированный (кривая 2) кепстры

На зависимостях выделяется пик, положение которого на оси абсцисс соответствует периоду осцилляции, а величина — размаху осцилляции частотной характеристики чувствительности трекордера. Осцилляция обусловлена рассеянием звука на обращённом к гидрофону торце корпуса трекордера. Задержка рассеянной волны составляет 1,17 мс, что соответствует разности хода 1,7 м (расстояние от гидрофона до торца корпуса — 830 мм, разность хода — 1,66 м). В результате обработки по методу СКВУ размах осцилляции оказался уменьшенным примерно в 2 раза (показано на рис. 26 пунктирными прямыми).

Для того, чтобы при калибровке точно учесть влияние корпуса m-peкордера, необходимо было восстановить размах осцилляций, уменьшенный обработкой по методу СКВУ.

На рисунке 28 кривой 1 изображена ЧХ чувствительности при фронтальном падении звуковой волны, полученная при калибровке рекордера в бассейне с использованием предложенной ИП. Кривой 2 изображена частотная характеристика с восстановленной осцилляцией. После применения описанной выше коррекции размах осцилляции увеличился примерно в 2 раза.



Рис. 28.

Точками 3, положение которых практически совпадает с кривой 2, показаны результаты, полученные тонально-импульсным методом. Различия кривых 1 и 2 достигают 0,5 дБ. Это означает, что при оценке инструментальной погрешности измерений УПШ с использованием кривой 1 составляющая, обусловленная осцилляцией ЧХ чувствительности, была бы занижена на 0,5 дБ. Это сравнимо с требованиями к общей неопределённости калибровки рекордера, предназначенного для измерений УПШ.

Калибровку гидрофонов по полю в бассейне выполняют на дискретных частотах 1/3-октавного ряда, используя тонально-импульсный метод измерений. В отличие от гидрофона, при калибровке рекордера необходимо получать подробные ЧХ, при этом трудоёмкость измерений тонально-импульсным методом многократно возрастает. Эта необходимость обусловлена несколькими причинами. По подробным ЧХ определяют «энергетическую» чувствительность приёмника в полосах частот, которую используют при измерениях УПШ. Для того, чтобы по размаху осцилляций оценить инструментальную погрешность, также требуется большое число измерений, поскольку необходимо выявить положения экстремумов ЧХ. Правильность измерений удаётся оценить только в конце эксперимента по форме полученной ЧХ.

Поясним это на примере эксперимента с трекордером. При измерениях тонально-импульсным методом на осциллограмме выходного напряжения приёмника выбирают участок, который используют для оценки амплитуды

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

напряжения. Обычно критерием выбора этого участка является установление выходного напряжения (неизменность амплитуды). В выполненном эксперименте с m-рекордером этот критерий требует существенного уточнения. На осциллограмме выходного напряжения присутствуют два участка установившегося напряжения. На первом участке, расположенном в пределах 1,17 мс от начала приёма, сигнал обусловлен только прямой волной излучателя. Амплитуда напряжения на этом участке содержит информацию о ЧХ собственно гидрофона. Второй участок расположен в пределах последней миллисекунды, предшествующей приходу волны, отражённой ближайшей стенкой бассейна. На этом участке на гидрофон падают прямая волна излучателя и волна, рассеянная корпусом рекордера. По амплитуде напряжения на этом участке можно оценить чувствительность рекордера. Этот участок использовали при контрольных измерениях.

Положение второго участка определяли не по осциллограмме принятого тонального импульса, а по кепстру частотной зависимости, измеренной с использованием ЛЧМ сигнала. Участок кепстра в интервале задержек от 1,5 до 2 мс дополнительно искажён рассеянием от тыльного торца рекордера, влияние которого также должно быть учтено. Таким образом, чтобы выбрать участок осциллограммы, пригодный для измерений тонально-импульсным методом, необходимо использовать кепстр частотной зависимости, для чего сначала нужно получить частотную зависимость, измеренную либо при непрерывном изменении частоты сигнала излучателя, либо при малых приращениях частоты.

При калибровке сложных объектов неопределённость, вносимая усреднением при использовании метода СКВУ, увеличивается. Примером такого объекта является рассмотренный в настоящей работе m-рекордер с отнесённым от корпуса гидрофоном. В ситуации, когда гидрофон настолько удалён от корпуса рекордера, что расстояние до отражающего звуковую волну элемента корпуса сопоставимо с расстоянием до отражающей стенки бассейна, требуется коррекция искажений, вносимых усреднением по методу СКВУ. Изложенный выше приём коррекции показал свою эффективность, что подтверждает хорошее совпадение с результатами, полученными тональноимпульсным методом.

Выводы по результатам экспериментов

При измерениях тонально-импульсным методом реализуют прямоугольное временное окно (пространственный фильтр с прямоугольной характеристикой пропускания). В этом смысле тонально-импульсный метод можно принять за эталонный метод измерений. Предложенный способ коррекции позволяет приблизить форму характеристики пропускания пространственного фильтра, реализуемого при обработке по методу СКВУ, к прямоугольной.

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

Это даёт возможность при калибровке таких сложных объектов как рекордер получать результаты близкие к результатам тонально-импульсного метода, обеспечивая измерения непрерывных частотных зависимостей вплоть до самых низких частот.

Для рутинных калибровок рекордера предпочтительно использовать ЛЧМ сигнал и предложенную ИП, включая изложенный выше способ коррекции ЧХ. Для проверки правильности выполненной коррекции целесообразно проводить измерения на контрольных частотах тонально-импульсным методом. При выборе контрольных частот следует опираться на поведение непрерывных частотных зависимостей, полученных с помощью предложенной ИП. Таким образом, при калибровке рекордера с вынесенным гидрофоном целесообразно использовать обе техники измерений, чтобы недостатки одной перекрыть преимуществами другой.

Целью экспериментов, выполненных с различными вариантами конструкции m-рекордера, было подтверждение достоверности и точности результатов, получаемых с применением предложенной ИП, обоснование возможности выявлять в условиях ограниченных габаритов и недостаточного звукопоглощения гидроакустического бассейна элементы конструкции, ухудшающие акустические свойства приёмника, а также возможности использовать для этих целей предложенную ИП. Возможность выполнять исследования в контролируемых лабораторных условиях на этапе компоновки образца позволяет оценить правильность основных технических решений, экономить средства и время на создание приёмника.

Важным преимуществом предложенной ИП является возможность выполнять калибровки на таких низких частотах, где влияние дифракции пренебрежимо мало. Это позволяет на низких частотах использовать чувствительность гидрофона в качестве опорной чувствительности при анализе результатов калибровок приёмника. Достоверность результатов, полученных с использованием предложенной ИП, подтверждают:

- близость на низких частотах ЧХ чувствительности приёмника при различных углах падения звуковой волны к ЧХ чувствительности гидрофона;
- возможность надёжного выделения положения источников рассеяния при различных углах падения звуковой волны (существенно изменяются как сила источника, так и время прихода рассеянной волны);
- уменьшение размаха и сохранение периода осцилляций при установке куполов на корпус m-рекордера;
- уменьшение размаха и периода осцилляций при увеличении расстояния между гидрофоном и корпусом m-рекордера;
- выполнение закона обратной пропорциональности между периодом осцилляций локализованного источника рассеяния и задержкой прихода рассеянной волны;

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

 совпадение результатов ИП с результатами, полученными тональноимпульсным методом.

Точность предложенной ИП подтверждают результаты восстановления осцилляций с малым размахом и близость формы ЧХ m-рекордера к форме ЧХ гидрофона.

Выполненные эксперименты позволяют сформулировать некоторые рекомендации по разработке и компоновке приёмника. Чтобы получить приемлемые акустические свойства приёмника, необходимо:

- максимально удалять от гидрофона все узлы, вызывающие рассеяние звука (уменьшается размах осцилляций, расстояние дальнего поля при приёме полосового сигнала также уменьшается);
- всем узлам, окружающим гидрофон, важно придать акустически обтекаемые формы, рассматривая рассеяние только в направлении точки приёма;
- при конструировании обтекателя отдавать предпочтение не его акустической прозрачности, а обеспечению минимального рассеяния;
- при создании образца выполнять исследования его акустических свойств с использованием разработанной ИП;
- при исследованиях образцов с гидрофоном, отдалённым от контейнера с аппаратурой, предусматривать коррекцию ЧХ, подобную предложенной.

Чувствительность при измерениях подводного шума

Для разных целей измерений в воздушной акустике стандартизованы требования к приёмнику звука, методики измерений, методы калибровки приёмника и использование данных калибровки. Например, для измерений в заглушенной камере используют микрофон, откалиброванный по свободному полю. Для измерений окружающего шума используют микрофон, откалиброванный по диффузному полю.

Возросшее внимание к экологии моря привело к необходимости измерять окружающий шум в океане. При измерениях окружающего шума мощность принимаемого звукового сигнала распределена по частоте, а преимущественное направление приёма отсутствует. Для таких измерений при калибровке приёмника вместо чувствительности, определённой в соответствии с МЭК 60565, необходимо определять чувствительность приёмника по диффузному полю.

Чувствительность по МЭК 60565 — это чувствительность на частоте при падении на гидрофон с опорного направления плоской звуковой волны, распространяющейся в свободном поле. Чувствительность по диффузному полю — это энергетическая чувствительность в полосе частот при падении на приёмник звуковой волны со всех направлений.

Гидроакустические приборы и системы 86

Для измерительного гидрофона характерны малая неравномерность характеристики направленности и частотной характеристики чувствительности. Именно на эти свойства измерительного гидрофона опираются стандарты на измерения шума корабля, устанавливая в качестве одного из основных требований к гидрофону требование его ненаправленности (omni-directional hydrophone) [3, 7, 8]. Ненаправленный гидрофон идеально подходит и для измерений окружающего шума, поскольку значения чувствительности гидрофона по свободному и диффузному полю численно совпадают или очень близки. Если при измерениях шума локализованного источника (корабля) свойство ненаправленности приёмника весьма желательно, потому что позволяет упростить процедуру измерений, то при измерении окружающего шума ненаправленность приёмника — обязательное требование. На примере приёмника, использованного для измерения окружающего шума в море, покажем, к чему приводит игнорирование этого требования [9, 10].

На рисунке 29 изображены с шагом 1/6 октавы: ЧХ гидрофона, который затем установили в приёмник (кривая 1), и ЧХ приёмника (кривая 2). Частотная характеристика гидрофона слабо зависит от частоты и близка к плоской на частотах ниже 40 кГц. Частотная характеристика приёмника изрезана осцилляциями, вызванными рассеянием звуковой волны конструкцией приёмника. Размах осцилляций достигает 8,5 дБ и не уменьшается с частотой. Кривой 3 на рис. 29 изображена ЧХ чувствительности приёмника в 1/3-октавных полосах частот. Кривая 3 не имеет резких изменений на высоких частотах, которые сглажены усреднением в широких частотных полосах. Осцилляции на низких частотах обусловлены уменьшением частотного интервала усреднения (ширины 1/3-октавной полосы).



Частотные характеристики чувствительности

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

Использование результатов калибровки в 1/3-октавных полосах частот привело к неожиданному результату при измерениях окружающего шума в море. На рисунке 30 представлены 1/3-октавные уровни подводного шума: кривой 1 — измеренные гидрофоном, откалиброванным по МЭК 60565; кривой 2 — измеренные приёмником, откалиброванным в 1/3-октавных частотных полосах.



Различия кривых 1 и 2 на частотах выше 6,3 кГц не превышают 1,5 дБ, что можно считать приемлемым при существующих нормах на измерения подводного шума. На частотах ниже 6,3 кГц различия возрастают до 4,5 дБ, причём поведение кривой 2 повторяет осцилляции частотной характеристики приёмника (см. рис. 29). Использование чувствительности в 1/3-октавных частотных полосах не привело к повышению точности измерений на низких

Полученный результат объясняется двумя обстоятельствами. Первое заключается в самой формулировке определения чувствительности по свободному полю, применимой только для приёма узкополосного сигнала с выделенного направления. В отличие от гидрофона, для приёмника нельзя пренебрегать ограничениями, которые накладывает понятие чувствительности по свободному полю. Однако, выполнив калибровку приёмника по свободному полю в 1/3-октавных частотных полосах, удалось «правильно» учесть неидеальность приёмника. В итоге получили значения чувствительности, подходящие для измерения шума.

Отметим, что пользоваться результатами такой калибровки корректно лишь при приёме шума с опорного направления, поскольку они применимы

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

частотах.

только для выделенного (опорного) направления приёма. В этом заключается второе обстоятельство — результаты калибровки использовали не при измерениях шума с опорного направления, а при измерении окружающего шума при отсутствии преимущественного направления падения звуковой волны на приёмник.

При исследованиях приёмника было установлено, что наибольшее влияние рассеянной звуковой волны проявляется при падении звуковой волны с опорного направления и является причиной значительных провалов и выбросов на характеристике направленности (XH) приёмника в опорном направлении на частотах экстремумов ЧХ. Подобные искажения XH типичны для приёмников симметричной формы, имеющих локализованный источник рассеяния, например, рекордер. И у рекордера, и у исследованного приёмника осцилляции ЧХ при фронтальном падении звуковой волны превышают осцилляции при боковом падении и вносят основной вклад в неравномерность XH.

Следствием калибровки в 1/3-октавных полосах частот стало уменьшение неравномерности ХН на высоких частотах (большая ширина 1/3-октавной полосы). На низких частотах (малая ширина 1/3-октавной полосы) этого не произошло, и направленные свойства приёмника проявились в результатах измерений спектра окружающего шума.

На рисунке 30 отдельными точками (ряд 3) показаны уровни шума, рассчитанные с использованием чувствительности приёмника, полученной как среднее значение чувствительности при изменении угла падения звуковой волны от 0° до 360° (аналог чувствительности по диффузному полю). Полученную чувствительность будем называть круговой энергетической чувствительностью. Использование такой чувствительности уменьшило расхождения в результатах измерений окружающего шума на низких частотах.

Процедуру калибровки приёмника для измерений окружающего шума целесообразно усовершенствовать таким образом, чтобы избавиться от влияния на чувствительность направленности приёмника: требование «калибровка в 1/3-октавных полосах частот» необходимо дополнить требованием «калибровка по диффузному полю». Это не исключает калибровки этого же самого приёмника по свободному полю. В воздушной акустике стандартизовано измерение трёх ЧХ чувствительности у одного микрофона: по свободному полю, по давлению и по диффузному полю.

Выполнить калибровку гидроакустического приёмника по диффузному полю в бассейне аналогично тому, как это делают в воздушной акустике, не удаётся, поскольку по качеству диффузного поля незаглушенный бассейн значительно уступает реверберационной камере [11, 12]. Решение может быть основано на использовании квазинепрерывных ЧХ приёмника по свободному полю [13, 19].

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

Предложенная процедура измерений позволяет в условиях лабораторного бассейна получать квазинепрерывные ЧХ приёмника по свободному полю вплоть до самых низких частот, на которых направленностью приёмника можно пренебречь. При этом появляется возможность, как в воздушной акустике, выполнять калибровку приёмника по диффузному полю расчётным методом. Частотные характеристики по свободному полю микрофона получают в безэховой камере. Ситуация с калибровкой гидроакустического приёмника отличается тем, что, излучая полосовой сигнал, в лабораторном бассейне создают реверберационное звуковое поле. В реверберационном поле выполняют точные калибровки частотных зависимостей чувствительности по свободному полю при различных углах падения звуковой волны, результаты которых используют для вычисления круговой энергетической чувствительности.

Метод вычисления чувствительности шумомера по диффузному полю по взвешенным значениям чувствительности по свободному полю для различных направлений падения звуковой волны стандартизован в воздушной акустике. Представляется целесообразным выполнить соответствующие исследования с различными типами гидроакустических приёмников, чтобы разработать единый подход к вычислению чувствительности приёмника по диффузному полю в 1/3-октавных частотных полосах. Решение этой задачи, включая формулировку определения чувствительности приёмника, в рамках мониторинга акустического загрязнения моря потребует общих усилий, поскольку выходит за рамки возможностей одной лаборатории.

Основное применение рекордера — измерение окружающего шума. В то же время стандарт ISO/DIS 17208-2:2017 рекомендует использовать вместо гидрофонов автономные рекордеры, как наиболее экономичный способ построения схем развёртывания приёмников при измерениях шума судна.

Рассмотрим особенности калибровки рекордера для использования в таких измерительных системах. Стандарты на измерения шума судна предписывают измерения уровня шума в 1/3-октавных полосах частот. Поскольку ЧХ чувствительности рекордера существенно отличается от равномерной ЧХ гидрофона, из этого требования вытекает необходимость использования энергетической чувствительности рекордера в соответствующих полосах частот, а не на центральных частотах 1/3-октавных фильтров, как это делают для гидрофона. Измерения выполняют, обеспечивая фиксированную ориентацию приёмника в пространстве. При проходе судна испытательным курсом (*test course*) угловой сектор измерений составляет от $\pm 30^{\circ}$ [3, 8] (см. рис. 31) до $\pm 45^{\circ}$ [7] (см. рис. 32). Приёмники располагают на разных глубинах, как это показано на рис. 33, при этом для разных приёмников угловые сектора различаются.



Starboard Approach Test Course





Рис. 32. Угловой сектор измерений при акустических испытаниях судна (Rule Note NR 614 «Underwater Radiated Noise (URN)»)



Figure 1 - Grades A and B hydrophone geometry.

Рис. 33. Геометрия развёртывания приёмников при испытаниях судна (ANSI S12.64-2009 и ISO/DIS 17208-2:2017)

Требование ненаправленности приёмника при неопределённости измерений шума судна 4,0 дБ в мелкой воде и 3,5 дБ в глубокой воде [7] и допуске на неопределённость калибровки гидрофона 2 дБ означает, что при отсутствии других источников неопределённости неравномерность ХН приёмника должна быть меньше 3 дБ. Аналогичные требования к направленности приёмника и в других стандартах на измерения шума корабля [3, 8]. Очевидно, что выполнить такие требования к направленности рекордера весьма затруднительно. Гидрофон приходится удалять на большое расстояние от корпуса рекордера, что существенно усложняет конструкцию системы позиционирования приёмника.

Более практичным представляется подход, основанный на использовании секторальной энергетической чувствительности. Энергетическая чувствительность в полосе частот определена в [1] как среднее квадратическое значение ЧХ чувствительности приёмника в номинальной полосе частот фильтра. Секторальной энергетической чувствительностью приёмника в полосе частот будет среднее квадратическое значение энергетической чувствительности в полосе частот в угловом секторе измерений. При этом подразумевают угловой сектор, расположенный в наклонной плоскости, проходящей через акустический центр приёмника и номинальную траекторию перемещения акустического центра корабля. Таким образом, однотипными вычислениями, используя более полные данные лабораторной модели приёмника, получают частные динамические характеристики, важные для практических применений: секторальную и круговую энергетические чувствительности.

Предложенная секторальная энергетическая чувствительность наиболее полно учитывает особенности измерений шума корабля по классам В и С стандартов [3, 8]. При измерениях по классам В и С напряжение приёмника усредняют в едином временном окне данных, длительность, начало и окончание которого точно соответствуют проходу корабля в угловом секторе измерений. Поскольку в этом случае результат усреднения напряжения в полосе частот в угловом секторе измерений будет представлен одним числом, то и чувствительность приёмника должна быть охарактеризована одним числом, наиболее адекватным измерительной ситуации.

Такой способ учёта характеристики направленности рекордера можно также использовать при измерениях, когда временное окно данных делят на короткие выборки, для каждой из которых выполняют коррекцию на изменение расстояния между акустическими центрами корабля и приёмника — измерения по стандарту [7] и по классу А в [3, 8].

В зависимости от способа крепления рекордера значения секторальной чувствительности следует определять во фронтальном или боковом угловых секторах. Однако если крепление допускает изменение ориентации приёмника в процессе измерений, то вместо требования к допустимой неравномерности XH приёмника появляется требование к неравномерности секторальной XH приёмника, выполнить которое значительно проще.

На рисунке 34 изображены XH m-рекордера с гидрофоном, отнесённым от корпуса на 830 мм: кривыми 1 - в 1/3-октавных полосах с центральными частотами 6,3, 10, 12,5 и 16 кГц; кривыми 2 и 3 - в энергетические чувствительности для этих частотных полос в угловых секторах $\pm 45^{\circ}$ и от 45° до 135°, соответствующих стандартизованным методикам измерений.

Характеристику направленности в 1/3-октавной полосе частот получали как двадцать десятичных логарифмов отношения значений энергетической чувствительности приёмника в полосе частот при изменении угла падения звуковой волны φ_i от 0° до 360° к значению энергетической чувствительности приёмника в полосе частот при звуковой волны с опорного направления $\varphi_{on} = 0^\circ$:

$$20 \log_{10}(M_H(f_0, \varphi_i, \Delta f) / M_H(f_0, \varphi_{\text{on}}, \Delta f)).$$

Энергетическую чувствительность в полосе частот при угле падения звуковой волны ϕ_i получали по формуле [1]:

$$M_H(f_0, \varphi_i, \Delta f) = \sqrt{\frac{1}{\Delta f} \int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} M_H^2(f, \varphi_i) df},$$

где $M_H(f, \varphi_i)$ — частотная характеристика чувствительности приёмника, измеренная при угле падения звуковой волны, φ_i ; f_0 — центральная частота 1/3-октавной полосы частот; Δf — номинальная ширина 1/3-октавной полосы частот.

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)



Рис. 34.

Энергетическую чувствительность в полосе частот в угловом секторе $\Delta \varphi$, заданном начальным φ_1 и конечным φ_n значениями углов падения звуковой волны на приёмник, получают как среднее квадратическое значение чувствительностей приёмника в полосе частот при изменении угла падения звуковой волны от φ_1 до φ_n :

$$M_H(f_0,\Delta\phi,\Delta f) = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n M_H^2(f_0,\phi_i,\Delta f)}.$$

На рисунке 34 секторальные энергетические чувствительности представлены в децибелах:

$$20 \log_{10}(M_H(f_0, \Delta \varphi, \Delta f) / M_H(f_0, \varphi_{\text{OII}}, \Delta f)).$$

Несмотря на принятые меры по уменьшению рассеяния, неравномерность XH, полученных усреднением чувствительности в 1/3-октавных полосах частот, достигает 2,8 дБ при углах падения звуковой волны от –135° до +135°. При такой неравномерности XH суммарная неопределённость результатов измерений может выйти за пределы, установленные в стандартах. При ис-

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

пользовании секторальной чувствительности составляющая неопределённости, обусловленная направленностью приёмника, не превысит 1,2 дБ. При этом неравномерность секторальной ХН приёмника будет находиться в пределах долей децибела.

Круговую энергетическую чувствительность приёмника $M_H(f_0, \Delta f)$ вычисляют по формуле для секторальной чувствительности при изменении угла падения звуковой волны от 0° до 360°.

При построении характеристик, представленных на рис. 34, использовали ЧХ m-рекордера в горизонтальной плоскости, то есть при получении секторальной энергетической чувствительности не учитывали глубину погружения приёмника. Очевидно, что при калибровке приёмника для измерений шума судна должен быть учтён угол наклона прямой, проходящей через акустические центры приёмника и судна, как показано на рис. 33.

Проблемы валидации рекордера

Для решения проблем, связанных с шумовым загрязнением морской среды, были разработаны международные стандарты, устанавливающие методы измерения шума, излучаемого в воду коммерческим судном [3, 7, 8], морским копром [20], разрабатываются стандарты по измерению шума для целей мониторинга морской акватории [21]. С появлением первых, не вполне совершенных международных стандартов обозначилась необходимость метрологического обеспечения средств измерений, используемых для реализации установленных стандартами методов измерений. Несмотря на существование стройной системы метрологического обеспечения гидроакустических измерений в нашей стране, сложившаяся ситуация вынуждает гармонизировать требования к средствам измерений, требования к номенклатуре метрологических характеристик средств измерений и методам их калибровки с требованиями международных стандартов. Одним из недостатков упомянутых стандартов является идеализированная модель измерений с использованием ненаправленного приёмника, который калибруют в соответствии с МЭК 60565. Однако МЭК 60565 устанавливает методы получения чувствительности в свободном поле бегущей плоской звуковой волны гидрофона, предназначенного для приёма звука с определённого направления и на определённой частоте. Гидрофон с таким образом полученной чувствительностью удобно применять при лабораторных и эталонных измерениях с использованием гармонических сигналов. Вместе с тем при измерениях уровней подводного шума использование чувствительности по свободному полю становится некорректным, поскольку измеряют не гармонический сигнал на определённой частоте, а сигнал, мощность которого распределена в полосе частот, принимают сигнал не с выделенного направления, а в условиях, когда направление приёма изменяется в широком угловом секторе

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

либо в условиях отсутствия преимущественного направления падения звуковой волны. При этом приёмник нельзя считать ненаправленным, а ЧХ чувствительности приёмника может быть существенно неравномерной в полосе частот измерений.

Прямое применение МЭК 60565 для калибровки приёмника для измерения подводного шума не позволяет получить чувствительность, адекватную условиям измерений, и приводит к необоснованно завышенной оценке неопределённости результатов измерений. Исходя из опыта измерений шума, в воздушной акустике необходимо расширить и стандартизовать номенклатуру характеристик гидроакустического приёмника. При выполнении стандартизованных измерений шума коммерческого судна предложено использовать энергетическую чувствительность приёмника в угловых секторах измерений, которая позволяет адекватно учесть направленные свойства приёмника и избежать завышенной оценки неопределённости результатов измерений. При измерениях окружающего подводного шума для целей мониторинга морской среды предложено использовать круговую энергетическую чувствительность. Следует ожидать, что использование чувствительности приёмника, полученной применительно к решаемой задаче измерений, поможет существенно повысить как достоверность, так и точность результатов измерений подводного шума.

В рамках обеспечения единства измерений при отсутствии эталона измеряемой величины (подводного шума) термин «правильность (trueness)» означает степень близости среднего значения, полученного на основании большой серии результатов измерений, к принятому опорному значению. При этом выстраивается цепочка понятий: правильность — опорное значение — валидация — верификация, которые обеспечивают связь требований, устанавливаемых к приёмнику и методам его калибровки, с предполагаемым использованием приёмника.

И при лабораторных измерениях, и при измерениях шума в море измеряемой величиной является звуковое давление. Однако смысловая нагрузка термина «звуковое давление» и набор параметров, которыми характеризуют звуковое давление в зависимости от цели измерений, совершенно различны. В силу неидеальности приёмника решение задач валидации требует использовать разные наборы характеристик приёмника для разных задач измерения. Следовательно, выполнять калибровку приёмника, предназначенного для измерений подводного шума, нужно либо применительно к измерениям шума локализованного источника (неподвижного или перемещающегося), либо к измерениям окружающего шума, либо, как это делают в воздушной акустике, получать и использовать для одного и того же приёмника набор значений чувствительности, каждое для своей измерительной задачи. Примерами этого являются предложенные секторальная и круговая энергетические чувствительности.

Если обратиться к полученной в НФЛ частотной характеристике рекордера AURAL M2, то в 1/3-октавной полосе 40 кГц размах осцилляций, обусловленный рассеянием фронтальной поверхностью корпуса рекордера, можно оценить в 17 дБ. Это соответствует рассеивающей способности 85% и погрешности измерения УПШ в этой полосе частот 17 дБ. Период осцилляции составляет примерно 8 кГц, что соответствует удалённости блестящей точки (фронтальной поверхности) от гидрофона примерно на 20 см. Ширина 1/3-октавной полосы с центральной частотой 40 кГц составляет примерно 9,1 кГц. При таком соотношении между шириной полосы измерений и удалённостью блестящей точки блестящая точка выпадает из области приёма. При измерениях УПШ в 1/3-октавной полосе частот частоты 40 кГц влияние корреляционной компоненты блестящей точки, удалённой от гидрофона на 20 см, на результат измерений будет ослаблено не менее чем в 5 раз. Результатом такого ослабления будет уменьшение погрешности измерения УПШ с 17 до 1,6 дБ. Сказанное справедливо, если при калибровке вместо чувствительности на гармоническом сигнале определяли чувствительность в 1/3-октавной полосе частот. На рисунке видна попытка получить оценку такой чувствительности энергетическим усреднением результатов, полученных при калибровке рекордера на гармонических сигналах, показано пунктирной кривой синего цвета.

Приведённый пример показывает, что даже для конструкций с большим рассеянием за счёт «правильной» калибровки удаётся получать значительный выигрыш в точности измерений.

В свою очередь, уменьшение «акустического» размера означает сокращение зоны ближнего поля при приёме полосовых сигналов в сравнении с приёмом гармонических сигналов.

Расстояние дальнего поля

На рисунках 35–38 кривыми 1 представлены частотные зависимости чувствительности m-рекордера с куполами и гидрофоном, отдалённым от корпуса на 830 мм, при угле падения звуковой волны 0°, 30°, 60° и 90°, полученные при расстоянии 3 м между излучателем и гидрофоном m-рекордера. При разных углах падения осцилляции зависимостей различаются по своему периоду. Наименьший период (примерно 900 Гц) имеют осцилляции при фронтальном падении звуковой волны и наибольший (примерно 1700 Гц) при боковом, что хорошо согласуется с моделью рекордера, рассмотренной ранее.

Период осцилляций зависимостей определяется разностью хода прямой и рассеянной корпусом m-рекордера звуковых волн и не зависит от частоты. Поэтому в полосе пропускания 1/3-октавного фильтра будет укладываться от доли периода осцилляции на частоте 3 кГц до нескольких периодов осцилляций на частоте 16 кГц.

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)











Рис. 37.

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)



Рис. 38.

Кривыми 2 изображены ЧХ чувствительности m-рекордера в 1/3-октавной полосе частот, полученные скользящим энергетическим усреднением в полосе частот кривых 1. Следует иметь в виду, что при рассмотрении зависимостей, представленных кривыми 2, значения на оси абсцисс имеют смысл центральной частоты 1/3-октавной полосы частот Δf , а ширина полосы частот увеличивается пропорционально центральной частоте. Для вычисления Δf использовали приближенное соотношение для ширины стандартной 1/3-октавной полосы частот:

$$\Delta f = f_0 \left(a_{1/3} - \frac{1}{a_{1/3}} \right),$$

где $a_{1/3} = 1,12$. В качестве пределов интегрирования в формуле (7) применяли значения нижней f_{\min} и верхней f_{\max} частот полосы, которые получали по формулам:

$$f_{\min} = f_0 \frac{1}{a_{1/n}} = 0,89f_0, \qquad f_{\max} = f_0 a_{1/n} = 1,12f_0.$$

Кривые 2 повторяют соответствующие ЧХ энергетической чувствительности гидрофона (не показаны на рис. 35–38) с точностью до десятых долей децибела (в частотном диапазоне эксперимента максимальное расхождение не превысило 0,5 дБ). Если считать гидрофон в составе m-рекордера точечным приёмником, то из близости ЧХ энергетических чувствительностей m-рекордера и гидрофона следует, что усреднением в 1/3-октавной полосе удалось подавить вызванные рассеянием осцилляции ЧХ и тем самым исключить влияние источников рассеяния.

При фронтальном падении волны размер т-рекордера определяется диаметром его цилиндрического корпуса, и при расстоянии 3 м до излучателя

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

на рекордер падает локально плоская волна (критерий расстояния дальнего поля d^2/λ выполнен вплоть до частоты 20 000 Гц). То есть, с точки зрения МЭК 60565, ЧХ чувствительности, представленная кривой 1 на рис. 35, измерена абсолютно корректно. Однако с точки зрения задачи измерений шума судна в 1/3-октавной полосе частот, полученная ЧХ не имеет практического смысла. На частотах выше 5 кГц возникает проблема — в какой частотной точке выбрать значение чувствительности, которое следует подставить в формулу вычисления звукового давления в полосе частот.

При боковом падении волны размер m-рекордера определяется расстоянием 830 мм между гидрофоном и доминирующим источником рассеяния на корпусе m-рекордера. Очевидно, что расстояние 3 м между излучателем и m-рекордером не удовлетворяет критерию дальнего поля, начиная с частоты 1 кГц. С точки зрения требований МЭК 60565, начиная с частоты 1 кГц, частотная зависимость, представленная кривой 1 на рис. 67, не может рассматриваться как ЧХ чувствительности m-рекордера, поскольку измерена в ближнем поле.

Как было упомянуто выше, чувствительность по МЭК 60565 — это чувствительность лабораторного гидрофона, предназначенного для воспроизведения и передачи единицы звукового давления на частоте. Для измерения шума в полосе частот более адекватной является энергетическая чувствительность в полосе частот. Другим преимуществом энергетической чувствительности является то, что её использование изменяет критерий дальнего поля при калибровке приёмника.

Для пояснения этого обратимся к изображённым на рис. 39 частотным зависимостям т-рекордера с куполами и гидрофоном, расположенным вблизи корпуса (см. рис. 17). Частотные зависимости получены при боковом падении звуковой волны на т-рекордер, который устанавливали на расстояниях 0,6 м (кривая 2) и 3 м (кривая 1) от излучателя. Для наглядности кривая 2 изображена смещённой вниз на 1 дБ. Поведение кривых определяют «частые» осцилляции (с коротким периодом) и «медленные» осцилляции (с длинным периодом), обусловленные рассеянием от удалённого (тыльный торец корпуса т-рекордера) и ближнего (передний торец) к гидрофону источников рассеяния. Сравнение кривых позволяет установить, что на частотах выше 10 кГц фазы «частых» осцилляций противоположны. В то же время при увеличении расстояния между излучателем и m-рекордером в пять раз размах «частых» осцилляций изменился незначительно. Изменения фазы «медленных» осцилляций становятся заметны только на частотах выше 16 кГц. Это означает, что ближний к гидрофону источник рассеяния не нарушает критерий дальнего поля на частотах ниже 16 кГц, тогда как удалённый источник начинает нарушать критерий дальнего поля на вдвое меньших частотах.



Рис. 39.

Зависимости, представленные на рис. 39 пунктирными кривыми, получены комплексным скользящим усреднением кривых 1 и 2 в частотном интервале, равном периоду «частых» осцилляций. Поведение кривых («частые» осцилляции отсутствуют) показывает частотную зависимость чувствительности m-рекордера при отсутствии удалённого источника, то есть зависимость, для которой выполнен критерий дальнего поля вплоть до частоты 16 кГц. Различие фаз «частых» осцилляций не оказало существенного влияния на результат усреднения частотных зависимостей. Это означает возможность при измерениях частотной зависимости, подвергаемой впоследствии усреднению в полосе частот, удовлетворять критерию дальнего поля при значительно меньших расстояниях между излучателем и приёмником.

Типичное применение обработки комплексным скользящим усреднением — исключить в измеренной частотной зависимости искажения, обусловленные отражением звука от границ бассейна. В данной ситуации применение комплексного скользящего усреднения можно рассматривать как математическое построение, направленное на решение другой задачи — определение ширины полосы частот, усреднение в которой приводит к подавлению влияния источника рассеяния на корпусе приёмника. Если применением СКВУ удаётся подавить влияние источника, то это означает, что при измерении энергетической ЧХ чувствительности приёмника для всех 1/3-октавных частотных полос, ширина которых равна или больше ширины частотного интервала усреднения СКВУ, эффективный размер приёмника уменьшается, и критерий дальнего поля будет выполнен [1]. Если использование одного интервала усреднения не приводит к достаточному подавлению осцилляций, необходимо использовать другие интервалы, стараясь подавить влияние других источников, тем самым обнаружив их и локализовав. В этом случае ширину 1/3-октавной полосы частот (начиная с которой критерий дальнего

поля выполняется) выбирают, исходя из наибольшей ширины частотного интервала усреднения, соответствующей источнику, локализованному наиболее близко к гидрофону. Возможна ситуация, когда ширина частотного интервала усреднения будет соответствовать 1/3-октавному фильтру, выпадающему из частотного диапазона измерений, то есть конструкция приёмника не позволяет воспользоваться эффектом уменьшения расстояния дальнего поля при его калибровке в 1/3-октавных полосах частот.

Помимо остаточного влияния корреляционной компоненты — знакопеременных остаточных искажений ЧХ чувствительности в 1/3-октавных полосах частот, ширина которых не равна либо не кратна периоду осцилляций, при большом размахе осцилляции следует иметь в виду смещения ЧХ чувствительности в полосе частот вследствие возникновения энергетической компоненты [1].

Чтобы обеспечить критерий расстояния дальнего поля при калибровке на гармоническом сигнале (частоте), габариты приёмника стремятся уменьшить. При наличии значимых источников рассеяния это приводит к тому, что все источники будут расположены слишком близко к гидрофону, чтобы воспользоваться эффектом уменьшения расстояния дальнего поля при калибровке в 1/3-октавных полосах частот.

Однако если поступить противоположным образом, то есть увеличить размеры приёмника, отодвинув гидрофон от источников рассеяния на значительное расстояние, ситуацию с расстоянием дальнего поля при калибровке приёмника в полосах частот можно кардинально изменить. Расстояние дальнего поля определяют исходя из соотношения размера приёмника и длины звуковой волны. Для гармонического сигнала размер приёмника не зависит от частоты, поэтому при калибровке на частоте увеличение расстояния между гидрофоном и источником рассеяния (увеличение размера приёмника) приводит к увеличению расстояния дальнего поля. При калибровке в полосах частот возникает противоположный эффект — с увеличением расстояния до источника рассеяния период вызванных рассеянием осцилляций частотной зависимости уменьшается, что уменьшает ширину 1/3-октавной полосы частот, для которой эффективный размер приёмника уменьшится, и критерий дальнего поля будет выполнен. То есть с увеличением размера приёмника уменьшается частота (центральная частота 1/3 октавной полосы), начиная с которой будет выполнен критерий дальнего поля. Увеличение расстояния приведёт также к уменьшению размаха осцилляции, следствием чего станет уменьшение остаточного влияния корреляционной компоненты и значительное уменьшение смещений ЧХ чувствительности в полосах частот, обусловленных энергетической компонентой.

Размах осцилляций ЧХ, обусловленных остаточным влиянием корреляционной компоненты, целесообразно использовать в качестве оценки погрешности, вызванной нарушением критерия дальнего поля. Эти осцилля-

ции заметны на ЧХ энергетической чувствительности m-рекордера при падении звуковой волны под углами 60° и 90° (кривые 2 на рис. 37 и 38) на частотах от 2 до 6 кГц.

В [1] показано, что при энергетическом усреднении ЧХ чувствительности в полосе частот 1/3-октавного фильтра с центральной частотой f_m влияние источника рассеяния, отстоящего от точки приёма (акустического центра гидрофона) на расстоянии x, будет ослаблено по закону, описываемому функцией вида $\sin(x)/x$. Таким образом, влияние источника рассеяния, отдалённого от точки приёма на расстояние $4,4\lambda_m$ ($\lambda_m = c / f_m$ — длина волны на центральной частоте 1/3-октавного фильтра, c — скорость звука), устраняется полностью, а влияние более отдалённых источников будет ослаблено не менее чем в 5 раз. Это расстояние в [1] предложено называть границей области приёма.

Для 1/3-октавной частотной полосы с центральной частотой 8 кГц граница области приёма расположена на расстоянии 810 мм от гидрофона, при этом источники рассеяния на корпусе m-рекордера, отдалённого от гидрофона на расстояние 830 мм, оказываются вне области приёма, и их влияние на энергетическую чувствительность будет подавлено не менее чем в 5 раз. Эффективный размер m-рекордера будут определять не его габариты, а размер гидрофона. Соответственно этому критерий дальнего поля при калибровке m-рекордера в 1/3-октавных полосах частот будет выполняться при значительно меньших расстояниях до излучателя в сравнении калибровкой на гармоническом сигнале (частоте). Как показано в [1], эти расстояния определяются поведением энергетической компоненты.

Размах осцилляций кривых 1 на рис. 35–38 не превышает 1 дБ. При этом обусловленное энергетической компонентой смещение чувствительности трекордера в 1/3-октавной полосе частот не будет превышать 0,1 дБ. Остаточное влияние корреляционной компоненты — размах осцилляций ЧХ чувствительности приёмника в 1/3-октавной полосе частот (кривые 2 на рис. 35–38 на частотах от 8 кГц и выше) — будет как минимум в пять раз меньше осцилляций кривых 1 и не превысит 0, 2 дБ.

Реализация предложенного решения привела к тому, что за счёт увеличения расстояния между корпусом m-рекордера и гидрофоном на частотах менее 8 кГц обусловленная рассеянием погрешность ЧХ энергетической чувствительности была уменьшена до 0,3 дБ. Погрешность ЧХ энергетической чувствительности для 1/3-октавных полос с центральными частотами выше 8 кГц не превышает 0,2 дБ. При этом критерий дальнего поля был выполнен во всём частотном диапазоне калибровки m-рекордера с габаритами, превышающими 1 м.

Существенным отличием калибровки рекордера в полосе частот от его калибровки на гармоническом сигнале (частоте) является возможность многократного уменьшения эффективного размера рекордера, определяющего

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

расстояние дальнего поля, в случае подавления влияния удалённого источника рассеяния. Эффект уменьшения «акустического» размера приёмника по отношению к его физическому размеру характерен для приёма полосовых сигналов не только в акустике.

Из радиолокации известно, что если при когерентном излучении лоцируемая цель оконтурена в пространстве блестящими точками, то при некогерентном излучении контур цели оказывается меньшим расстояния между блестящими точками [6]. Это относится к переизлучению падающей волны в направлении излучения при моностатической и приёмника при бистатической локации. Локализованные источники рассеяния, формирующиеся на гидроакустическом приёмнике, — аналог блестящих точек в радиолокации. Отличие примера из радиолокации от калибровки рекордера заключается в том, что приёмником является гидрофон, установленный в самом облучаемом объекте. Если «акустический» размер рекордера рассматривать как аналог размера контура цели, то этот размер при когерентном облучении будет определяться расстоянием между блестящими точками, а при некогерентном облучении «акустический» размер будет меньше этого расстояния. Иными словами, при некогерентном приёме «акустический» размер рекордера уменьшается относительно его размера при когерентном приёме.

Основное назначение шумомера — измерение шума с использованием широкополосных частотных характеристик (A, B, C, D). Для измерений шума в октавных и 1/3-октавных полосах частот применяли микрофон и анализатор спектра. При этом микрофон устанавливали на значительном удалении от анализатора. С развитием цифровых технологий появилась возможность встраивать анализатор спектра в шумомер. Осцилляции ЧХ, которые слабо сказываются на результатах измерений в широкой полосе (например, характеристика A), дают значительные искажения, когда шумомер применяют как анализатор в полосах 1/3 октавы. При определении расстояния дальнего поля для калибровки такого шумомера возникают проблемы, идентичные рассмотренным выше, и для их решения могут быть использованы предложенные решения.

Гидрофон в обтекателе

Рассмотренные результаты экспериментов относились к применению предложенной ИП для калибровки и исследований приёмника с открытым гидрофоном. При отсутствии рассеяния чувствительность такого приёмника совпадает с чувствительностью гидрофона. Подтверждением правильности предложенной ИП служило совпадение ЧХ приёмника с открытым гидрофоном и ЧХ гидрофона. Большой практический интерес представляет возможность применять предложенную ИП в случае, когда чувствительность

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

приёмника не обязана совпадать с чувствительностью гидрофона. Такая ситуация характерна для приёмника, у которого гидрофон размещён внутри оболочки, выполняющей роль обтекателя.

Термин «обтекатель» используют как в воздушной, так и в подводной акустике, но смысловая нагрузка этих терминов различается. Обтекатель не применяют, чтобы ориентировать шумомер в направлении воздушного потока. В гидроакустике обтекатель применяют, чтобы ориентировать приёмник в потоке (например, приливо-отливные явления), уменьшая тем самым не только гидродинамические помехи, но и влияние ХН приёмника. При этом искажения ЧХ чувствительности и ХН вследствие неудачной конструкции обтекателя могут многократно превышать выигрыш от ориентирования приёмника.

«Звукопрозрачный» обтекатель

В воздушной акустике обтекатель предназначен для уменьшения помех от шума обтекания микрофона воздушным потоком (ветер). Корпус такого обтекателя выполняет две основные функции: за счёт совершенной аэродинамической формы уменьшают турбулентность и порождаемые ею шумы обтекания воздушным потоком, а необходимой звукопрозрачности достигают использованием мелкоячеистой сетки, располагаемой возле мембраны микрофона. Конструкция в целом обеспечивает приемлемые акустические свойства приёмника. На основе этих принципов сконструирован изображённый на рис. 40 обтекатель гидрофона, предназначенного для измерения подводного шума.

Особенности обтекателя: обтекатель длиной 80 см и диаметром 10 см с торцами оживальной формы (цельный из пенопласта и металлический пустотелый с внутренними уступами) представляет собой многоэлементную конструкцию, собранную с помощью механических соединителей. Средняя «звукопрозрачная» часть длиной 42 см в виде тонкостенного перфорированного цилиндра с укреплённой на ней мелкоячеистой сеткой напоминает перфорированную панель, используемую в архитектурной акустике. Гидрофон устанавливают в центре средней части, как показано на рисунке. Обтекатель крепится с помощью металлической пластины к корпусу приёмника.

Влияние обтекателя на ХН приёмника определяли по формуле:

$$\xi(f, \varphi) = 20 \cdot \log_{10} \left[\frac{|Z_{PC}(f, \varphi)|}{|Z_{PH}(f, \varphi)|} \right],$$

где $Z_{PC}(f, \varphi)$ — частотная зависимость передаточного импеданса пары излучатель — гидрофон в обтекателе; $Z_{PH}(f, \varphi)$ — частотная зависимость передаточного импеданса пары излучатель — гидрофон без обтекателя, измеренная при угле падения звуковой волны φ .

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

Чтобы при измерениях частотной зависимости $Z_{PC}(f, \varphi)$ исключить влияние других элементов конструкции приёмника, эксперименты выполняли с обтекателем, снятым с приёмника.



Рис. 40. Гидрофон в обтекателе

На рисунках 41–43 приведены зависимости $\xi(f, \varphi)$, полученные в диапазоне частот от 250 Гц до 20 кГц при изменении угла падения звуковой волны в секторе от -40° до $+90^{\circ}$ (показан на рис. 40).







Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)



Рис. 43.

Реализация в исследованном образце принципов, используемых для конструирования обтекателя в воздушной акустике, оказалась неудачной. Большие (от 15 до 35 дБ) искажения частотных зависимостей обуславливают неравномерность ХН до 40 дБ. То есть попытка уменьшить погрешности, связанные с гидродинамическими помехами и нарушениями ориентирования приёмника, привела к значительно большим погрешностям, обусловленным неравномерностью ЧХ и ХН. Более того, при малых изменениях положения гидрофона в обтекателе частотные зависимости и ХН резко изменяются. При этом теряется смысл периодической поверки гидрофона, для выполнения которой гидрофон извлекают и вновь устанавливают в обтекатель. Рассмотренная конструкция обтекателя — пример того, когда намерения противоречат результату: стремились улучшить гидродинамику, а ухудшили акустику.

Замкнутая оболочка

В гидроакустике существует возможность, которая отсутствует в воздушной акустике, — использовать для обтекателя материал с акустическим импедансом, близким к волновому сопротивлению воды. Это позволяет создать обтекатель в виде замкнутой оболочки, внутри которой устанавливают гидрофон. Обычно такие оболочки имеют большие габариты для обеспечения стабилизации её положения.

Исследования влияния замкнутой оболочки имеют ряд особенностей, в том числе при использовании предложенной ИП. Основным отличием замкнутой оболочки от рассмотренной выше конструкции является разрыв водной среды для падающей звуковой волны. Для того, чтобы обеспечить жёсткость конструкции при больших габаритах, оболочка должна иметь достаточную толщину, что вызывает эффект звукоизоляции. Из-за отличия

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

скорости звука в материале оболочки от скорости звука в воде возникает преломление звуковой волны. При калибровке для подавления влияния отражений от границ бассейна необходимо применять меры, чтобы сохранить влияние на ЧХ приёмника реверберации звука в самой оболочке. Кроме того, изменяется соотношение временных задержек прихода прямой и отражённых волн, на использовании которых основан метод СКВУ, применяемый в предложенной ИП.

Эксперименты выполняли с обтекателем в виде оболочки из полиэтилена высокого давления (ПВД) в форме сигары диаметром 0,5 м и длиной 3 м. Геометрию эксперимента поясняет схема на рис. 44.



Рис. 44. Схема расположения излучателя и оболочки с установленным в ней гидрофоном в бассейне (вид сверху)

Измеряли частотные зависимости передаточного импеданса пары излучатель — гидрофон для гидрофона, установленного в оболочку, и при отсутствии оболочки. Угол падения звуковой волны изменяли в секторе ±20°, как это показано на рис. 44. На рисунке 45 представлены кепстры, полученные преобразованием Фурье частотных зависимостей передаточного импеданса излучатель — гидрофон и излучатель — гидрофон в оболочке.

На обоих кепстрах (представленных для наглядности с небольшим сдвигом по оси абсцисс) отчётливо виден момент прихода отражений от границ бассейна. Разница хода прямой и отражённой волн составляла 5,2 м.

Геометрические параметры эксперимента были спланированы так, чтобы как можно большая часть реверберационного шлейфа оболочки оставалась свободной от отражений границами бассейна и была доступна для анализа.

Разность хода 1,4 м на графиках соответствует источникам рассеяния, расположенным в торцах оболочки (элементы, обеспечивающие нейтральную плавучесть, не показаны на рис. 44).



Рис. 45.

На зависимости для гидрофона в оболочке присутствует явно выраженный пик, обнаруживающий источник рассеяния с разницей хода волны примерно 65 см — боковая поверхность оболочки (поверхность ниже гидрофона на рис. 44). На участке с разностью хода от 2,8 м и более явно выраженные пики отсутствуют, что позволяет сделать вывод об отсутствии многократных переотражений звука от торцов оболочки. Размах шлейфа спадает настолько, что на участке, непосредственно предшествующем отражениям стенками бассейна, отличия зависимостей для приёмника в оболочке и при отсутствии оболочки малоразличимы.

Кривой жёлтого цвета на рис. 46 показан кепстр частотной зависимости ПИ для приёмника в оболочке после обработки частотной зависимости по методу СКВУ. Отчётливо видно, что обработка изменила характер спадания реверберационного шлейфа оболочки, внеся дополнительное затухание. Привнесённое обработкой затухание исключили применением предложенного в разделе «Применение деконволюции» метода коррекции характеристики пропускания пространственного фильтра, реализуемого СКВУ.

Скорректированный кепстр представлен кривой белого цвета. Для наглядности кепстры изображены с небольшим сдвигом по оси абсцисс. На зависимости белого цвета отсутствуют отражения от границ бассейна, при этом на предшествующем отражениям участке сохранялись пик с разностью хода 0,65 м и реверберационный шлейф оболочки.



Рис. 46.

Дополнение метода СКВУ операцией коррекции характеристики пропускания, реализуемого СКВУ пространственного фильтра, позволило сохранить без искажений не только форму огибающей кепстра, но и закон спадания реверберационного шлейфа.

Для оценки качества предложенной ИП на рис. 47 показаны результаты её применения к частотной зависимости ПИ гидрофона в оболочке и при отсутствии оболочки.



Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

Зависимости $\xi(f, \varphi)$, характеризующие влияние оболочки на частотах от 250 Гц до 20 кГц при изменении угла падения звуковой волны от -20° до $+20^{\circ}$, представлены на рис. 48.



Рис. 48.

Предварительные исследования гидродинамических и акустических свойств оболочки из ПВД были выполнены теоретически, при этом нарушения акустической прозрачности оболочки на низких частотах были оценены значениями 0,3–0,4 дБ. Результаты эксперимента совпали с расчётными на частотах ниже 5 кГц. На более высоких частотах расхождение между экспериментальными результатами и теоретическими оценками вызвано использованием для расчётов упрощённой модели оболочки, которая не учитывала внутренние элементы конструкции. Учёт влияния всех конструктивных особенностей не позволяет получить точного аналитического решения и требует применения методов численного решения задач дифракции.

Малые отличия зависимостей от теоретических оценок позволяют сделать вывод о возможности применения предложенной ИП не только для калибровки приёмников с открытым гидрофоном, но и приёмников с гидрофоном в обтекателе. В сравнении с обтекателем на рис. 40 оболочка из ПВД обладает несомненными преимуществами. На частотах до 5 кГц ЧХ гидрофона в оболочке практически не отличается от ЧХ собственно гидрофона. Применение такой оболочки не исказит результаты измерений дискретных составляющих в спектре излучаемого в воду судном шума, которые присутствуют на частотах не выше 2-3 кГц. С увеличением частоты акустические свойства оболочки несколько ухудшаются, но остаются намного лучше свойств первого образца (неравномерность ЧХ не превышает 3 дБ в сравнении с 40 дБ). Использование энергетической секторальной чувствительности на высоких

частотах позволит дополнительно повысить точность при измерении шума судна в 1/3-октавных полосах частот.

Отметим, что приведённые результаты исследований не следует воспринимать как оценку того или иного подхода к конструированию обтекателей. Любой образец следует проверять экспериментально, поскольку ни экспертные оценки, ни сами по себе подходы к конструированию не гарантируют высоких акустических свойств изделия. В разделе «Использование «акустически обтекаемой» формы корпуса» приведены некоторые рекомендации по конструированию, которые применительно к исследованным образцам обтекателей можно выразить следующим образом: если m-рекордер с куполами и вынесенным гидрофоном разместить внутри оболочки больших габаритов из ПВД, получим конструкцию, объединяющую в себе преимущества как в части акустики, так и гидродинамики.

Пример других измерений

Следствием эксперимента по моделированию рассеяния звука с использованием отражения от границы раздела вода — воздух стала идея «обратить» методики измерений, использующие известное отражение, для измерения самих отражений.

При создании измерительного бассейна для выполнения калибровочных работ стремятся, чтобы акустические свойства бассейна приближались к свойствам безэховой камеры — стены бассейна должны хорошо поглощать звуковые волны. Для звукозаглушения внутренних поверхностей бассейна используют клиновидные покрытия из резины с воздушными полостями, смеси бетона и опилок и чисто деревянные — из осины и сосны. Недостатком перечисленных покрытий является их малая эффективность на низких частотах. Современные технологии позволили создать покрытия на основе упруго диссипативной среды, для которой характерна низкая скорость сдвиговых волн и значительное затухание в высокоэластичном материале. Среды с такими скоростями сдвиговых волн, например, покрытия из резиновых смесей на основе бутадиен-нитрильных каучуков с парафинатным эмульгатором, обладают хорошими звукопоглощающими и звукоизолирующими свойствами в широком диапазоне частот при достаточно небольшой толщине покрытия. В [22] предложена трёхслойная структура звукопоглощающей пластины, состоящей из внутреннего перфорированного слоя с воздушными полостями в виде рупоров с изменяющимся поперечным сечением и двух совулканизированных с перфорированным сплошных слоёв, которые обеспечивают герметичность рупоров с фронтальной и тыльной сторон пластины. В то же время вопросы исследования таких свойств, как акустический импеданс, коэффициент отражения звука, коэффициент звукопоглощения применительно к таким материалам остаётся малоизученным [23].

Параметры, характеризующие звукопоглощающие свойства, принято измерять при падении на материал под различными углами плоской звуковой волны. При выполнении калибровочных работ на стенку бассейна падает сферическая волна, поэтому эффективность покрытия измерительного бассейна необходимо оценивать при падении сферической волны. Традиционно используемые камеры малого объёма, импедансные трубы, реверберационные камеры не подходят для таких исследований. Выполнению исследований образца звукопоглощающего материала в гидроакустическом бассейне препятствуют отражения звука от стен бассейна. С применением метода СКВУ появилась возможность подавлять влияние отражений от стен бассейна, что позволило применить предложенный способ измерения коэффициента отражения сферической звуковой волны для исследования звукопоглощающего материала, предназначенного для облицовки бассейна.

Схема эксперимента приведена на рис. 49. Исследовали образцы звукопоглощающей пластины с воздушными полостями в виде рупоров с изменяющимся поперечным сечением. Внешний вид образцов представлен на рис. 50. Измеряли частотные зависимости коэффициента отражения от бетонной стенки бассейна и от укреплённой на стенке пластины квадратной формы со стороной 1 м и толщиной 75 мм.



Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)



Рис. 50. Образцы звукопоглощающего материала

При измерениях пару излучатель — гидрофон устанавливали на прямой, проходящей через центр образца перпендикулярно его поверхности, как показано на рис. 49. Поскольку при измерениях на низких частотах использовали излучатель больших габаритов, для уменьшения эффекта затенения гидрофон располагали между излучателем и отражающей поверхностью. Такое расположение преобразователей соблюдали и при измерениях на высоких частотах. Расстояние между излучателем, гидрофоном и отражающей поверхностью выбирали так, чтобы моделировать углы падения, характерные при калибровке гидрофона в бассейне типичной конфигурации. Для измерений на низких и высоких частотах применяли два обратимых излучателя. Чтобы при смене излучателя сохранить взаимное ориентирование и расстояние между излучателем и гидрофоном, преобразователи устанавливали на жёстком П-образном креплении из прутка малого диаметра. Неизменность расстояния между гидрофоном и отражающей поверхностью контролировали по задержке прихода отражённой волны.

Использовали гидрофон с известной XH. Предварительно измерили частотную зависимость ПИ пары излучатель — гидрофон по свободному полю, разместив пару в центре бассейна. Исследования выполняли при расположении образца на стенке и в центре бассейна, отражения измеряли, обращая образец фронтальной и тыльной поверхностью в направлении падающей звуковой волны. Измеряли временные задержки прихода прямой и отражённой от исследуемого образца волн. Полученные значения использовали для расчёта отношения расстояний при вычислении коэффициента отражения.

При измерениях на низких частотах применяли коррекции экспериментальных частотных зависимостей на частотные зависимости параметра взаимности и тока возбуждения излучателя. Поскольку прямая волна излучателя и отражённая волна падают на гидрофон с противоположных направлений, при измерениях на высоких частотах учитывали ХН гидрофона. Влияние дифракции звука на краях образца подавляли, подбирая частотный интервал усреднения по методу СКВУ, исходя из разности хода прямой и краевой дифрагированной волн, разность хода оценивали, основываясь на геометрических параметрах эксперимента. Метод, предложенный в [29], применяли для коррекции характеристики пропускания пространственного фильтра, реализуемого СКВУ при подавлении влияния дифрагированной волны.

Интерес для анализа предложенного способа измерений представляют частотные зависимости коэффициента отражения от стенки бассейна (кривая 1) и от образца, расположенного в центре бассейна и обращённого тыльной поверхностью в направлении падения звуковой волны (кривая 2) на рис. 51.

В частотной зависимости, характеризующей отражения от стенки бассейна, присутствуют узкие провалы глубиной до 30 дБ. То есть предложенный способ позволяет обнаруживать такие провалы при исследовании больших по площади поверхностей, когда частотный интервал усреднения определяется не размером поверхности, а габаритами бассейна.



Рис. 51. Частотные зависимости коэффициентов отражения

При подавлении влияния волны, дифрагированной на краях образца небольших размеров, частотный интервал усреднения определяется размерами образца и оказывается значительно шире частотного интервала усреднения, определяемого габаритами бассейна. Чтобы проверить влияние усреднения

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

при исследовании отражения от поверхности малой площади, образец установили в центре бассейна и обратили тыльной (отражающей) стороной в направлении излучателя. На частотах выше 60 кГц удалось зафиксировать провалы частотной зависимости глубиной до 30 дБ.



Рис. 52. Частотные зависимости коэффициентов отражения

На рисунке 52 в дБ приведены частотные зависимости коэффициентов отражения сферической звуковой волны от образца пластины, укреплённого на стенке бассейна и обращённого к падающей звуковой волне фронтальной (кривая *1*) и тыльной (кривая *2*) поверхностями.

Полученные зависимости типичны для звукопоглощающих конструкций с клиновидными полостями — отражения от фронтальной поверхности на 5–7 дБ меньше, чем от тыльной поверхности.

Для подтверждения правильности приведённых результатов выполнили сравнение с результатами, полученными тонально-импульсным методом. При измерениях тонально-импульсным методом излучатель и гидрофон устанавливали в центре бассейна. При отсутствии отражающего образца на нескольких частотах регистрировали опорные сигналы гидрофона, для чего излучатель возбуждали гармоническим сигналом заданной частоты и амплитуды и запоминали выходной сигнал гидрофона на временном интервале от начала излучения до момента прихода отражения от стенки бассейна. Для повышения отношения сигнал/шум применяли когерентное накопление, для чего сигнал гидрофона регистрировали многократно, повторяя излучение через реверберационные паузы. Амплитуду опорного сигнала определяли на участке, предшествующем приходу отражения от стенки бассейна.

Исследуемый образец устанавливали вблизи излучателя и гидрофона, как это показано на рис. 49. Исходя из геометрических параметров эксперимента,

определяли задержку времени прихода на гидрофон отражённой образцом волны относительно времени прихода прямой волны излучателя. При тех же, что и при измерении опорного напряжения, временном интервале и значениях частоты и амплитуды сигнала возбуждения излучателя регистрировали сигнал на выходе гидрофона при падении на гидрофон прямой звуковой волны излучателя и волны, отражённой от образца. Для повышения отношения сигнал/шум применяли когерентное накопление.

Выделяли напряжение сигнала, отражённого от образца, для чего из полученного выходного сигнала гидрофона вычитали опорный сигнал. С помощью преобразования Гильберта получали огибающую отражённого сигнала. Коэффициент отражения рассчитывали как отношение значения огибающей на участке, предшествующем приходу на гидрофон краевой дифрагированной волны, к амплитуде опорного сигнала.

На рисунке 53 представлен участок кривой 2 на рис. 51, окружностями — значения коэффициента отражения, полученные тонально-импульсным методом. Различие значений коэффициента отражения не превышает 0,6 дБ, что существенно меньше оценок погрешности измерений коэффициента отражений от исследованного образца. Малые различия результатов, полученных независимыми методами, подтверждают правильность измерений с использованием предложенного способа.



Рис. 53. Частотные зависимости коэффициентов отражения, полученные тонально-импульсным методом

Проблема обеспечения прослеживаемости

При создании средства измерений либо принимают меры, обеспечивающие возможность его калибровки с помощью существующей эталонной

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

базы, либо, если это невозможно, обязательно создают специальные эталонные средства, которые обеспечивают прослеживаемость создаваемого средства измерений к первичным эталонам. Зачастую рекордер создан как «чёрный ящик», на входе которого акустический сигнал, а на выходе — цифровая запись обработанного электронными устройствами акустического сигнала, хранящаяся в запоминающем устройстве, скрытом в корпусе рекордера. Типичный пример такого исполнения — рекордеры AURAL M2. «Чёрный ящик» обеспечивает полную защиту от несанкционированного доступа, что можно рассматривать как преимущество с точки зрения законодательной метрологии. К сожалению, на этом преимущества такого подхода к конструированию рекордера заканчиваются:

- отсутствует возможность доступа к входным электрическим цепям рекордера, к которым подключён гидроакустический преобразователь;
- отсутствует возможность контроля характеристик электрических трактов рекордера;
- отсутствует возможность непосредственного доступа к аналоговому сигналу на входе АЦП, что многократно затрудняет калибровку, например, из-за невозможности наблюдать регистрируемый сигнал при настройке режимов работы излучающего и приёмного трактов эталонной установки;
- отсутствует возможность обнаружить искажения сигнала вследствие перегрузки какого-либо элемента регистрирующего тракта.

Отдельного упоминания заслуживают рекордеры, которые накапливают оценки измеряемого сигнала вместо либо дополнительно к самому сигналу. Чтобы проверить правильность выполняемых рекордером оценок, должна быть обеспечена возможность подавать на электрический вход рекордера разнообразные тестовые сигналы. Параметры таких тестовых сигналов должны задаваться и контролироваться с большей точностью, чем это возможно для акустических сигналов. Во многих случаях требуемый акустический сигнал создать невозможно, например, из-за отражений звука.

Особенность калибровочных и поверочных работ состоит в том, что оценки, выдаваемые рекордером, необходимо получать в процессе измерений (например, в бассейне), для чего у рекордера должен быть соответствующий выход. Рекордер должен иметь возможность получать оценки, позволяющие выполнить его калибровку методами, реализуемыми в эталонных установках. Например, если в эталоне используют тонально-импульсный метод измерений, то рекордер должен обеспечивать процедуру измерений тонального-импульсным методом, включая алгоритм стробирования.

Преимуществом рекордера, созданного в *Pacific Northwest National Laboratory*, является возможность поэлементной проверки характеристик электронного узла, отвечающего за обработку сигнала гидрофона, и регистратора данных (АЦП) [24]. Вместе с тем отсутствие индикатора выходного сигнала либо возможности онлайн-передачи зарегистрированной в под-

водном положении информации существенно затрудняет процесс калибровки [10]. Чтобы правильно оценить акустические свойства рекордера в бассейне должен находиться рекордер в том виде, в котором его применяют в море. Для измерений частотной характеристики рекордера по полю можно применять спектрометрию временных задержек [25], гомоморфную времяселективную постобработку или метод скользящего комплексного взвешенного усреднения [1, 11]. Для получения комплексного спектра либо осциллограммы сигнала используют передаточную функцию бассейна [11]. Отсутствие аналогового выхода принимаемого сигнала не позволяет применить ни один из перечисленных методов. Для повышения отношения сигнал/шум применяют синхронное накопление принятых сигналов. Этот приём требует жёсткой синхронизации излучающего и приёмного трактов, которую невозможно обеспечить, используя АЦП рекордера.

Чтобы зарегистрировать акустический сигнал без искажений, частотная характеристика рекордера должна быть ровной, а характеристика направленности — круговой. Требования к характеристикам измерительного гидрофона установлены в [26]. Не ухудшить характеристики гидрофона современными электронными узлами не составляет большой сложности. Однако ровная частотная характеристика системы гидрофон — электрический тракт рекордера не гарантирует отсутствие искажений при регистрации подводного звука. Проблема создания совершенного прибора для измерений подводного звука кроется в необходимости обеспечить высокое акустическое качество конструкции его корпуса. Это вынуждает применять меры по совершенствованию акустических свойств корпуса рекордера, например, применяя акустически прозрачные материалы либо улучшая акустическую «обтекаемость» корпуса. Получить представление об акустически «обтекаемой» конструкции корпуса можно по фотографиям современных шумомеров. Решая те же самые проблемы, разработчики шумомеров эмпирическим путём создали форму корпуса, которая имеет обтекаемый вид и даёт минимальное рассеяние звуковой волны в точку расположения микрофона. Простейшее решение для рекордера — уменьшение эффективной площади рассеяния в точку приёма за счёт установки пластиковых конусов на торцевые поверхности цилиндрического корпуса, позволяет уменьшить размах дифракционных осцилляций на 8-10 дБ.

Электронная «начинка» рекордера призвана обеспечивать его продолжительную автономную работу. В то же время именно это несомненное преимущество создаёт значительные препятствия для калибровки рекордера. При моделировании AURAL 2M не ставилось целью повторить электронную «начинку» рекордера, чтобы попытаться преодолеть препятствия, характерные для калибровки автономного устройства. Цель состояла в том, чтобы воспроизвести конструкцию, которая позволяет моделировать вносимые рекордером искажения звукового поля, при этом обеспечивает возмож-

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

ность исследовать её акустические свойства, используя методы и программно-аппаратные средства созданной во ВНИИФТРИ эталонной базы. Типичная проблема методик, применяемых разработчиками рекордеров для их калибровки, в том, что результатам такой калибровки нельзя доверять, поскольку они обеспечивают прослеживаемость к первичному эталону только гидрофона, устанавливаемого в рекордер, и не учитывают влияние корпуса рекордера на измеряемые параметры звукового поля [24, 32].

До настоящего времени на частотах от 1 кГц и ниже методы калибровки рекордеров, прослеживаемые к национальным эталонам, не стандартизованы. Актуальным сегодня является включение в создаваемые международные стандарты разработанных во ВНИИФТРИ методов. Такая постановка задачи опирается на приоритет ВНИИФТРИ в этой области, признанием которого явилось применение этих методов участниками международных и ключевых сличений МКМВ, а также включение методов в стандарт МЭК на калибровку гидрофонов.

Включение методов ВНИИФТРИ в стандарт на калибровку рекордеров позволит избежать применения далёких от совершенства методов частичной калибровки при гармонизации отечественных стандартов с международными. Другими словами, перевести все недостатки международного стандарта на русский язык и включить их в текст российского стандарта. Такая гармонизация — шаг назад отечественной метрологии. Она потребует больших затрат на повторение несовершенной эталонной базы, например, специальной камеры малого объёма для калибровки по давлению рекордера на низких частотах в воздухе [27], эталонной установки, позволяющей, не извлекая рекордер из воды, оперативно считывать и расшифровывать записи тестовых сигналов, хранящиеся в его памяти, и т.п.

При этом сохранится необходимость поддержания существующей эталонной базы, преимуществами которой являются возможности:

- выполнять калибровку по полю комплектного рекордера на частотах много ниже частот доступных тонально-импульсному методу [19];
- получать непрерывные частотные зависимости по полю для достоверной оценки неравномерности чувствительности [19];
- определять энергетическую чувствительность рекордера применительно к различным измерительным задачам (шум локализованного источника, окружающий шум, шум движущегося источника) [28];
- восстанавливать при калибровке в бассейне форму излученного сигнала для оценки погрешности измерении пиковых значений [14];
- учитывать влияние удалённых источников рассеяния звука [29];
- получать информацию о положении и силе источников рассеяния на элементах корпуса рекордера, весьма важную для разработчиков [30].
- Создавать стандарт на калибровку рекордера необходимо одновременно и в тесной связи со стандартом на сам рекордер, в который, подобно стан-

дартам на шумомеры, были бы включены требования к характеристикам и конструкции рекордера, методы испытаний с нормированными неопределённостями и методы поверки (периодической калибровки). В этот стандарт должны быть включены как упомянутые выше требования, в том числе необходимость герметичного аналогового выхода, возможность отсоединения гидрофона при поверке, требование определять чувствительность по полю комплектного рекордера, так и требования специфические, обусловленные условиями эксплуатации (например, меры по уменьшению шумов обтекания, меры, препятствующие обрастанию рекордера морскими организмами [31], что нарушает его акустические свойства, и т.п.). Среди характеристик рекордера должна появиться такая характеристика, как расстояние дальнего поля в полосе частот, например, 1/3-октавной.

В настоящее время набор параметров для оценки негативного воздействия звука на морских обитателей только формируется. Поэтому используют оценки, понятные физикам: СКЗ, пиковое значение, энергия шума в полосе частот фильтра, аналогично тому, с чего начинали измерения шума в воздушной акустике. С появлением параметров, адекватно описывающих вредное воздействие подводного шума, например, пиковым значением в полосе частот, возникнет необходимость нормирования этой полосы, вплоть до указания параметров полюсов, формирующих эту полосу фильтров (как регламентировано стандартом на шумомеры).

Литература

- Исаев А.Е. Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля // Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008. 369 с.
- 2. Каталог 1991/92. Электронная аппаратура. Брюль и Къер BF1039-11.
- 3. ANSI/ASA S12.64-2009 part1: Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships. Part 1 General Requirements. 2.
- 4. 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).
- 5. COUNCIL DIRECTIVE 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora.
- 6. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов. М.: Советское радио, 1970. С. 560.
- 7. Rule Note NR 614 Underwater Radiated Noise (URN), Bureau Veritas, 2017.
- 8. ISO/DIS 17208-2: 2017. Underwater acoustics. Quantities and procedures for description and measurement of underwater noise from ships. Part 2: Determination of source levels from deep water measurements.

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

- Isaev A., Nikolaenko A. Calibration of the receiver for the measurement of ambient underwater noise // Proc. of the 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2016). Hamburg, Germany, 2016. P. 7050–7057.
- Исаев А.Е., Николаенко А.С. Метод измерений частотной характеристики приёмника подводного шума в условиях лабораторного бассейна // В сборнике по итогам проведения Научно-деловой программы МВТФ «АРМИЯ-2016».
- 11. Черников И.В. Разработка и исследование методов и средств градуировки гидроакустических приёмников по полю с использованием шумового сигнала: дис. ... канд. техн. наук. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016.
- 12. 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. М.: Стандартгиз, 1963. Выпуск 73(133). С. 31–40.
- 13. Исаев А.Е., Черников И.В. Лабораторная градуировка гидроакустического приёмника в реверберационном поле шумового сигнала // Акуст. журнал. 2015. Т. 61. № 5. С. 1–9.
- 14. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Черников И.В. Подавление реверберационных искажений сигнала приёмника с использованием передаточной функции бассейна // Акуст. журнал. 2017. Т. 63. № 2. С. 1–10.
- 15. 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.
- 16. Исаев А.Е. Лабораторная градуировка приёмника для измерений уровней подводного шума корабля // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 53–58.
- 17. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Два подхода к градуировке гидрофона по полю при непрерывном излучении в незаглушенном бассейне // Измерительная техника. 2008. № 12. С. 47–51.
- Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне // Акуст. журнал. 2009. Т. 55. № 2. С. 1–10.
- 19. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Лабораторная калибровка гидроакустического приёмника по полю на низких частотах // Измерительная техника. 2018. № 1. С. 54–59.
- 20. ISO/FDIS 18406 Underwater acoustics. Measurement of radiated underwater sound from percussive pile driving.
- 21. EMPIR Call 2015 UNAC-LOW. Project number: 15RPT02 «Underwater acoustic calibration standards for frequencies below 1 kHz» [Electronic resource]. URL: http://empir-unaclow.com.

- 22. Ионов А.В., Пугачев А.Д., Чихов В.Ю., Воронов Н.В., Абдурахманов Г.Ф., Борисов О.В. Устройство гидроакустической защиты. Патент РФ № 196114756/28, 05.05.2005. Патент России № 2138858. 1999. Бюл. 27.
- 23. Трофимов С.А., Гаврильев С.А., Иванов М.В. Исследование гидроакустических свойств материалов // Сборник трудов конференции «Акустика среды обитания». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 156–165.
- 24. Martinez J.J., Deng Z., Myers J.R., Rohrer J.S., Carlson T.J., Caviggia K.A. Design and Implementation of an Underwater Sound Recording Device / Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830. September 2011. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington 99352.
- Pedersen P.C., Lewin P.A., Bjorno L. Application of time delay spectrometry for calibration of ultrasonic transducers // IEEE Trans. Ultrasonics, ferroelectric and frequency control. 1988. V. 35. No. 2. P. 185–205.
- 26. IEC 60500(2017) Гидроакустика. Гидрофоны. Свойства гидрофонов в полосе частот от 1 Гц до 500 кГц.
- Hayman G., Robinson S.P., Lepper P.A. The Calibration and Characterisation of Autonomous Recorders used in Measurement of Underwater Noise. Advances in Experimental Medicine and Biology. 11/2015. V. 875. P. 441–445. DOI: 10.1007/978-1-4939-2981-8_52, 2015.
- 28. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Чувствительность приёмника при измерениях подводного шума // Измерительная техника. 2018. № 09. С. 61–65.
- 29. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Калибровка в лабораторном бассейне рекордера с вынесенным гидрофоном // Измерительная техника. 2018. № 07. С. 62–65.
- Isaev A.E., Nikolaenko A.S. Free-field calibration of underwater sound receiver in a laboratory water tank at very low frequencies [Electronic resource] // CCAUV/15-17. 2017. Published in electronic version on BIPM. URL: www.bipm.org.
- Mathias H. Andersson. Field survey preparation and Measurements campaign [Electronic resource]. URL: https://biasproject.files.wordpress.com/2016/ 02/03_field-work_ma.pdf.
- 32. 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. ФГУП «ВНИИФТРИ», 2019. № 1 (17). С. 94–108.

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)