

УДК 534.6.08

**ПРОБЛЕМЫ ВАЛИДАЦИИ ПРИ ГРАДУИРОВКЕ ПРИЕМНИКА
ПОДВОДНОГО ШУМА****А.Е. Исаев, А.М. Поликарпов**

ФГУП «ВНИИФТРИ»

Традиционно, контроль излучаемого кораблем подводного шума представлял интерес главным образом для военно-морских ведомств (обнаружение корабля гидролокатором, приемными системами мины и торпеды, и т.п.), и в значительно меньшей степени для приложений гражданского назначения. Задачи, связанные с контролем излучаемого подводного шума в целях обеспечения безопасности корабля остаются и будут приоритетными в дальнейшем. Однако в последние годы востребованность измерений подводного шума значительно расширилась. Стремительно усилившееся влияние антропогенных факторов, вызванное активным освоением шельфовых ресурсов, увеличением судоходства большеразмерных (сильно шумящих) торговых судов и т.п. обусловило растущий интерес к влиянию подводного шума на экологическое состояние прибрежных акваторий.

Тотальное ухудшение экологической обстановки в прибрежных зонах Мирового океана привело к необходимости оценки влияния акустического воздействия на морскую экосистему и введению соответствующих защитных норм [1]. Концепцию развития метрологии подводной акустики в Европе в ближайшей перспективе определяет разработанная в 2006 г. «Дорожная карта в области поддержания морских технологий и морской среды». В 2008 г. принят правовой инструмент Евросоюза по защите морей: «Рамочная директива по морской стратегии», направленная на достижение к 2020 г. и последующего поддержания благоприятного экологического статуса морских акваторий стран Евросоюза. В этих документах излученный судном подводный шум рассматривается как один из основных источников загрязнения Мирового океана, а нормирование и измерение подводного шума взято за основу для разработки критериев оценивания благоприятного экологического статуса морских вод.

В последнее время рядом стран введены в действие национальные стандарты, устанавливающие величины и процедуры для описания и измерения излучаемого судном подводного шума [2, 3]. Первые международные стандарты ISO:

- «ISO/DIS 16554. «Измерение и представление результатов по подводному звуку, излучаемому торговым судном»,

- «ISO/17208-1 «Акустика - Величины и процедуры для описания и измерения подводного звука, излучаемого судном - Часть 1: Общие требования к измерениям в глубоком море» разрабатывают сегодня TC8/SC2 – подкомитет «судовые и морские технологии» технического комитета «Защита морской среды обитания» и подкомитет SC3 технического комитета TC43 - «Гидроакустика».

В этих документах опыт, накопленный военно-морскими специалистами, применяют для контроля подводного шума при коммерческом использовании морей, вследствие чего предлагаемые в стандартах методы измерений сохраняют отпечаток традиционных подходов, доставшихся в наследство от задач защиты корабля от минно-торпедного оружия. При высокой заявленной точности [3] стандарты не в должной мере учитывают проблемы обеспечения единства и взаимного, на международном уровне, признания результатов измерений, полученных на морском испытательном полигоне. Став международной, проблема измерения подводного шума требует единого понимания основополагающих понятий, касающихся различных ее аспектов, в частности связанных с метрологическими характеристиками гидроакустического приемника, используемого в условиях морского полигона, градуировкой приемника и использованием результатов градуировки в натурных измерениях.

Современные технологии позволяют изготовить почти идеальный, всенаправленный гидрофон с плоской частотной характеристикой. Заявленные в стандартах на измерения подводного шума точности (1.5 дБ для измерений по классу «А» [3]) заставляют выполнять градуировку гидрофона на пределе возможностей лучших метрологических лабораторий [4]. При этом задача испытательного полигона – провести измерения шума без потери точности градуировки. Однако, в силу специфики использования гидрофона в условиях морского полигона, усилия, затраченные при его изготовлении и градуировке, зачастую оказываются напрасными. Причина этого в том, что гидрофон градуируют по полю на тональном сигнале, а измеряют шум гидрофоном, который не свободно плавает в безграничной водной среде, а установлен в протяженную конструкцию, вместе с которой образует приёмник подводного шума. Иными словами, на полигоне гидрофон оказывается в условиях, далеких от условий свободного поля, применительно к которым он был отградуирован.

Исторически стандарты на градуировку гидрофонов имели своей главной целью:

- обеспечение наивысшей точности градуировки эталонных гидрофонов;
- обеспечение близости и сопоставимости результатов градуировок, выполненных различными лабораториями;

- простоту и точность передачи единицы от эталонных гидрофонов измерительным гидрофонам.

То есть, стандарты на градуировку были направлены на правильность и прецизионность градуировок, а также верификацию тех свойств гидрофона, которые обеспечивают правильность и прецизионность градуировок. Проблема валидации (соответствие требованиям, связанным с предполагаемым использованием приемника [5]) возникала, когда измерительный гидрофон оказывался вне стен метрологической лаборатории, но каждый потребитель решал ее, исходя из своих представлений о правильности решения своей измерительной задачи. Верификацию свойств гидрофона обеспечивали стандарты технических требований к измерительным гидрофонам. Используемые в этих стандартах формулировки определений измеряемых величин и методы измерений неявно обеспечивали валидацию гидрофона применительно к условиям метрологических лабораторий, но не к условиям полигона. В наследство от них достались атавизмы: гармонический сигнал излучения и ориентирование гидрофона на источник звука не осью симметрии, как это принято для микрофона, а предписанным опорным направлением, перпендикулярным этой оси, и ряд других. Некоторые технические требования, например, малая неравномерность частотной характеристики чувствительности и всенаправленность, явно избыточны для обеспечения единства градуировок, поскольку являются свойствами идеального преобразователя. Поскольку в любой измерительной ситуации идеальный приемник предпочтительнее реального приемника, улучшение характеристик приемника попутно неявно решало и задачу его валидации. Стремление создать совершенный гидрофон отодвинуло задачу валидации на второй план и до настоящего времени валидации реального приемника, используемого в полевых условиях, не уделялось должного внимания.

Под идеальным гидрофоном принято понимать некоторую абстракцию, называемую «акустическим центром». Об условности этого понятия можно судить хотя бы по тому, что при испытаниях такой сложный и протяженный источник шума, как судно, также заменяют «акустическим центром» [2]. Подразумевая под гидрофоном при его градуировке точку - «акустический центр», полагают, что при переносе этого гидрофона в условия морского полигона, с «акустическим центром» ничего не происходит. Однако такие изменения хорошо исследованы для конденсаторных измерительных микрофонов и могут быть вызваны зависимостью положения акустического центра от частоты. Упомянув об этой проблеме, следует иметь в виду не столько гидрофон, сколько судно и приемник для измерения подводного шума в условиях морского полигона. Непреложным остается одно - понятие «акустический центр» связано с видом принимаемого и излучаемого

сигнала, что необходимо учитывать как при использовании существующих определений, так и при выработке новых формулировок [6].

В статье будет показано, что решение проблемы точного измерения излучаемого судном шума требует уточнения или пересмотра многих общепризнанных понятий: «чувствительность приемника», «свободное поле», «градуировка по полю» с учетом ограничений, налагаемых частотно-временным соотношением неопределенности $\Delta f \geq 1/\Delta t$.

Задача измерений шума корабля по своей сути является обратной задачей, решение которой требует знания полной динамической характеристики приемника: отклик на δ -импульс либо комплексная частотная характеристика. Сложность получения полной динамической характеристики вынуждает пользоваться на практике частными динамическими характеристиками, которые получают в результате градуировки. Типичный пример - чувствительность гидрофона на ограниченном наборе частот 1/3-октавного ряда. Эта характеристика весьма удобна для использования в условиях метрологических лабораторий, однако явно недостаточна для измерения подводного шума корабля в 1/3-октавных полосах частот.

При измерениях подводного шума среднеквадратическое значение (СКЗ) звукового давления в 1/3-октавной полосе частот вычисляют по результатам измерения выходного напряжения гидрофона в той же полосе частот. Для частотных полос, в которых неравномерность частотной характеристики приемника пренебрежимо мала в сравнении с погрешностью измерений, СКЗ звукового давления вычисляют делением СКЗ выходного напряжения на значение чувствительности гидрофона на номинальной частоте 1/3-октавной полосы. Если неравномерность частотной характеристики в пределах полосы измерений существенна, использование чувствительности на номинальной частоте становится некорректным. Но и в этой ситуации вынужденно используют чувствительности на номинальной частоте, поскольку в настоящее время при градуировке гидроакустического приемника определяют только набор чувствительностей на 1/3-октавном ряде частот. При таком подходе задача валидации приемника подводного шума остается не решенной, поскольку при градуировке решают задачу, которую научились решать, а не ту, которую нужно решить на полигоне.

Для измерений подводного шума более подходящей является другая частная динамическая характеристика гидрофона – набор чувствительностей в 1/3-октавных полосах частот [7]. Конечно, эта динамическая характеристика не позволяет решать обратную задачу восстановления входного сигнала, но даёт возможность получить требуемые численные оценки СКЗ шума. Отметим, что для измерений подводного шума при забивании свай в морское дно чувствительность в 1/3-октавной полосе

частот может оказаться неподходящей настолько же, насколько и чувствительность на 1/3-октавной частоте. S. Robinson в [8] прямо указывает на то, что при измерениях фонового шума, например, в акватории морского полигона, более правильно использовать чувствительность по диффузному полю. Сам по себе выбор 1/3-октавных частотных полос также требует обоснования. Главной экологической задачей в воздушной акустике является защита слуха человека, поэтому уровень шума оценивают, используя взвешенную частотную коррекцию «А». Сегодня не видно причин, по которым 1/3-октавные полосы частот, широко используемые в кораблестроении, применяют при решении экологической задачи - оценка вредного влияния шума на морских обитателей. Известно, что 1/3-октавные полосы частот отражают особенности слуха человека, однако неизвестно, в какой мере это относится к морской фауне, также как неизвестна и сама физическая величина, которая характеризует «вредность» акустического поля: звуковое давление, колебательная скорость и т.д.

Выбор в пользу звукового давления в качестве измеряемого параметра звукового поля сегодня не имеет альтернативы, поскольку в гидроакустике наибольшее значение традиционно придавали измерениям звукового давления. Использование 1/3-октавных частотных полос позволяет сопоставлять оценки шума внутри судна и излучаемого судном в воду.

Разумеется, валидация приемника подводного шума предполагает использование при градуировке тестового сигнала, идентичного шуму, измеряемому на полигоне. Однако, в условиях априорной неопределённости относительно спектральных свойств измеряемого на полигоне шума, наиболее простым и универсальным решением при градуировке может стать использование шума с равномерной в полосе частот спектральной плотностью.

Градуировка в полосах частот, впрочем, как и любая другая градуировка, есть мера вынужденная и обусловлена не идеальностью приемника. При проектировании приемника надеются получить хорошие акустические свойства. К сожалению, на практике приходится работать с тем, что получилось: носитель может искажать поле в опорном направлении до 6 дБ, неравномерность характеристики направленности приемника на высоких частотах может достигать 8-12 дБ, и даже использование акустически прозрачных материалов не обеспечивает акустической прозрачности конструкции носителя [7]. Очевидно, что в этой ситуации совершенствование гидрофона и повышение точности эталона для градуировки этого гидрофона теряют смысл, поскольку полученные в результате градуировки прецизионные значения чувствительности гидрофона не дают адекватной оценки неравномерности частотной харак-

теристики приемника в полосе частот измерения шума.

Наметились два подхода, при которых недостаток конструкции стараются компенсировать совершенствованием процедуры градуировки. Один изложен в стандарте МЭК 61672.1 на шумомеры, который предписывает в частотном диапазоне возможных осцилляций сокращать частотный шаг измерений до 1/12 октавы. Такой подход повышает достоверность результатов верификации шумомера. Второй подход основан на получении значения чувствительности приемника в полосе частот, как было указано выше. Если полоса частот при градуировке идентична полосе частот при измерениях шума, второй подход позволяет повысить точность измерений, тем самым решая проблему валидации, а не просто повысить достоверность верификации шумомера.

Таким образом, если первое условие валидации заключается в использовании для градуировки шумового тестового сигнала либо в определении характеристики чувствительности гидрофона, адекватной измерениям шума при натурных испытаниях, то вторым неперенным условием валидации является градуировка гидрофона, установленного на носитель, другими словами, градуировка гидроакустического приемника в том виде, как его применяют по назначению на полигоне.

Проблемы использования чувствительности по полю при измерениях подводного шума

Рекомендации [9] определяют чувствительность гидрофона для общего случая как отношение напряжения на выходе гидрофона к звуковому давлению. Принято считать, что условия применения гидроакустического приемника на морском испытательном полигоне близки к условиям свободного поля, а расстояние между источником шума (испытуемым судном) и приемником велико настолько, что гидрофон находится в дальнем поле источника. В этой измерительной ситуации использование чувствительности гидрофона в свободном поле представляется естественным. Однако напомним, что в соответствии с [9, 10] чувствительность гидрофона в свободном поле есть отношение выходного напряжения к звуковому давлению в невозмущенном свободном поле бегущей плоской волны при приеме звука с определенного направления и на определенной частоте. Таким образом, в силу используемого определения чувствительности стандарт на градуировку гидрофонов [11] подразумевает, что полученная чувствительность по полю является чувствительностью на частоте.

Традиционно и градуировку гидрофона, и измерения СКЗ шума в полосах частот выполняют с использованием частот 1/3-октавного ряда. Отсюда вытекает требование высокой равномерности частотной характеристики

гидрофона в 1/3-октавной полосе частот. СКЗ звукового давления $P(f_0, \Delta f)$ в полосе частот от $f_0 - \Delta f/2$ до $f_0 + \Delta f/2$ вычисляют по формуле:

$$P(f_0, \Delta f) = \frac{U_H(f_0, \Delta f)}{M_H(f_0)}, \quad (1)$$

где $U_H(f_0, \Delta f)$ - выходное напряжение гидрофона, измеренного в той же полосе частот, $M_H(f)$ - частотная характеристика чувствительности гидрофона.

Уже упоминалось, что при натурных измерениях гидрофон применяют вместе с дополнительной конструкцией (далее носитель), выполняющей функции контейнера периферийной аппаратуры, а также функции крепления, позиционирования и механической защиты гидрофона. Элементы окружающей гидрофон конструкции рассеивают падающую на носитель звуковую волну и искажают звуковое поле в точке приема (в месте расположения гидрофона). Как правило, на высоких частотах частотная характеристика гидрофона оказывается весьма неравномерной и изрезанной. В этой ситуации использование в формуле (1) значения чувствительности $M_H(f_0)$, определенного на гармоническом сигнале, становится некорректным, поскольку в подынтегральное выражение для выходного напряжения $U_H(f_0, \Delta f)$ чувствительность гидрофона $M_H(f)$ входит как функция частоты. Другими словами, не существует константы, которую можно было бы подставить в формулу (1).

К чему это может привести, поясним с помощью показанных на рис. 1 частотных характеристик экспериментального гидроакустического приемника с источником рассеяния, удаленным от гидрофона на 25 см (рис. 1 а) и 15 см (рис. 1 б).

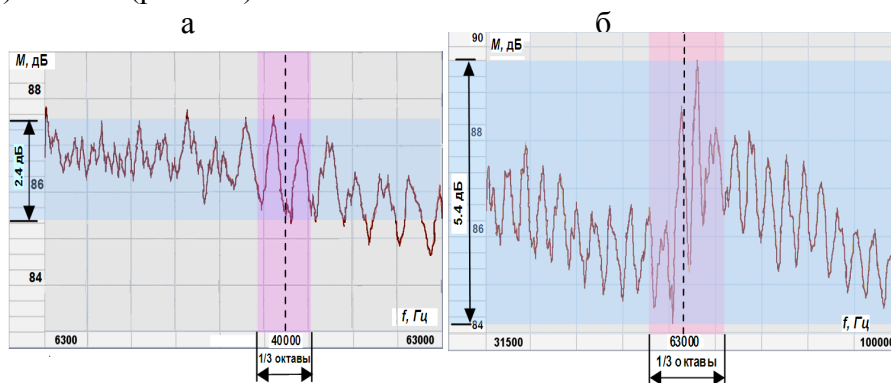


Рис. 1 Частотные характеристики приемника при наличии источника рассеяния, удаленного от гидрофона на 25 см (а) и 15 см (б)

Какое значение чувствительности следует выбрать для вычисления звукового давления в 1/3-октавных полосах частот 40 и 63 кГц, если:

- чувствительность приемника в этих полосах изменяется на 2.4 дБ и 5.4 дБ соответственно;
- частотная зависимость чувствительности совершает несколько осцилляций в пределах каждой из 1/3-октав?

Может показаться, что зависимости на рис. 1 являются следствием неудачной конструкции гидроакустического приемника. Аналогом гидроакустического приемника в воздушной акустике является шумомер, который также можно рассматривать как микрофон, установленный на носителе. В отличие от измерений шума в подводной акустике, стандарт на шумомер предписывает определять и нормировать частотную характеристику не микрофона, а шумомера в целом. Благодаря накопленному опыту и усилиям по совершенствованию конструкции, частотная характеристика шумомера значительно ближе к характеристике микрофона. Однако, как видно на рис. 2, исключить осцилляции, обусловленные интерференцией падающей и рассеянной элементами конструкции шумомера звуковой волны, не удалось.

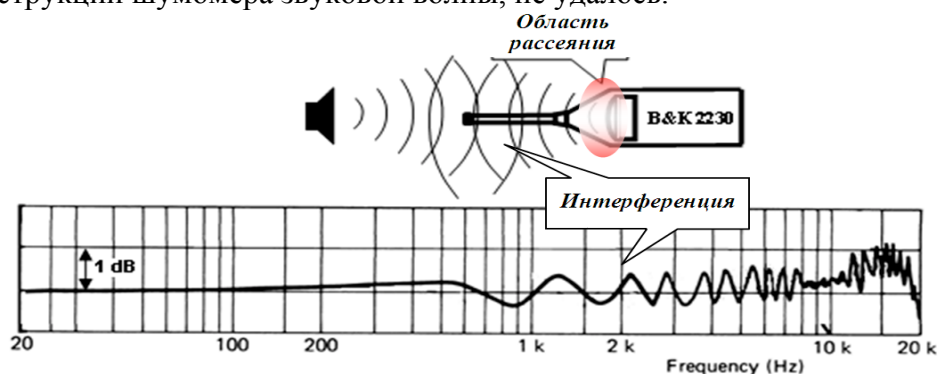


Рис. 2 Частотная характеристика шумомера В&К 2230

При проектировании гидроакустического приемника практически всегда надеются получить хорошие акустические свойства. К сожалению, на испытательном полигоне приходится применять то, что получилось. Задачу измерения в такой ситуации можно решать, например, восстановлением входного акустического сигнала, используя комплексную функцию преобразования приемника, и последующим спектральным анализом полученного сигнала. Однако такой подход не получил распространения, поскольку технически сложен, требует определения полной динамической характеристики приемника (комплексной частотной либо импульсной характеристики), вызывает значительные источники погрешности при

решении обратной задачи и нерационален, поскольку интерес представляет не сам измеряемый процесс, как функция времени, частоты либо координаты пространства, а конкретная характеристика процесса. В рассматриваемом случае – числовые значения СКЗ звукового давления в стандартных полосах частот.

Чувствительность в полосе частот

Более рациональным подходом к решению задачи измерения является определение (в результате градуировки гидрофона) электроакустического параметра, связывающего измеряемую характеристику звукового давления и соответствующую ей характеристику напряжения на выходе гидрофона. Например, чувствительность гидрофона, определенная на гармоническом сигнале с частотой f , задает соотношение между амплитудами гармонического напряжения на выходе гидрофона и гармонического звукового давления. Набор значений чувствительности гидрофона на 1/3-октавных частотах представляет собой сокращенную (упрощенную) динамическую характеристику гидрофона для гармонических сигналов стандартного 1/3-октавного ряда. Использование в качестве сокращенной динамической характеристики гидрофона при измерениях СКЗ шума в третьоктавных полосах частот сокращенной динамической характеристики для гармонических сигналов с частотами третьоктавного ряда некорректно, если нет оснований считать константой частотную характеристику чувствительности гидрофона в пределах каждой третьоктавной полосы.

Для получения сокращенной характеристики при измерениях СКЗ звукового шума в полосах частот чувствительность гидрофона $M_H(f_0, \Delta f)$ (чувствительность в полосе частот) должна быть определена так, чтобы позволяла оценивать СКЗ звукового давления по результатам измерения СКЗ выходного напряжения гидрофона в полосе частот.

Значение этой чувствительности можно получить, применяя при градуировке гидрофона шумовой (псевдослучайный) акустический сигнал заданного вида. Случайные тестовые сигналы распространены при измерениях электрических величин. Так, например, национальный стандарт США регламентирует применение случайного тестового сигнала при испытаниях стандартных дробь-октавных фильтров.

Случайный акустический сигнал можно применить для градуировки гидрофона. При этом чувствительность в полосе частот $[f_0 - \Delta f/2, f_0 + \Delta f/2]$ вычисляют по формуле:

$$M_H(f_0, \Delta f) = \frac{U_H(f_0, \Delta f)}{P_H(f_0, \Delta f)}, \quad (2)$$

в числителе и знаменателе которой соответственно выходное напряжение

гидрофона и действующее на гидрофон звуковое давление, измеренные в полосе частот $[f_0 - \Delta f/2, f_0 + \Delta f/2]$. На рис. 3 представлена схема измерительного эксперимента по градуировке гидрофона Н в полосе частот Δf . Излучатель Р возбуждают широкополосным случайным сигналом. Широкополосный акустический шум излучателя принимают гидрофоном. Выходной сигнал гидрофона усиливают и пропускают через фильтр с полосой пропускания $[f_0 - \Delta f/2, f_0 + \Delta f/2]$, выходное напряжение гидрофона в полосе частот $U_H(f_0, \Delta f) = \frac{1}{\Delta T} \sqrt{\int_0^T x^2(t) dt}$ измеряют на выходе фильтра вольтметром СКЗ значения.

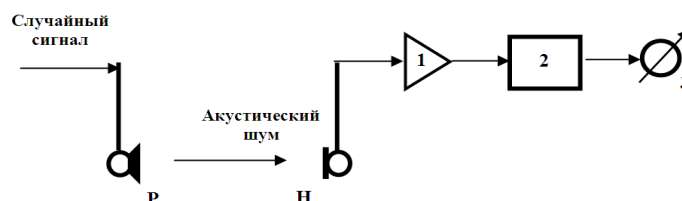


Рис. 3. Схема измерительного эксперимента: 1 - усилитель, 2 – полосовой фильтр, 3 – вольтметр СКЗ значения

Отметим, что заданная в соответствии с (2) чувствительность определяется не только частотными свойствами самого гидрофона, но и является функцией принимаемого гидрофоном сигнала, проконтролировать характеристики которого в точке приема проблематично - спектр $G_P(f)$ будет зависеть от резонансных свойств излучателя. Кроме того, необходимо обеспечить условия свободного поля для непрерывного сигнала, что обуславливает высокие требования к заглушению бассейна, либо заставляет применять специальные методы селекции прямого и отраженных сигналов. Как будет показано далее, применение метода временной селекции вызывает дополнительные сложности, связанные с отличием спектра непрерывного полосового псевдослучайного сигнала от спектра импульсов, вырезанных из этого сигнала, соотношением сигнал/шум и искажениями импульса переходными процессами в полосовых фильтрах. Ниже известные методы измерений шумового сигнала в отражающем бассейне будут рассмотрены и проанализированы с точки зрения возможности их применения для градуировки приемника подводного шума.

Градуировка в звуковом поле непрерывной волны

Об использовании случайного шума для градуировки гидрофона сообщалось еще в 1953 г. [12], однако точность метода оставляла желать

лучшего и была ограничена доступными в то время возможностями математической обработки. Первые исследования звукового поля в незаглушенном бассейне ВНИИФТРИ были выполнены Д.З. Лопашевым в 1963 г. Исследования поля, формирующегося при излучении полос белого шума, им были выполнены методами архитектурной акустики [13].

В результате исследований для бассейна ВНИИФТРИ были определены: частотная зависимость времени реверберации, области «свободного» и диффузного звуковых полей, а также значение граничного радиуса – расстояния перехода от поля бегущих волн к диффузному полю. Под областью «свободного» поля здесь следует понимать область пространства, в которой изменения уровня звукового давления в зависимости от расстояния r до излучателя отклоняются от закона $1/r$ на приемлемую для того времени величину – не более чем на 1 дБ. Для полос белого шума шириной 3 кГц эта область (за исключением резонансной частоты излучателя) оказалась ограничена расстояниями 30–60 см до излучателя. Экспериментальное значение граничного радиуса равно ~ 1 м.

В отличие от воздушной акустики время реверберации бассейна очень слабо зависит от частоты и находится в пределах 0,3–0,4 с. На расстояниях 2,5–3,5 м от излучателя звуковое давление примерно постоянно (максимальное отклонение уровня звукового давления от среднего значения не превышает ± 1 дБ). Эта область была признана пригодной для использования в метрологических целях в качестве диффузного поля.

С увеличением производительности компьютеров и появлением высокоскоростных сигнальных процессоров возможности обработки сигналов и данных перестали быть серьезным ограничением, что позволило применять различные методы измерений с использованием случайных сигналов. Современные сигнальные процессоры позволяют выполнять автоматический «бортовой» расчет БПФ, взаимно и автокорреляционных функций, функций когерентности и т.д., что значительно повышает скорость градуировки. Обычно сигнальные анализаторы имеют выход, который может быть использован для формирования и возбуждения излучателя шумовым сигналом.

Однако результаты, полученные в [13] с использованием примитивной по нынешним меркам техники, и сегодня остаются актуальными, а точность градуировки рабочих измерительных гидрофонов практически не изменилась. Несмотря на прогресс, достигнутый в цифровых технологиях, никаких существенных продвижений в части расширения возможностей и повышения точности измерений в звуковом поле непрерывной шумовой волны до настоящего времени не произошло. Примером сказанному

может служить публикация [14], в которой измерение мощности акустического шума рассматривается применительно к градуировке гидроакустических излучателей. Работа [14] опубликована в 1998 г. и может рассматриваться как последняя заметная публикация по измерениям в поле непрерывной шумовой волны. Отсутствие активности в этом направлении косвенно указывает на всестороннюю его изученность, не оставляющую надежд на существенные новые результаты дальнейших исследований.

Градуировка по измерениям мощности шума

Способ измерения акустической мощности основан на использовании реверберации окружающей среды (реверберационной камеры или реверберационного резервуара). В [14], аналогично [13], полное акустическое давление в реверберационном поле представляют суммой вкладов прямого и реверберационного полей. На графике зависимости квадрата полного акустического давления от обратного квадрата расстояния выделяют участок, который выглядит, как отрезок прямой. Квадратный корень из градиента зависимости на этом участке дает оценку производительности источника – произведения звукового давления на расстояние до излучателя. Звуковое давление в эксперименте измеряют всенаправленным отградуированным гидрофоном небольшого размера.

Так же, как в [13], авторы [14] приходят к следующим выводам:

- длина отрезка прямой зависит от общей акустической мощности;
- на достаточном расстоянии от излучателя реверберационное поле будет доминировать (постоянно и не зависит от положения приемника);
- поскольку границы в гидроакустическом бассейне не обладают высокой степенью отражения звука, метод дает возможность только сырой (оценочной) градуировки;
- отличия результатов измерения мощности излучателей от значений в свободном поле достигают 2 дБ.

Градуировка на шуме методом замещения

Градуировка методом замещения заключается в позиционировании градуируемого и опорного (с известной чувствительностью) гидрофонов в одну и ту же точку акустического поля. Анализ выполняют в частотной области. Чувствительность $M_H(f)$ градуируемого гидрофона, как функцию частоты, рассчитывают по формуле:

$$M_H(f) = \frac{F_H(f)}{F_R(f)} M_R(f),$$

где $M_R(f)$ – частотная зависимость чувствительности опорного гидрофона, $F_H(f)$ и $FR(f)$ – спектры сигналов, измеряемых градуируемым и опорным гидрофоном соответственно.

Чтобы получить данные, пригодные для использования в расчетах, измеряемые спектры сглаживают, усредняя сигнал в частотной области (усреднение может потребовать до 100 спектров).

Для рассматриваемого метода важно, чтобы давление, испытываемое каждым гидрофоном, было одним и тем же. Хорошим показателем того, выполняется ли это условие, является рассмотрение функции когерентности:

$$\gamma_{XY}^2(f) = \frac{|G_{XY}(f)|^2}{G_{XX}(f)G_{YY}(f)},$$

где $G_{XY}(f)$ – взаимная спектральная плотность двух сигналов, G_{XX} и G_{YY} – спектральные плотности мощности каждого из этих сигналов соответственно. Для двух когерентных сигналов когерентность равна единице, и величину, на которую когерентность меньше единицы, используют в качестве индикатора справедливости предположений в рамках метода.

График кривой когерентности можно использовать для вычисления веса каждой частотной точки данных. Экспериментально установлено, что когерентность может меняться в зависимости от положения гидрофонов в бассейне [14].

Чтобы звуковое давление, действующее на оба гидрофона, было одним и тем же, гидрофоны необходимо поместить в воду одновременно и расположить в бассейне близко друг к другу. Это позволяет принимать сигналы двух гидрофонов одновременно, рассчитывать когерентность для проверки применимости метода и автоматически в реальном времени рассчитывать разность спектров анализатором сигналов. Недостатки одновременного измерения проявляются в том, что два гидрофона одновременно не могут быть расположены в той же самой точке бассейна (соответственно в одной и той же точке звукового поля), а присутствие близко расположенного второго приемника является причиной возможного влияния на звуковое давление, принимаемое гидрофоном.

Альтернативная процедура заключается в последовательных измерениях для каждого из гидрофонов с использованием техники подстановки или замещения. Недостатки процедуры: занимает больше времени, не позволяет воздействовать на оба приемника одним и тем же звуковым полем одновременно (что было бы идеальным), не обеспечивает одновременного

измерения двух сигналов, которые будут участвовать в расчете функции когерентности.

Метод замещения можно улучшить, если использовать цифровую псевдослучайную последовательность. Такой сигнал может быть сохранен и повторно излучен для обоих гидрофонов, обеспечивая воздействие на каждый гидрофон точно одного и того же поля.

В бассейнах симметричной формы (прямоугольном или цилиндрическом с плоским дном) располагать преобразователи лучше асимметрично, удаляя их от нулей либо пучностей поля, возникающих внутри бассейна из-за структурирования значимых низкочастотных мод. Желательно усреднять результаты, полученные для различных положений преобразователей в бассейне. Это позволит усреднять изменения результатов вследствие изменения в положении преобразователей.

По опыту Национальной физической лаборатории Великобритании при достаточном усреднении в частотной области удается достичь воспроизводимости (иными словами СКО?) результатов 0,5 - 1,0 дБ.

Расчет чувствительности в полосе частот по частотной характеристике

Преобразование Фурье $\mathfrak{F}\{\bullet\}$ связывает временной сигнал $x(t)$ с его представлением в частотной области $X(f) = \mathfrak{F}\{x(t)\}$. Теорема Парсеваля

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\mathfrak{F}\{x(t)\}|^2 df$$

выражает унитарность преобразования Фурье - сумма (или интеграл) квадрата функции равна сумме (или интегралу) квадрата результата преобразования - и позволяет вычислять СКЗ сигнала в частотной области как СКЗ спектра сигнала.

Для сигнала излучения с распределенным в полосе частот $[f_0 - \Delta f/2, f_0 + \Delta f/2]$ спектром мощности $G_P(f)$ звуковое давление $P_p(f_0, \Delta f)$ и выходное напряжение $U_H(f_0, \Delta f)$ в полосе частот рассчитывают по формулам:

$$P_H(f_0, \Delta f) = \sqrt{\int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} G_P(f) df}, \quad U_H(f_0, \Delta f) = \sqrt{\int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} M_H^2(f) G_P(f) df}.$$

Соответственно чувствительность гидрофона может быть получена как отношение:

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

Полученные формулы не снимают названных выше проблем, обусловленных зависимостью чувствительности от спектра принимаемого гидрофоном сигнала, необходимостью обеспечивать условия свободного поля и т.п. Преодолеть указанные проблемы позволяет следующий прием.

В условиях априорной неопределённости относительно спектральных свойств измеряемого в натурных условиях шума наиболее простым и универсальным решением может стать использование при градуировке шума с равномерным в полосе частот спектром $G_P(f) = a^2, f \in \left[f_0 \pm \frac{\Delta f}{2} \right]$.

Поскольку в этом случае

$$G_P(f_0, \Delta f) = \sqrt{\int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} G_P(f) df} = a \Delta f$$

и

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

значение чувствительности в полосе частот $M_H(f_0, \Delta f)$ можно вычислить как СКЗ модуля частотной зависимости чувствительности в этой полосе частот:

$$M_H(f_0, \Delta f) = \frac{U_H(f_0, \Delta f)}{P(f_0, \Delta f)} = \frac{1}{\Delta f} \sqrt{\int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} M_H^2(f) df}. \quad (3)$$

Неоспоримым преимуществом введенного таким образом определения чувствительности является его независимость от вида тестового сигнала, используемого при градуировке, поскольку в формуле (3) отсутствует зависимость от спектра шума. Это преимущество позволяет **задачу измерения полосового случайного сигнала во временной области заменить задачей измерения частотной характеристики приемника**. Другими словами, для вычисления $M_H(f_0, \Delta f)$ необходимо любым способом измерить достаточно подробную зависимость $M_H(f)$ в свободном поле [7].

Задача получения такой характеристики кажется чрезвычайно простой: выполнить измерения чувствительности с шагом по частоте, выбранном исходя из формы АЧХ, тем более что арсенал методов, применяемых для измерений АЧХ акустических приемников, достаточно широк [8].

Для точной градуировки акустических приемников помимо традиционной техники временной селекции тонального импульса сегодня с успехом применяют спектрометрию временных задержек, гомоморфную время селективную постобработку, метод скользящего комплексного взвешенного усреднения. Покажем на простом примере, что на самом деле задача измерения подробной АЧХ далеко не так тривиальна. Предположим, что для расчета чувствительности в 1/3-октавной полосе 40000 Гц (см. рис. 1 а) будем брать 20 отсчетов на одну осцилляцию. Получим шаг по частоте около 260 Гц. Однако, если чувствительность измерять на тональном импульсе длительностью 4 мс (около 160 периодов сигнала), полученные значения чувствительности окажутся комплексно усредненными в полосе частот больше либо равной 500 Гц. Причина комплексного усреднения будет обсуждена далее при анализе методов измерений подробной частотной характеристики акустического приемника. Из многообразия методов, рассмотренных в [8], проанализируем методы, основанные на использовании широкополосного (шумового) тестового сигнала, с точки зрения применимости их для измерения непрерывных частотных характеристик приемника подводного шума.

Градуировка на шуме с использованием техники кросс-корреляции

Метод использует широкополосный сигнал, для устранения искажений, вызванных отражениями, применяют аподизацию кросскорреляционной функции:

$$\Gamma_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)y(t+\tau)d\tau,$$

где $x(t)$ и $y(t)$ - входной и выходной сигналы соответственно, τ - временная задержка [15].

Сигнал на выходе гидрофона в реверберационном поле бассейна загрязнен отражениями и может быть представлен в виде:

$$y(t) = \sum_{i=0}^{\infty} y_i(t - \frac{d_i}{c}),$$

где c - скорость звука в воде, $y_0(t)$ - прямой сигнал излучателя, удаленного от приемника на расстояние d_0 , $y_i(\tau)$ - эхо сигнал от граничной поверхности бассейна, пробежавший расстояние d_i .

Подставляя $y(t)$ в выражение для $\Gamma_{xy}(\tau)$, получим:

$$\Gamma_{xy}(\tau) = \Gamma_{xy_0}(\tau - \frac{d_0}{c}) + \sum_{i=1}^{\infty} \Gamma_{xy_i}(\tau - \frac{d_i}{c}).$$

Кросскорреляционная функция есть сумма взаимной корреляционной функции входного сигнала и прямого сигнала излучателя, задержанного относительно входного сигнала на время d_0/c , и кросс-корреляций входного сигнала с отражениями от граничных поверхностей, задержанных относительно входного сигнала на время d_1/c , d_2/c , и т.д. Если пики кросскорреляционной функции $\Gamma_{xy}(\tau)$ достаточно узкие, могут быть применены окна, которые выбирают только прямой сигнал и устраняют эхосигналы, оставляя их за пределами окна. С использованием оконной аподизации кросскорреляционной функции взаимная спектральная плотность входного и выходного сигналов может быть вычислена по формуле:

$$\tilde{G}_{xy}(f) = \mathfrak{Z}\{\tilde{\Gamma}_{xy}(\tau)\},$$

где символ $\sim$ над буквой означает использование оконной аподизации. Оценку передаточного импеданса пары излучатель-приемник $Z_{PH}(f)$ получают в виде:

$$Z_{PH}(f) = \frac{\tilde{G}_{XY}(f)}{\tilde{G}_{XX}(f)},$$

где G_{XX} - спектр (мощности) тока излучателя, G_{xy} - взаимная спектральная плотность тока и выходного напряжения приемника.

Метод имеет преимущества, если ширина пика кросскорреляционной функции меньше, чем $(d_1 - d_0)/c$, где d_1 - расстояние, пройденное первым эхо сигналом. Для этого требуется входной сигнал с узким пиком его автокорреляционной функции, т.е. автокорреляционная функция должна иметь широкую полосу пропускания в частотной области. Сигнал в виде Гауссова случайного шума соответствует этому требованию. Напомним, что функция когерентности должна быть близка к единице по соображениям, аналогичным рассмотренным выше.

Авторы метода заявили о различиях не более 1 дБ в результатах градуировок по полю в озере излучателя с добротностью 3,5. Для более высокодобротных излучателей пики взаимно корреляционной функции сигнала расширяются, что затрудняет различение пиков, поскольку окно выходит за отражения. Очевидно, что это снижает применимость метода в условиях лабораторного бассейна. Последнее обстоятельство наряду с большой (не менее 1 дБ) погрешностью говорят не в пользу применения этого метода для градуировки гидроакустического приемника в полосах частот.

Использование MLS-последовательности

MLS последовательность - это псевдослучайная последовательность двоичных значений (нулей и единиц), функция распределения которой выглядит как прямоугольник. MLS имеет ряд полезных свойств:

- широкополосный спектр;
- автокорреляционная функция - дельта-функция Дирака в окрестности начала координат;
- импульсную характеристику $h(\tau)$ линейной системы при воздействии на нее MLS последовательностью длиной N определяют по формуле:

$$h(\tau) = \frac{\Gamma_{XY}(\tau)}{2^N},$$

где $\Gamma_{xy}(\tau)$ - взаимно-корреляционная функция, которую для двоичного MLS можно рассчитать в реальном времени с использованием быстрого

преобразования Адамара. К полученной взаимно корреляционной функции применяют описанную выше оконную аподизацию.

Такие приемы в сочетании с гомоморфной обработкой применяли в воздушной акустике для низкочастотной градуировки излучателей в реверберационной камере [16]. Авторы метода использовали MLS – последовательность, чтобы уширить (в частотной области) полосу пропускания автокорреляционной функции. Методу присущи недостатки, свойственные описанным выше методам аподизации. Ширина используемой полосы усреднения также должна быть оптимально выбрана. Слишком узкой не хватает, чтобы устранить эхосигнал, слишком широкая сглаживает подлинные очертания искомой частотной характеристики.

Анализ применимости методов

Излучение шумового тестового сигнала позволяет перекрыть широкий диапазон частот от сотен герц до нескольких килогерц и быстро реализуем. Для ненаправленных гидрофонов удастся получить результат, отличающийся от градуировки в свободном поле не более чем на ± 1 дБ. При градуировке в бассейне нижний предел по частоте, как правило, ограничен способностью излучателя создавать полезный сигнал. На высококилогерцовых частотах, результаты чувствительны к точности позиционирования преобразователей (и влиянию других преобразователей, используемых при одновременном погружении). Другим ограничением является влияние направленности гидрофонов. Гидрофон усредняет звуковое давление по всей поверхности его чувствительного элемента, и так как звуковые волны приходят по многим направлениям, измеренная чувствительность оказывается усредненной по всем угловым ориентациям – следовательно, она отличается от отклика в свободном поле плоской волны в заданном направлении. Более того, поле внутри бассейна вряд ли является идеально диффузным, что затрудняет оценку расхождений результатов в связи с этим фактором. Влияние на результаты градуировки могут быть минимизированы использованием опорного гидрофона одного и того же типа, что и градуируемый гидрофон (либо устройств, имеющих аналогичные характеристики направленности).

Можно ожидать, что результаты градуировки, выполненной в реверберационном поле, будут отличаться от значений в свободном поле на коэффициент направленности. При измерениях на близких расстояниях к излучателю поле прямой волны доминирует и во время измерений желательно обеспечивать неизменность ориентации гидрофона и излучателя. Если бассейн не очень реверберационный, будет доминировать первое отражение и реверберационное поле не будет инвариантным к

положению гидрофона.

Сложности, связанные с обеспечением идентичности звуковых давлений, действующих на градуируемый и опорный гидрофоны, ограничивают распространение методов на практике. Невозможность обеспечить идентичность звуковых давлений при градуировке габаритного приемника становится принципиальным препятствием применимости методов для градуировки в полосах частот.

Неявное комплексное усреднение при градуировке акустического приемника в лабораторном бассейне

Рассмотрение комплексного усреднения при градуировке по полю в условиях лабораторного бассейна начнем, как это не покажется странным, с определения «свободное звуковое поле» в [9,10]: звуковое поле в однородной изотропной среде, границы которой оказывают пренебрежимо малое действие на звуковые волны. Однако, поле звуковой волны, как физическое явление, существует во времени и пространстве. «Свободное звуковое поле» означает всего лишь бесконечные пределы времени и пространства. К сожалению, в этом общепринятом определении явно присутствует только пространство с его границами. То, что воздействие границ должно быть пренебрежимо малым всегда, то есть на бесконечном интервале времени, присутствует в определении неявно. По-видимому, в этом следует искать причину раздельного восприятия времени и пространства и абсолютизации роли пространства в ущерб времени при использовании определения при градуировке акустического приемника. Тем самым понятие свободного поля было сведено к понятию свободного пространства, например, – пустая комната.

Бесконечность пространства (в контексте статьи - времени измерений), в силу неразрывной связи пространства и времени, означает бесконечное время измерения и, следовательно, бесконечно малое разрешение по частоте. Но и наоборот, конечное время измерений (например, конечная продолжительность Δt приемного строка в методе временной селекции) в силу частотно-временного соотношения неопределенностей означает, что разрешение по частоте при измерениях не может быть лучше, чем $\Delta f \geq 1/\Delta t$.

Чтобы измерить СКЗ шума судна, на полигоне используют временное окно (окно данных) продолжительностью примерно 1 с [3]. Применение такого окна дает «размытие» (комплексное усреднение) спектра в эффективной полосе частот шириной около 2 Гц (ширина главного лепестка спектра временного окна данных). В то же время, при градуировке в условиях лабораторного бассейна время существования свободного поля (аналог временного окна данных) обычно не превышает 4 мс. При измерениях с использованием временной селекции тонального сигнала это означает «размытие» частотной характеристики гидрофона в полосе 500 Гц.

То есть шум судна на полигоне пытаются измерить с разрешением 2 Гц, используя приемник, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) которого измерена с разрешением 500 Гц (что превышает половину ширины полосы пропускания 1/3-октавного фильтра 4 кГц). Это означает, что при подстановке АЧХ в формулу (3) получим двойное усреднение: одно – усреднение АЧХ по закону СКЗ в строго определённой полосе частот в соответствии с определением чувствительности приемника шума, другое – неявное, неконтролируемое комплексное усреднение в некоторой эффективной полосе частот, связанной с временем существования свободного поля, реализуемого при градуировке, частотно-временным соотношением неопределенности. Если учесть, что измерения на полигоне выполняют не гидрофоном с ровной частотной характеристикой, а приемником, пренебречь влиянием «размытия» частотной характеристики вследствие второго усреднения становится невозможным.

Традиционно применяемое понятие чувствительности в свободном поле навязывает использование при градуировке гармонического сигнала, поскольку значение чувствительности относится к «определенной частоте» [8, 9]. Напомним, что взаимосвязь амплитуды выходного напряжения и значения амплитудно-частотной характеристики на частоте гармонического сигнала базируется на математических абстракциях – преобразовании Фурье и теореме конволюции. При градуировке по полю на частоте f_0 в соответствии с МЭК 60565 необходимо получить передаточный импеданс пары излучатель-приемник: $Z_{PH}(f_0)$

$$Z_{PH}(f_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z_{PH}(f) \delta(f - f_0) df, \quad (4)$$

где $\delta(f_0)$ – спектр бесконечного по продолжительности тонального сигнала частоты f_0 . Поскольку интеграл Фурье в (2) берется в бесконечных пределах, измерения должны быть выполнены в звуковом поле, существующем бесконечно долго, другими словами, в свободном поле. То есть недопустимо конечное время существования либо конечная протяженность свободного поля в пространстве. Выражаясь образно, время выступает здесь как категория философская, у которого нет начала и нет конца. На практике, вследствие причинности физически реализуемой системы и конечности времени наблюдения, время из разряда философской категории переходит в разряд физической величины.

Так, в методе временной селекции продолжительность приемного строба Δt и существование свободного поля оказывается ограниченным по

пространству областью размером $r = c \cdot \Delta t$, где c – скорость звука в среде, а временной интервал Δt приобретает смысл времени существования свободного поля в точке приема. Таким образом, метод временной селекции неразрывным образом связал понятия свободного звукового поля и времени измерений (длительности приемного строба). Чтобы пояснить важность сделанного замечания, рассмотрим градуировку гидрофона **тонально импульсным методом**.

Временная селекция тонального импульса

При использовании временной селекции выходной сигнал приемника вынужденно обрывают по времени прихода первого отражения τ_{ref} , усекая принятый тональный сигнал прямоугольным временным окном. Для измерений амплитуды оказывается доступным лишь свободный от отражений участок принятого тонального сигнала на временном интервале $t < \tau_{ref}$. При этом, в соответствии с теоремой о свертке, вместо формулы (4) получим:

$$Z'_{PH}(f_0, \tau_{ref}) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z_{PH}(f) V_w(f - f_0, \tau_{ref}) df \neq Z_{PH}(f_0), \quad (5)$$

где $V_w(f - f_0, \tau_{ref}) = \delta(f_0) * V_w(f, \tau_{ref})$, $V_w(f, \tau_{ref})$ – спектр примененного временного окна, символ $*$ означает операцию конволюции (свертки). Для прямоугольного окна спектр

$$V_{\Pi}(f - f_0, \tau_{ref}) = \frac{\sin(\pi(f - f_0)\tau_{ref})}{\pi(f - f_0)\tau_{ref}} \exp[-j\pi(f - f_0)\tau_{ref}].$$

Функция $V_{\Pi}(f - f_0, \tau_{ref})$ задана на всей оси частот и вследствие этого не обладает явным фильтрующим свойством, как дельта функция $\delta(f_0)$ в формуле (4), к которой она слабо сходится с увеличением τ_{ref} . Время τ_{ref} – параметр, определяющий форму взвешивающей функции в текущий момент времени.

Отметим обескураживающий факт: утрата информации о выходной реакции системы вследствие усечения по времени в частотной области выражается детерминированной математической операцией – сверткой с взвешивающей функцией в формуле (3). Следствием свертки является «размытие» искомой частотной характеристики усреднением по частоте.

Предвосхитим попытки найти наглядное представление, объясняющее причинно-следственную связь между утратой информации о выходной

реакции системы во временной области и неизбежным последствием утраты этой информации - сверткой в частотной области. Напомним, что результат Фурье преобразования или спектр - это математический образ (на латыни «spectrum» – видение, образ, страшный призрак...), ничего общего не имеющий с реальным вещественным миром. В реальном мире наблюдают сигналы, которые описывают действительными функциями. Функции, полученные Фурье преобразованием, – это математические абстракции. Свертка спектра усеченной по времени функции – не больше, чем свойство Фурье преобразования – математической операции, которая создана и применяется в соответствии с определенными правилами математики. К этому эффекту имеет смысл относиться так же, как, например, к другой математической абстракции - биссектрисе, которая делит угол пополам, не исходя из каких либо физических реалий, а в силу того, что является математической абстракцией, именно таким образом определенной. То есть, не следует искать какого-либо физического смысла в «усреднении» (размытии) спектра сигнала, при усечении сигнала по времени. Усреднение происходит «по определению» Фурье преобразования, но поскольку этот факт неким счастливым образом совпадает с тем, что происходит на практике при измерениях частотных характеристик, его следует учитывать при измерениях по свободному полю в условиях ограниченного пространства.

Тем не менее, если неполноту выходной реакции системы вследствие отсечения части реакции на временном полуинтервале, следующем за моментом времени t , рассматривать во временной области как неопределенность состояния системы в момент времени t , то свертка частотной характеристики системы с ядром в виде взвешивающей функции характеризует в момент времени t эквивалентную неопределенность состояния системы в частотной области. Несмотря на то, что ядро свертки – детерминированная функция известного вида, исключить влияние свертки на результат измерений частотной характеристики, иными словами, исключить неопределенность системы (например, методом деконволюции, либо применяя другие способы коррекции экспериментальной частотной характеристики), не привлекая какой-либо дополнительной информации о системе, невозможно. В противном случае это означало бы возможность, располагая только усеченной по времени выходной реакцией системы, продлить реакцию сколь угодно точно на всю временную ось. Иными словами, если утрату информации о скрытой отражениями части принятого сигнала рассматривать как неопределенность сигнала во временной области, эквивалентом этой неопределенности в частотной области будет неизбежное «размытие» результата измерений по частоте, аналогичное «размытию» спектра» в частотном анализе.

Таким образом, значение, $Z'_{PH}(f_0, \tau_{ref})$ волонтаристски приписываемое частоте f_0 , никогда не равно искомому $Z_{PH}(f_0)$, но может рассматриваться как результат взвешенного комплексного усреднения $Z_{PH}(f)$ по частоте. Близость значений $Z'_{PH}(f_0, \tau_{ref})$ и $Z_{PH}(f_0)$ при градуировке широкополосных преобразователей не означает их идентичности, что проявляется в расхождении значений для резонансных (узкополосных) преобразователей. Заметим, что в силу особенностей взвешивающей функции $V_{II}(f - f_0, \tau_{ref})$ при всех равных прочих условиях влияние $Z_{PH}(f)$ на результат усреднения тем меньше, чем удаленнее частота f от f_0 . Другими словами, бесконечные пределы интегрирования в формуле (5) могут быть без ущерба точности результата заменены на конечные, поскольку основной вклад в интеграл вносит участок $Z_{PH}(f)$, заключенный в конечного размера окрестности частоты f_0 . Эту окрестность принято называть эффективной полосой частот, а ширину полосы Δf_{eff} выражать величиной, кратной ширине главного лепестка спектра $2/\tau_{ref}$. Связь между шириной эффективной полосы Δf_{eff} и временем, предшествующим отражениям τ_{ref} , подчинена универсальному частотно-временному соотношению, известному как соотношение неопределенности $\tau_{ref} \cdot \Delta f_{eff} \geq 1$. Таким образом, в тонально импульсном методе разрешение по частоте Δf_{eff} всегда оказывается хуже $1/\tau_{ref}$ - расстояния между линиями БПФ преобразования выборки продолжительностью τ_{ref} .

Соотношение неопределенности изменяет смысловую нагрузку результата измерений методом временной селекции, уменьшая долю упомянутого выше волонтаризма. Полученное значение $Z'_{PH}(f_0, \tau_{ref})$ может быть с одинаковым успехом приписано любой частоте в пределах эффективной полосы.

Размытие по частоте - недостаток, присущий и другим методам измерений, есть неизбежное следствие выполнения градуировки по полю в условиях ограниченного пространства. Отличительным недостатком, препятствующим применению тонально-импульсного метода для градуировки гидроакустического приемника в полосах частот, остается чрезмерная продолжительность измерения подробных АЧХ. Измерения АЧХ гидрофона на 1/3-октавных частотах с использованием современного рабочего эталона типа РЭ 1-5 ВМФ-М занимают от 2 до 3 часов. Для того, чтобы учесть индивидуальные особенности частотной характеристики гидрофона ГГ-26 (в частности, возможные смещения резонансов) при расчете чувствительности в полосах частот, измерять частотную характеристику для гидрофонов этого типа достаточно с шагом 1/12 октавы.

Для гидрофонов типа 1П4М шаг по частоте требуется дробить до $1/72$ октавы. Чтобы учесть влияние волны, рассеянной носителем, шаг в $1/72$ октавы оказывается недостаточно мелким, и требуется получать более подробные частотные характеристики в сравнении с характеристиками гидрофона в отсутствие носителя [7]. При этом измерения АЧХ растягиваются во времени до 2 – 3 недель, что приводит к нарушению одного из основных принципов метрологии – требование единства условий при измерениях.

Гомоморфная время селективная постобработка

Получение подробной частотной характеристики по полю методом время селективной гомоморфной (относительно преобразования Фурье) постобработки (ГПО), Технический университет Дании, 2003 г. выглядит следующим образом [17]. В реверберационном поле помещения с отражающими стенами измеряют подробную комплексную частотную зависимость пары излучатель-приемник. К полученной искаженной отражениями частотной зависимости применяют обратное Фурье преобразование, переходя, таким образом, из частотной области в квазивременную область временных задержек – квефренций. Полученный кепстр представляет собой последовательность из искомой импульсной характеристики пары излучатель-приемник в свободном поле и сдвинутых относительно нее по оси квефренций в порядке прихода отражений в точку приема копий импульсной характеристики.

Полученный кепстр усекают окном по квефренции $\tau_q < \tau_{ref}$, оставляя незануленной свободную от отражений часть исходного кепстра. Частотную характеристику в свободном поле получают прямым преобразованием Фурье усеченного кепстра. Результирующая частотная зависимость не будет искажена отражениями, но при этом может существенно отличаться от искомой частотной характеристики в свободном поле. Повторимся, Фурье-преобразование (прямое либо обратное) преобразует свертку в произведение и наоборот. Если усечение по квефренции представить себе как умножение кепстра на квазивременное окно (прямоугольной либо заданной формы) продолжительностью τ_q , то преобразование Фурье усеченного кепстра есть свертка искомой частотной характеристики и спектра примененного окна, эквивалентна усреднению искомой частотной характеристики в эффективной полосе частот Δf_{eff} .

Другими словами, при реализации условий свободного поля происходят два действия, находящиеся в диалектическом противоречии. Одно действие имеет собой положительный результат – частотную зависимость очищают от искажений, вызванных отражениями, но результат другого действия противоположен по смыслу первому – искомую частотную характеристику

искажают («размывают»), усредняя по частоте, что составляет «плату» за выигрыш от действия первого. При этом ширина частотной полосы «размытия» Δf_{eff} зависит от типа и параметров применяемого окна, а ее связь с временем $\Delta \tau_{ref}$, предшествующим отражениям, подчинена известному соотношению неопределённости $\Delta f_{eff} \geq 1/\Delta \tau_{ref}$.

Помимо размытия по частоте использованию метода ГПО для градуировки гидроакустических приемников препятствуют два недостатка. Первый недостаток, как и в случае тонально-импульсного метода, обусловлен чрезмерной продолжительностью измерений подробных АЧХ на тональных сигналах. Второй вызван необходимостью сохранять в процессе эксперимента гомоморфность постобработки. На практике это означает необходимость измерять АЧХ, что называется, «от нуля до нуля», то есть в частотном диапазоне, далеко простирающемся за границы рабочего диапазона излучателя и приемника как в сторону низких, так и в сторону высоких частот. При этом, чтобы обеспечить необходимое отношение сигнал/шум, градуировку микрофона с использованием ГПО выполняют в заглушенной камере, которую в данном случае используют для изоляции от внешних шумов [17]. В отличие от воздушной акустики обеспечить такие условия при измерениях в лабораторном гидроакустическом бассейне не представляется возможным.

Спектрометрия временных задержек

Продукт технологического прогресса в аналоговой технике – метод спектрометрии временных задержек (СВЗ) разработан в лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института США в 1967 г. Метод позволил разделять в реальном времени прямой и отраженный ЛЧМ сигналы, основываясь не на разнице их времен прихода, как в методе временной селекции, а на разнице их мгновенных частот $S \cdot \tau_{ref}$ (где S – скорость нарастания частоты ЛЧМ сигнала) [18]. Сигнал приемника гетеродинируют и подают на фильтр промежуточной частоты (ФПЧ), настроенный на прямой сигнал. Ширина полосы пропускания ФПЧ $\Delta F_{IF} \leq S \cdot \tau_{ref}$ и время интегрирования ΔT_{IF} ФПЧ связаны отношением $\Delta T_{IF} = 1/\Delta F_{IF} \geq 1/S \cdot \tau_{ref}$, при этом частотный интервал усреднения ЛЧМ сигнала пропорционален скорости нарастания частоты и времени интегрирования ФПЧ: $\Delta f_{eff} = S \Delta T_{IF} \geq 1/\tau_{ref}$.

И вновь приходим к универсальному соотношению неопределенностей, которое, как и в тонально-импульсном методе, связывает время, предшествующее отражениям, и ширину частотной полосы «размытия» измеряемой характеристики. Соотношение неопределенностей объясняет кажущийся парадокс: чем уже полоса пропускания ФПЧ (чем лучше сигнал

очищен от отражений, тем больше время и шире полоса частот усреднения, и тем сильнее будет искажена, «размыта» усреднением в полосе частот) искомая частотная характеристика.

Теоретически, метод СВЗ позволяет получать АЧХ со сколь угодно малым шагом по частоте с несоизмеримо высокой, по сравнению с тонально импульсным методом и ГПО, производительностью. Однако это преимущество нивелируется недостаточным подавлением искажений АЧХ, вызванных отражениями [18], вследствие чего метод СВЗ заметно уступает сегодня в точности тонально-импульсному методу.

Абсурдность ситуации с классификацией методов градуировки по полю

Проблемы соответствия результатов измерений чувствительности в ограниченном пространстве классическому определению чувствительности в свободном поле можно продемонстрировать на примере метода ГПО. В полном соответствии с классическим определением чувствительность микрофона определяют на гармонических сигналах, измеряя в безэховой камере (в свободном звуковом поле) комплексную частотную зависимость пары излучатель-приемник. С повышением точности градуировок потребовалось уменьшить осцилляции частотной зависимости, обусловленные малыми остаточными отражениями в безэховой камере. Для этого к комплексной частотной зависимости применяют ГПО, которая не затрагивает физической сути эксперимента. Однако итог обработки оказывается более чем неожиданным: в соответствии с предложенной в [8] классификацией полученный результат из «free-field» (измерения в свободном поле) становится «reverberation limited» (измерения в присутствии отражений), минуя стадию «echo-free» (измерения в отсутствии отражений - тонально-импульсный метод). Хотя усечение кепстра в ГПО не приводит ни к чему худшему, чем к рассмотренному выше размытию по частоте, характерному и для тонально импульсного метода. И наоборот, если измерения выполнить для той же геометрии эксперимента в реверберационной камере, то применение ГПО приведет к тому же результату, что и в безэховой камере (в свободном поле).

При рассмотрении результатов градуировки по полю используют два критерия: первый - в каких физических условиях выполнялись измерения, второй – какими свойствами обладает полученный результат градуировки. В соответствии с первым критерием метод ГПО – это метод свободного поля. В соответствии со вторым – «reverberation limited». Какой из критериев следует выбрать - это вопрос о том, что наносит больший ущерб точности результата: искажения отражениями или искажения размытием по частоте вследствие постобработки.

Следуя определению свободного поля, при оценке возможности градуировки по полю с требуемой точностью, необходимо учитывать свойства измерительной системы, градуируемого приемника и применяемого метода измерений. Если отражения вносят малый вклад в суммарную неопределенность – ситуация свободного поля вне зависимости от свойств измерительной системы и градуируемого приемника. Если отражения существенны и время установления сигнала при измерениях существенно больше запаздывания отражения в точку приема (размытие по частоте существенно искажает результат), то градуировка по полю невозможна. В промежуточных ситуациях решения достигают выбором оптимального метода. Для тонально-импульсного метода, как и для ГПО, величина отсекаемого отражения не имеет значения. Важно запаздывание отражения, которое определяет размытие результата в частотной области. Если размытие искажает – градуировка не по полю, если не искажает – по полю. Таким образом, при одном и том же запаздывании отражения произведение $\Delta t_{ref} \cdot \Delta f_{eff}$, входящее в частотно-временное соотношение неопределенностей является критерием сравнения оптимальности выбираемого способа обработки.

При неизменном расположении излучателя и приемника в отражающем бассейне Δt_{ref} не зависит от выбранного метода измерений, поскольку имеет смысл запаздывания отражения в точку приема. Другая ситуация с размытием по частоте. В методе СВЗ запаздывание отражения в точку приема приводит к сдвигу мгновенной частоты ЛЧМ сигнала, равному произведению Δt_{ref} на скорость развертки частоты. Для выделения прямого сигнала применяют фильтр с полосой ΔF_{IF} , которую не следует путать с Δf_{eff} , поскольку размытие результата в частотной области пропорционально постоянной времени фильтра, которая обратно пропорциональна полосе ΔF_{IF} .

Затрагивая тему целесообразности и обоснованности разделения на измерения по полю «по определению» и способы пересчета, заметим следующее. Буквальное понимание понятий «свободное поле» и «градуировка в свободном поле» приводит к необоснованному противопоставлению условий, а соответственно и методов градуировки, на самом деле родственных хотя бы в том смысле, что они относятся к одному и тому же отражающему бассейну. Не требует большого труда показать, что при градуировке в отражающем бассейне и временную селекцию и методы измерений в звуковом поле непрерывной волны можно рассматривать с общих позиций, как соответствующую математическую обработку, выполняемую явно или неявно. Примеры явно выраженной математической обработки численными методами - СКВУ и гомоморфная постобработка. Примеры аналоговой реализации математической обработки - метод СВЗ и

метод временной селекции. В первом роль аналоговой вычислительной машины выполняют система гетеродинирования сигнала и ФПЧ. Во втором аналоговая система стробирования обеспечивает как требуемое усечение тонального сигнала по времени, так и одновременное уширение спектра. Благодаря компьютерным технологиям эти и многие другие аналоговые операции сегодня с успехом реализуют цифровыми методами. Нередко не придают также значения тому, что на выделении прямого сигнала излучателя математическая обработка не заканчивается. За этим этапом следует оценивание параметра, чаще всего значения амплитуды выделенного сигнала, и, наконец, оценка близости полученного значения искомой величине (то есть определение погрешности). Так что, по сути, приведенные примеры – это лишь различные способы реализации математических преобразований.

С точки зрения качества условий свободного поля, реализуемых в бассейне заданной геометрии, рассмотренные выше методы будут различаться лишь константой $k = \Delta f_{eff} \cdot \tau_{ref}$. Чем ближе значение k к единице, тем меньше полоса усреднения по частоте и вызванные усреднением искажения, которые претерпевает искомая частотная характеристика. Именно с позиций минимизации соотношения неопределенностей целесообразно рассматривать приведенные в [8] методы градуировки в акустическом поле непрерывной волны с применением техники сглаживания или усреднения, градуировку в поле случайного шума, технику кросс-корреляционной обработки, деконволюцию в кепстральной области, моделирование акустического поля в бассейне, методы, использующие направленность протяженного приемника и гидрофонной антенны, наконец, методы минимизации соотношения неопределенностей на основе привлечения априорной информации о системе излучатель-приемник: экстраполяция сигнала путем моделирования его установившейся части, продолжение отклика с использованием простых моделей преобразователя, подавление переходного процесса.

Несмотря на то, что в различных измерительных ситуациях частотно-временное соотношение неопределенностей проявляет себя различным образом, оно позволяет с единых позиций рассматривать методы, применяемые при градуировке акустических приемников по полю. С точки зрения соотношения неопределенностей, рассмотренные в настоящей статье методы основаны на использовании времени, предшествующего отражениям, и невозможно назвать универсальный метод измерений либо уникальный тестовый сигнал, которые бы, безусловно, обладали лучшими качествами вне зависимости от условий измерений. Принципиальность

различий в их реализации (присутствие либо отсутствие отражений при измерениях) оказывается лишь кажущейся таковой на первый взгляд.

Отсутствие отражений не является достаточным условием свободного поля. Запаздывание отраженной волны должно быть настолько большим, а соответствующее этому запаздыванию частотная полоса усреднения настолько узкой, чтобы усреднение не вызывало искажений измеряемой частотной зависимости. В противоположность традиционным представлениям, в терминах соотношения неопределенностей методы пересчета – более методы «свободного поля», чем метод временной селекции тонального импульса, поскольку обеспечивают меньшую ширину частотной полосы усреднения, соответственно, меньшее «размытие» результата измерений по частоте. Упомянутая принципиальность различий методов есть лишь следствие несовершенства традиционно применяемых при градуировке акустического приемника понятий «свободное поле» и «градуировка в свободном поле».

Выбор метода для градуировки приемника в полосах частот

В рассмотренных выше методах условия свободного поля реализуют усечением измеряемого сигнала или частотной характеристики либо напрямую, либо опосредованно во временной (квазивременной) области. Усечение влечет «размытие» частотной характеристики как следствие вызываемого усечением усреднения по частоте. Но если прочитать соотношение неопределенности в обратном направлении, то «размытие» в частотной области должно вызывать соответствующее усечение во временной области. Очевидный пример. Если спектр тонально-импульсного сигнала заданной длительности рассматривать как своего рода «размытие» спектра бесконечного по продолжительности гармонического сигнала, то, излучая этот сложный спектр, на приеме получим исходный тональный импульс заданной длительности. Такой дуализм частотно-временного соотношения неопределенностей наводит на мысль, что искусственное «размытие» по частоте характеристики (например, оконным усреднением) должно исключать искажения, вызванные отражениями.

На этой идее основана реализация условий свободного поля скользящим комплексным взвешенным усреднением (СКВУ) частотной зависимости пары излучатель-приемник, измеренной в реверберационном поле среды с отражающими границами (ВНИИФТРИ, 2005 г.) [7]. Способ получения обрабатываемой СКВУ комплексной частотной зависимости значения не имеет. Упрощенно суть метода можно представить следующим образом. Искажения частотной зависимости, вызванные отражением, запаздывающим в точке приема относительно прямого сигнала на время τ_{ref} , устраняют скользящим усреднением частотной зависимости в частотном интервале

шириной $1/\tau_{ref}$, и в этом случае произведение $\Delta\tau_{ref} \cdot \Delta f_{eff}$ минимально и равно 1. Если отражений несколько, для каждого подавляемого отражения с номером i используется свой интервал усреднения $\Delta f_i = 1/\tau_{ref_i}$. Влияние отражений устраняют последовательными скользящими усреднениями в частотных интервалах, соответствующих запаздываниям отражений, либо одним взвешенным скользящим усреднением в частотном окне $\Delta f_{wa} = \sum_i 1/\tau_{ref_i} > 1/\tau_{ref}$ [7].

Неоспоримыми преимуществами метода СКВУ является минимальное, в сравнении с рассмотренными выше методами, размытие по частоте и то, что обработку СКВУ применяют к компактному фрагменту частотной зависимости, измеряемой в рабочем частотном диапазоне излучателя. По точности получаемого результата СКВУ не уступает тонально-импульсному методу [19]. Реализация метода СКВУ при излучении ЛЧМ сигналов требует малое, как и в методе СВЗ, время для измерения практически непрерывных АЧХ. Метод позволяет привлекать дополнительную информацию о поведении искомой частотной характеристики – априорную либо полученную в процессе обработки, и тем самым, повышать качество подавления искажений, вызванных отражениями. Вместе с тем, в основе СКВУ лежит все то же фундаментальное соотношение неопределенностей, которое связывает частотный интервал взвешенного усреднения и запаздывание отражений в точке приема.

Таким образом, с точки зрения формулируемой в статье измерительной задачи наиболее перспективным методом является СКВУ, который обладает преимуществами перед тонально-импульсным методом, ГПО и СВЗ. При всех прочих равных условиях частотное размытие результата, полученного методом СКВУ, минимально. Коснемся еще одной важной возможности, которая делает выбор в пользу СКВУ неоспоримым.

Тонально-импульсный метод, ГПО и СВЗ – каждый из этих методов основан на использовании только одного типа сигналов: тонально-импульсного, тонального и ЛЧМ сигнала соответственно. При рассмотрении метода СКВУ умышленно не обсуждался способ измерения комплексных частотных зависимостей и вид излучаемых сигналов, поскольку обработке СКВУ подвергают компактный фрагмент комплексной частотной зависимости, независимо от способа ее получения и вида излучаемого сигнала. При излучении могут быть использованы тональные, ЛЧМ, шумовые и детерминированные полосовые сигналы. Высокая эффективность подавления отражений с помощью простейшей математической обработки (скользящего комплексного усреднения) частотной зависимости объясняется тем, что математическая обработка в

методе СКВУ реализует одно- или многополюсный пространственный фильтр, настроенный с учетом акустических свойств бассейна, в котором частотная зависимость измерена.

Градуировка в полосах частот

Комплексное усреднение в частотной области при градуировке по полю в бассейне (контролируемое, как в методе СКВУ, или неконтролируемое) деструктивно и ухудшает результат градуировки. Энергетическое усреднение частотной характеристики в полосе частот не только позволяет получать значения чувствительности, адекватные решаемой на полигоне измерительной задаче, но и имеет дополнительные преимущества.

За рамками рассмотрения настоящей статьи оставлено такое преимущество градуировки в полосе частот, как уменьшение области приема («акустического размера» приемника) при расширении полосы частот принимаемого шума [7]. Этот эффект изменяет общепринятый подход к оценке расстояния дальнего поля и при определенных условиях позволяет выполнять градуировку приемников больших габаритов в лабораторном бассейне.

Градуировка в полосах частот при излучении ЛЧМ сигнала

Процедура измерения частотной характеристики пары излучатель-приемник в свободном поле по частотной зависимости пары в реверберационном поле отражающего бассейна при излучении квадратурно-дополненных ЛЧМ сигналов схематично изображена на рис. 4.

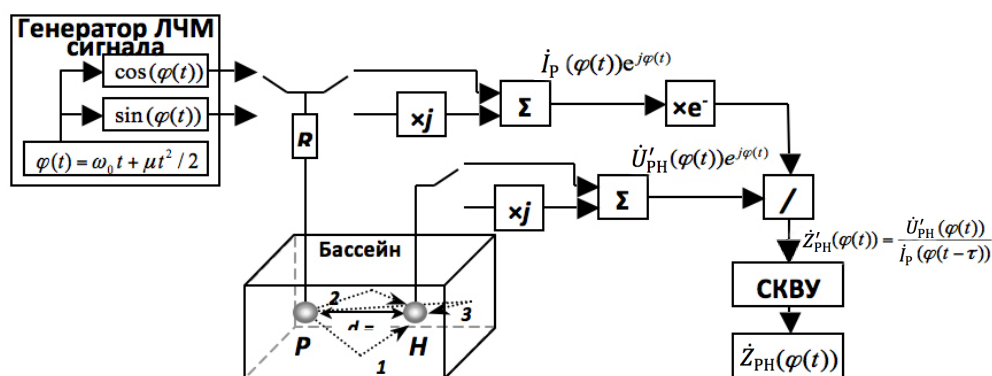


Рис. 4

Излучением через реверберационную паузу квадратурно дополненных (сдвинутых на $\pi/2$) ЛЧМ сигналов $x_{re}(t) = \cos(\phi(t))$ и

$x_{re}(t) = \sin(\phi(t))$ ($\phi(t) = \frac{St^2}{2}$, $f(t) = \frac{\partial\phi(t)}{\partial t} = St$ соответственно мгновенные фаза и частота ЛЧМ сигнала, S – скорость развертки частоты), реализуют комплексный ЛЧМ сигнал излучения $x(t) = x_{re}(t) + jx_{im}(t)$. Комплексный принятый сигнал $y(t) = y_{re}(t) + jy_{im}(t)$ получают объединением его действительной $y_{re}(t)$ и мнимой $y_{im}(t)$ части - реакций на излучение $x_{re}(t)$ и $x_{im}(t)$ соответственно. Такой подход позволяет получать комплексную частотную зависимость пары излучатель-приемник в реверберационном поле отражающего бассейна $Z'_{PH}(f)$, $f = St$ как отношение мгновенных значений принятого сигнала $y(t)$ и излученного сигнала $x(t)$, избегая операции гетеродинирования (характерно для СВЗ) и детектирования (обязательно для СВЗ и тонально-импульсного метода). Полученную зависимость подвергают СКВУ, подавляя тем самым влияние отражений:

$$\tilde{Z}_{PH}(f, \Delta f_{wa}) = \frac{1}{\Delta f_{WT}} \int_{f - \frac{\Delta f_{wa}}{2}}^{f + \frac{\Delta f_{wa}}{2}} Z'_{PH}(f - f') W_{CMWA}(f') df',$$

где $Z_{PH}(f, \Delta f_{wa})$ – оценка передаточного импеданса пары излучатель-приемник в свободном поле, $W_{CMWA}(f)$ – взвешивающая функция, отличная от нуля в частотном интервале усреднения Δf_{wa} [7]. Форму взвешивающей функции подбирают, исходя из временных задержек первых (обычно не более трех) значимых отражений таким образом, чтобы кепстр взвешивающей функции на квефренциях отражений был близким или равным нулю, нормирующий множитель Δf_{WT} вычисляют как произведение величин, обратных временным задержкам учитываемых отражений [7].

Процедура реализована в виде программно-аппаратного комплекса для градуировки гидрофона в частотном диапазоне 250 Гц – 300 кГц. Аппаратную часть комплекса составляют измерительные приборы (усилитель мощности Tabor 9400, предварительный усилитель SR 560, устройство коммутационное УК, устройство входного усилителя УВ), автоматизированная система позиционирования, набор излучателей и обратимых преобразователей, управляющая система эталонной установки Э-4 ГЭТ 55-2011. ПЭВМ управляющей системы дооснащена виртуальными генератором и осциллографом, реализованными на базе устройства АЦП/ЦАП 14/2 фирмы ZetLab: частота преобразования 4/10 МГц, передача данных по шине PCI, 14-разрядный АЦП, 16-разрядный ЦАП.

Результаты проведенных экспериментов показали:

- программно-аппаратная реализация метода СКВУ частотной зависимости, полученной при излучении ЛЧМ сигнала, является высокопроизводительным инструментом измерения подробной частотной характеристики чувствительности гидрофона по полю в бассейне с отражающими границами;

- подавление СКВУ трех первых отражений ослабляет остаточные искажения частотной характеристики отражениями до величины, не превышающей 0,5 %, что превосходит возможности СВЗ и оказывается вполне достаточным для применения предложенной реализации метода СКВУ для эталонных градуировок по полю;

- эффективно подавляя влияние отражений, СКВУ позволяют выделять не только скалярную, но и векторную величину поля прямой волны, что дает возможность для передачи единицы векторным приемникам в условиях их применения по назначению – в свободном поле бегущей звуковой волны [20].

Градуировка по полю в «диффузном» поле звуковой волны

Для любого специалиста в области акустики набор слов, выведенных в название настоящего раздела, звучит как абракадабра. Исключением может быть обратная операция. Определение частотной характеристики шумомера по диффузному полю в условиях свободного поля - это не абракадабра, а требования стандарта на методы испытаний шумомера. Градуировка по полю подразумевает выполнение при измерениях идеальных условий для беспрепятственного распространения бегущей звуковой волны. Диффузное поле по смыслу, заложенному в этот термин, также означает идеальное звуковое поле, но в определенном смысле противоположное свободному полю. Совместное использование этих понятий в контексте рассматриваемой задачи – абсурдно, поскольку каждое из понятий является отрицанием другого.

Диффузное поле определено как поле, одновременно являющееся изотропным (направления распространения звуковой волны в каждой точке равновероятны) и однородным (плотность энергии в заданной области пространства статистически равномерна) [9]. Следствиями, вытекающими из этого определения, являются отсутствие зависимости звукового давления при изменении расстояния между излучателем и приемником и отсутствие в диффузном поле свойства «направленности» приемника. Таким образом, в диффузном поле по определению отсутствуют условия, необходимые для градуировки по полю. Но, как будет показано ниже, не следует путать определение физического явления и реализацию этого определения на практике.

Диффузное поле создают в реверберационной камере (бассейне с отражающими стенками) при непрерывном излучении акустического шума для того, чтобы обеспечить выполнение третьего условия диффузного поля – случайности фаз акустических волн, приходящих с разных направлений. Однако, как показывает практика, создать таким способом идеальное диффузное поле в полном соответствии с определением невозможно, и на деле внутри бассейна получают так называемое квазидиффузное поле, состоящее из прямого сигнала и многочисленных отражений.

Если в бассейне ФГУП ВНИИФТРИ излучать акустический сигнал продолжительное время, то звуковое поле, которое можно считать относительно свободным, будет существовать лишь короткий отрезок времени (не более 4 мс) до прихода первого отражения. В дальнейшем на протяжении примерно 450 мс (время реверберации бассейна) будет формироваться реверберационное поле. При длительности ЛЧМ сигнала ~ 1 с измерения выполняют в условиях, когда поле находится в двух примерно равных по продолжительности состояниях: формирования и существования. Эксперименты с излучением ЛЧМ сигналов показали, что выделение искомой зависимости (частотной характеристики по полю) происходит одинаково эффективно как в переходном, так и в стационарном состоянии поля. Успешная апробация абсолютной градуировки ПГД по полю с использованием процедуры метода взаимности продемонстрировала не только возможность градуировки приемников векторных величин по полю в реверберационном поле звуковой ЛЧМ волны без привлечения гидрофона с известной чувствительностью, но и возможность фазовой градуировки векторных приемников [20].

Звуковому реверберационному полю характерно структурирование частотных мод, вследствие чего его можно представлять неким промежуточным состоянием между свободным звуковым полем и «абсолютным хаосом» - диффузным полем. При этом успешные результаты измерительных экспериментов по полю в нестационарном реверберационном поле звуковой ЛЧМ волны дают все основания полагать, что с помощью метода СКВУ можно успешно выполнять измерения чувствительности приемника по полю, излучая в отражающем бассейне акустический шум, то есть в таком диффузном поле, как его принято создавать на практике.

Сказанное выше в сочетании с такими преимуществами метода СКВУ как возможность обработки СКВУ компактного фрагмента частотной зависимости, отсутствие ограничений на способ измерения подвергаемой СКВУ частотной зависимости и на форму используемого тестового сигнала, говорят в пользу перспективности разработки на основе СКВУ метода гра-

дуировки в полосах частот при излучении акустического шума.

Программно-аппаратная реализация процедуры градуировки

Непременным условием создания эталона для градуировки приемников подводного шума является обеспечение возможности подтверждать погрешности метода измерений и достоверность их оценок. В этой связи весьма важной оказывается возможность выполнять градуировку гидроакустического приемника в полосах частот независимыми методами, основанными на использовании широкополосных тестовых сигналов различного вида и имеющих малое число общих источников погрешности. Применение метода СКВУ предоставляет возможность использовать акустический шум в качестве альтернативы измерениям на ЛЧМ сигналах с последующим расчетом чувствительности в полосе частот по подробной частотной характеристике приемника.

Процедура получения частотной зависимости для обработки методом СКВУ при излучении акустического шума должна включать в себя следующие операции.

1. Определение частотного интервала бассейна.

Частотный интервал усреднения $\Delta f_{wa} \geq f_{eff}$ определяют по временным задержкам τ_1, τ_2, τ_3 первых трех значимых отражений $\Delta f_{wa} = 1/\tau_1 + 1/\tau_2 + 1/\tau_3$ [7].

2. Формирование случайной числовой последовательности в заданной полосе частот.

Для формирования последовательности случайных чисел $x(t)$ с заданным спектром применяют генераторы случайных чисел. Простой генератор случайных чисел можно реализовать, например, программным способом:

- с помощью стандартной программы генератора случайных чисел формируют числовую последовательность $y(t)$ с равномерным спектром, отличным от нуля в широкой полосе частот;

- последовательность случайных чисел с заданной формой спектра в полосе частот $[f_0 - (\Delta f - \Delta f_{wa})/2, f_0 + (\Delta f + \Delta f_{wa})/2]$ получают обратным преобразованием Фурье спектра исходной случайной последовательности, усеченного частотным окном:

$$x(t) = \mathfrak{F}^{-1} \{ V_w(f) \cdot \mathfrak{F} \{ y(t) \} \},$$

где $V_w(f)$ – частотное окно, задающее спектру форму в полосе частот $[f_0 - \Delta f/2, f_0 + \Delta f/2]$.

Стандартные программы генераторов позволяют сегодня формировать случайные последовательности с заданными свойствами практически неограниченной длины.

3. Формирование сигнала излучения.

Сигнал излучения формируют следующим образом. Последовательность $x(t)$ разбивают на реализации $x_i(t_j)$, $j = 1, \dots, N$. Количество отсчетов N в реализации выбирают исходя из частоты преобразования ЦАП и требуемого частотного шага линий БПФ при измерениях. Поскольку частота преобразования ЦАП определяет верхнюю частоту спектра БПФ, ее выбирают, исходя из верхней граничной частоты полосы $f_0 + (\Delta f + \Delta f_{wa})/2$. Например, при частотном шаге линий БПФ 1 Гц продолжительность сигнала должна быть равной 1 с, для чего при частоте преобразования ЦАП 4 МГц в оперативную память ЦАП требуется записать $N = 4 \cdot 10^6$ случайных чисел. Однако такая длинная последовательность может переполнить оперативную память ЦАП. Чтобы избежать этого на практике управляют частотой преобразования ЦАП, настраивая ее на число, возможно близкое к $m \cdot [f_0 + (\Delta f + \Delta f_{wa})/2]$, где m - количество отсчетов на максимальной частоте в спектре БПФ (обычно не превышает 20). Для каждой реализации $x_i(t_j)$ вычисляют текущие спектр $X_i(f) = \mathfrak{F}\{x_i(t_j)\}$ и спектр мощности $XX_i(f) = X_i(f) \cdot X_i^*(f)$.

4. Излучение акустического шума.

Для излучения акустического шума реализации $x_i(t_j)$ подают на ЦАП. На выходе ЦАП получают аналоговые сигналы излучения $x_i(t)$, которыми через усилитель мощности возбуждают излучатель. Таким образом в измерительном бассейне создают поле шумовой акустической волны.

5. Формирование сигнала на приеме.

Для каждого сигнала излучения $x_i(t)$ гидрофоном принимают акустический шум $y_i(t)$, задерживая начала приема на время распространения звуковой волны от излучателя к точке приема, усиливают принятый сигнал и подают его на устройство АЦП, синхронизированное с ЦАП и имеющее ту же частоту преобразования. На выходе ЦАП получают цифровую последовательность принятого сигнала $y_i(t_j)$. Вычисляют текущие спектры $Y_i(f) = \mathfrak{F}\{y_i(t_j)\}$ и взаимные спектры $YX_i(f) = Y_i(f) \cdot X_i^*(f)$.

6. Возможны два сценария продолжения процедуры измерений и обработки данных:

6.1 Сценарий первый - вычисление СКЗ частотной характеристики чувствительности по формуле (3).

Расчет СКЗ частотной характеристики чувствительности в полосе частот предполагает выполнение следующих операций.

6.1.1 Текущие спектры накапливают и получают спектр мощности сигнала излучения $XX(f) = \langle XX_i(f) \rangle$ и взаимный спектр сигнала излучения и принимаемого сигнала $YX(f) = \langle YX_i(f) \rangle$. ($\langle \dots \rangle$ - обозначает операцию накопления спектров).

Комплексную частотную зависимость передаточного импеданса пары излучатель-приёмник в реверберационном поле $Z'_{PH}(f)$ получают как отношение взаимного спектра к спектру мощности:

$$Z'_{PH}(f) = \frac{YX(f)}{XX(f)}.$$

6.1.2 Комплексную частотную зависимость пары излучатель-приемник в свободном поле $Z_{PH}(f, \Delta f_{wa})$ вычисляют методом СКВУ:

$$Z_{PH}(f, \Delta f_{wa}) = CMWA[Z'_{PH}(f)] = \frac{1}{\prod_i 1/\tau_{ref_i}} \int_{f-\Delta f_{wa}/2}^{f+\Delta f_{wa}/2} \tilde{Z}'_{PH}(f-f') W_{CMWA}(f') df',$$

где $W_{CMWA}(f)$ - взвешивающая функция метода СКВУ [7].

6.1.3 Частотную характеристику чувствительности приемника рассчитывают по полученным частотным зависимостям передаточных импедансов излучатель-приемник [11].

6.1.4 Чувствительность приемника в полосе частот рассчитывают как СКЗ модуля частотной зависимости чувствительности в этой полосе частот в соответствии с формулой (3).

6.2. Сценарий второй - вычисление СКЗ шумового звукового давления во временной области.

Этот сценарий предполагает решение обратной задачи - восстановление во временной области мгновенных значений прямого случайного сигнала излучателя $x_i(t)$ по случайному сигналу $y_i(t)$, измеренному на выходе гидрофона в квазидиффузном звуковом поле. Авторам неизвестны практически значимые результаты подобного подхода, применительно к градуировке гидрофона.

Формально обратную задачу можно решать, опираясь на понятие передаточной функции бассейна (ПФБ) $H_{WT}(f)$ [7]. Оставляя за рамками рассмотрения вопросы, связанные с некорректностью обратной задачи, проблемами получения передаточной функции бассейна, зависимостью

получаемой передаточной функции от формируемой в эксперименте интерференционной картины, теорией метода СКВУ, основанной на свойстве ПФБ:

$$CMWA[H_{WT}(f)] \equiv 1,$$

уравнение для прямого сигнала излучателя $x_i(t)$ запишем в упрощенном виде:

$$x_i(t) = \mathfrak{S}^{-1} \left\{ \frac{\mathfrak{S}\{y_i(t)\}}{H_{WT}(f)} \right\}.$$

Оценку ПФБ получим как отношение передаточных импедансов пары излучатель-приемник в «диффузном» и свободном звуковом полях:

$$H_{WT}(f) = \frac{Z_{PH}(f, \Delta f_{wa})}{CMWA[Z'_{PH}(f)]},$$

выполнив измерительный эксперимент по измерению передаточного импеданса пары излучатель-приемник в свободном поле на ЛЧМ сигнале методом СКВУ.

Получаемая таким образом ПФБ определена только для двух точек бассейна – точки излучения и точки приема, зависит от вида и параметров излучаемого сигнала, направленности излучателя и приемника. ПФБ имеет ограниченное, но исчерпывающее для задачи градуировки значение. Знание этой специфической передаточной функции оказывается достаточным, если градуировку выполнить непосредственно после эксперимента по ее определению. Это решение выглядит очень простым, но его практическая реализация сопряжена с рядом указанных выше трудностей.

Практические соображения

Понимая сложность решения обратной задачи в условиях, когда принимаемый сигнал отягощен разнородными помехами, что типично для измерений в гидроакустическом бассейне, авторы считают предпочтительной с практической точки зрения процедуру измерений по первому сценарию.

Второй сценарий значительно сложнее, тем не менее, было бы преждевременным на основании только этого признать его безусловную не-

целесообразность. Решение обратной задачи, хотя бы применительно к условиям лабораторного бассейна, представляется весьма перспективным и имело бы большое значение не только для градуировки акустического приемника, но и для других прикладных задач.

Предложенный способ экспериментального определения ПФБ отличается от известных попыток, целью которых было построение исчерпывающей модели звукового поля в бассейне с отражающими границами [21]. Пытались построить функцию Грина или ПФБ на основе информации об отражающих свойствах материалов стенок бассейна и лучевой картины распространения звуковых волн. Решения подобного рода не получили практического выхода, поскольку исходная информация оказывается существенно неполной и неточной. Например, создание лучевой картины требует знания направленности преобразователей на всех частотах, что равносильно знанию искомым частотных характеристик. Представляется возможным полагать, что сужая универсальность получаемой ПФБ, удастся достичь поставленной цели – восстановить прямой сигнал излучателя с приемлемым качеством, и усилия, предпринятые в этом направлении, не останутся бесплодными.

Стандартные процедуры градуировки и используемое определение чувствительности по полю имеют своей целью верификацию гидрофона, но не обеспечивают валидацию приемника шума. Поскольку при испытаниях судна измеряют шум в третьоктавных полосах частот, при градуировке приемника определению подлежит не чувствительность на гармоническом сигнале, а чувствительность в третьоктавной полосе частот, что позволяет существенно повысить точность измерений в условиях морского полигона.

Чувствительность в полосах частот может быть рассчитана по подробной частотной характеристике приемника, для измерения которой необходимо применять широкополосные сигналы. Разработанный во ВНИИФТРИ метод СКВУ обеспечивает измерение подробной частотной характеристики в звуковом поле отражающего бассейна вне зависимости от вида излучаемого сигнала. Программно-аппаратная реализация метода СКВУ на ЛЧМ сигналах позволяет выполнять измерения по полю с точностью, не уступающей тонально-импульсный методу, и многократно превосходит тонально-импульсный метод в скорости измерений.

Получаемая методом СКВУ подробная комплексная частотная характеристика обладает свойствами полной динамической характеристики приемника в частотном диапазоне эксперимента и применима при использовании других сигналов излучения, в частности, случайного шума.

Дополнение программно-аппаратной реализации метода СКВУ возможностью измерений на шумовом сигнале (в качестве альтернативы

ЛЧМ сигналу) позволит применять при градуировке гидроакустического приемника в полосах частот тестовые сигналы различного вида, что, несомненно, повысит метрологическую надежность и достоверность результатов.

Литература

1. TNO-DV 2011 C251 «Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part II: procedures for measuring underwater noise in connection with offshore wind farm licensing».
2. DNV «Rules for ships» Part 6, Chapter 24.
3. ANSI S12.64 – 2009 «Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships. – Part 1: General Requirements»
4. Stephen P. Robinson et al. An international key comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 1 to 500 kHz// JASA.-2006. - vol. 120.- № 3.- P. 1366 1373.
5. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms. JCGM 200:2012.
6. ISO 26101:2012. Акустика. Методы испытаний для квалификации окружающих свободных полей.
7. Исаев А.Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. - Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». - 2008. - 369 с
8. Robinson S. Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks. PL Report CMAM 034. ISSN 1369-6785. 1999.
9. P50.2.037 – 2004. Измерения гидроакустические. Термины и определения.
10. МЭК 50(801) Международный стандарт. Международный электротехнический словарь. Глава 801: Акустика и электроакустика. Вторая редакция 1994-07.
11. МЭК 60565:2006 Гидроакустика. Гидрофоны. Калибровка в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 1 МГц (IEC 60565:2006 Underwater acoustics - Hydrophones - Calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1MHz).
12. McMorrow, E.W., Wallace, J.D. and Coop, J.J. Technique for rapid calibration of hydrophones using random noise fields, Technical Memo ADC-EL41-EWM:JDW:JJC, U.S. Navy Air Development Center, Johnsville, USA.
13. 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.- Выпуск 73(133).- Стандартгиз. М.- 1963. с. 31-40.