

точности измерений входной блок радиометра необходимо термостатировать с погрешностью $\pm 0,049^\circ\text{C}$. Во-вторых, влияние нестабильности выходного сигнала генератора шума на точность измерений в значительной степени зависит от сигнала антенны. Для данного примера на рис. 3 приведен график изменения выходного сигнала генератора шума, в пределах которых погрешность измерений не превысит флуктуационную чувствительность радиометра. При $T_a = T_0$, как следует из (7), длительность ШИМ-сигнала не зависит от сигнала генератора шума и определяется из соотношения $t_{\text{ШИМ}} = \alpha_2 t_{\text{АИМ}} / (\alpha_1 I)$.

В ходе экспериментов была проверена чувствительность данного нулевого радиометра на интервале времени измерения 50 мс. Сравнение проведено с модуляционным режимом работы радиометра. В этом случае сигнал подшумливания через направленный ответвитель выключали. Флуктуационная чувствительность радиометра в нулевом режиме работы составила 0,23 К, в модуляционном — 0,81 К.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 13-07-98009).

Л и т е р а т у р а

1. **Мирский Г. Я.** Электронные измерения: Монография. М.: Радио и связь, 1986.

2. **Грачев А. М.** Модуляционные радиометры (обзор) // Техника средств связи. Радиоизмерительная техника. 1991. № 3. С. 29—38.

3. **Фалин В. В.** Радиометрические системы СВЧ: Монография. М.: Луч, 1997.

4. **Филатов А. В.** Нулевой метод в радиометрических измерениях: монография. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2010.

5. **Филатов А. В.** Модифицированный метод нулевого приема в сверхвысокочастотном радиометре // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 3. С. 87—92.

6. **Филатов А. В., Убайчин А. В.** Динамические свойства цифровой радиометрической системы и эффективность ее работы // Измерительная техника. 2011. № 10. С. 39—42; **Filatov A. V., Ubaichin A. V.** The dynamic properties of a digital radiometer system and its operating efficiency // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N. 10. P. 1160—1165.

7. **Клаассен К. Б.** Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике: Монография. М.: Постмаркет, 2000.

Дата принятия 07.03.2014 г.

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

534.6

Критерий качества реализации условий свободного поля при градуировке гидроакустического приемника в бассейне с отражающими границами

А. Е. ИСАЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: isaev@vniiftri.ru

Проанализированы методы реализации свободного поля при измерениях в бассейне с отражающими границами. Отмечено, что их разделение на традиционный метод измерений в свободном поле и способы пересчета данных к условиям свободного поля необоснованно. Показана возможность оценки качества условий свободного поля при градуировке акустического приемника по ширине полосы размытия частотной характеристики пары излучатель—приемник.

Ключевые слова: свободное звуковое поле, градуировка гидрофона, бассейн с отражающими границами, метод временной селекции, метод скользящего комплексного взвешенного усреднения.

The methods of the free-field realization at measurements in the pool with reflecting boundaries are considered. It is shown that the separation of these methods on the method of measurement in a free field «by definition» and recalculation to a free field conditions is unfounded. The possibility to evaluate the quality of free-field conditions during sound receiver calibration using the width of smearing on frequency of projector-receiver pair frequency response is shown.

Key words: free sound field, hydrophone calibration, reflecting water tank, reflection limited methods, method of complex moving weighted averaging.

До недавнего времени метод временной селекции прямого и отраженных сигналов не имел достойной альтернативы, и влияние отраженных сигналов при градуировке гидрофона в бассейне с отражающими границами исключали, применяя технику тонально-импульсного излучения и приема [1, 2]. Повсеместный переход к компьютерным техно-

рофона в бассейне с отражающими границами исключали, применяя технику тонально-импульсного излучения и приема [1, 2]. Повсеместный переход к компьютерным техно-

логиям предопределил широкое распространение цифровых методов обработки сигналов, что позволило реализовать в подводной акустике такие методы обработки, как комплексное сопряжение или временное обращение волны (волнового фронта), и таким образом ослабить влияние отражений в гидроакустическом канале [3—5]. В лабораторных условиях альтернативу временной селекции сегодня могут составить метод спектрометрии временных задержек (СВЗ) [6] и методы, основанные на математической обработке кепстра или частотной зависимости пары излучатель—приемник в реверберационном поле звуковой волны [7—9]. Значительной модернизации подверглась и техника метода временной селекции. Во ВНИИФТРИ для подавления шумовой помехи используют накопление серии когерентных тональных импульсов [9]. Комплексную амплитуду сигнала оценивают методом квадратурной обработки. Для этого либо излучают пару квадратурно дополненных тональных импульсов, разделяя их реверберационной паузой [2], либо расчетным путем получают тональный импульс (пару Гильберта), ортогональный принятому. С расширением арсенала приемов, позволяющих разделять прямой и отраженный сигналы, все большую актуальность приобретают вопросы: являются ли измерения с использованием того или иного метода измерения в свободном поле, какой способ реализации условий свободного поля предпочтительнее, как оптимизировать градуировки по полю в незаглушенном бассейне заданной геометрии и т. п.

Общепринятое определение свободного поля [10] и связанное с ним понятие калибровки по полю [1] допускают лишь два возможных показателя качества реализации свободного поля: «да» и «нет» в случаях соответствия принятому определению и не соответствия. В воздушной акустике измерения в безэховой камере не противостоят условиям общепринятого определения, и их можно смело признать измерениями по полю.

Начиная с экспериментов П. Ланжевена и К. Шилловского с локацией гидроакустического эхосигнала в годы Первой мировой войны, отсутствие безэхового гидробассейна принято компенсировать временной селекцией прямой и отраженных волн. Этот метод по-прежнему применяют в первичных национальных эталонах для градуировки гидрофонов. За столь продолжительный период временная селекция в гидроакустических измерениях стала настолько привычной, что в сознании как отечественных, так и зарубежных специалистов понятия «временная селекция тонального импульса» и «реализация условий свободного поля» оказались неразрывными. Поэтому, говоря об измерениях по полю, подразумевают временную селекцию тонального импульса и наоборот. В фундаментальном обзоре [11] под реализацией условий свободного поля в отражающем бассейне, прежде всего, понимают именно временную селекцию. При этом утверждается, что все результаты измерений при отраженном сигнале не в условиях свободного поля могут претендовать только на пересчет к условиям свободного поля. В [12] реализация условий свободного поля — это либо разделение во временной области сигналов, соответствующих прямому и отраженному акустическим радиоимпульсам по времени их прихода в точку приема, либо выделение сигнала, соответствующего прямой звуковой волне в частотной области путем частотного разделения прямого и отраженных линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов. В этом [12] частично противоречат [11]. Реализацию условий свободного поля в обоих источниках объединяет сделанный автора-

ми упор на физическое выделение прямой звуковой волны в звуковом поле отражающего бассейна. Подразумевая на самом деле звуковое поле, авторы рассуждают в терминах сигналов, и вопрос близости условий измерений в отражающем бассейне к свободному полю сводят к вопросу, насколько хорошо удастся разделить прямой и отраженный сигналы.

Проанализируем метод временной селекции с точки зрения общепринятого определения свободного звукового поля [10] — это звуковое поле в однородной изотропной среде, границы которой оказывают пренебрежимо малое действие на звуковые волны. Поле звуковой волны существует во времени и пространстве, и свободное звуковое поле означает их бесконечные пределы. К сожалению, в рассматриваемом общепринятом определении явно присутствует только пространство, в котором границы оказывают пренебрежимо малое действие на звуковые волны. То, что это воздействие должно быть пренебрежимо малым всегда, т. е. на бесконечном интервале времени, присутствует в определении неявно. В этом следует искать причину раздельного восприятия времени и пространства и абсолютизации роли пространства в ущерб времени при использовании общепринятого определения на практике при градуировке акустического приемника. Тем самым понятие «свободного поля» было сведено к понятию «свободного пространства», например в воздушной акустике — пустая комната.

Бесконечность пространства в силу неразрывной связи пространства и времени (в контексте статьи — времени измерений), означает бесконечное время измерений и, следовательно, бесконечно малое разрешение по частоте. И наоборот, конечное время измерений (конечная продолжительность приемного строга Δt в методе временной селекции) в силу частотно-временного соотношения неопределенностей означает, что разрешение по частоте не может быть выше, чем $\Delta f \geq 1/\Delta t$. При этом, если Δt совпадает с временной задержкой отраженной волны, то существование свободного поля оказывается ограниченным по пространству областью размером $r = c\Delta t$, где c — скорость звука в среде, а временной интервал Δt приобретает смысл времени существования свободного поля в точке приема.

Техника временной селекции неразрывным образом связала понятия «свободного звукового поля» и «времени измерений» (длительности тонального импульса). Чтобы пояснить важность сделанного замечания, рассмотрим гипотетическую ситуацию, в которой гидрофон принимает сигнал в виде δ -функции. Отклик гидрофона будет представлять его импульсную характеристику $h(\tau)$, которая в условиях однородной изотропной безграничной среды должна быть измерена на сколь угодно продолжительном интервале времени. Частотную характеристику гидрофона $H(f)$ даст преобразование Фурье импульсной характеристики $h(\tau)$, заданной на бесконечно большом временном интервале:

$$H(f) = FT(h(\tau)). \quad (1)$$

Ограничение времени измерения отклика гидрофона приемным стробом продолжительностью Δt , начало которого совпадает с началом приема, приведет к усечению импульсной характеристики по времени и утрате завершающей ее части для $\tau > \Delta t$. Тем самым исходная импульсная характеристика $h(\tau)$ будет заменена импульсной характеристикой $h'(\tau)$, которая совпадает с $h(\tau)$ на начальном времен-

ном интервале $\tau \leq \Delta t$ и продолжается нулевыми значениями для $\tau > \Delta t$. Математически усечение по времени можно представить произведением $h(\tau)$ и функции временного окна $\Pi(\Delta t)$, равной нулю вне интервала Δt : $h'(\tau) = h(\tau)\Pi(\Delta t)$.

По теореме о конволюции преобразование Фурье усеченной по времени импульсной характеристики $H'(f, \Delta t) = \text{FT}(h'(\tau)) = \text{FT}(h(\tau)\Pi(\Delta t))$ будет представлять свертку сомножителей — $H(f)$ (1) и спектра временного окна $W(f, \Delta t) = \text{FT}(\Pi(\Delta t))$:

$$H'(f, \Delta t) = H(f) * W(f, \Delta t) \neq H(f), \quad (2)$$

где $*$ — символ операции свертки.

Таким образом, функция (2) не совпадет с $H(f)$, при этом ее значение для любой частоты будет результатом свертки $H(f)$ и $W(f, \Delta t)$. Для прямоугольного окна спектр $W_n(f, \Delta t)$ примет вид известной функции $[\sin \pi f \Delta t / (\pi f \Delta t)] \exp[-j\pi f \Delta t]$. Становится очевидным, что, с точки зрения определения в [10], показателем качества свободного поля, реализуемого в условиях, отличных от безэховой камеры, в том числе методом временной селекции, будет «нет» (см. (2)), и никакими исключительными свойствами техника временной селекции в этом смысле так же не обладает, что равносильно отсутствию показателя качества.

Отметим обескураживающий факт — утрата информации о выходной реакции системы вследствие отбрасывания из рассмотрения завершающей ее части на бесконечном по продолжительности временном полуинтервале, следующим за моментом усечения, приводит к совершенно определенным последствиям для измеряемой частотной характеристики системы. Это выражается детерминированной математической операцией, описываемой сверткой с ядром в виде взвешивающей функции (2). Следствием свертки является размытие (искажение) искомой частотной характеристики, вызванное усреднением по частоте. Поясним размытие на примере временной селекции тонального сигнала.

Тонально импульсный метод предполагает временную селекцию тонального импульса для измерения передаточного импеданса излучателя и приемника на частоте тона. Искомое значение передаточного импеданса $Z_{PH}(f_0)$ на частоте f_0 находят как амплитуду выходного напряжения приемника при единичной амплитуде тока излучателя. Взаимосвязь амплитуды выходного напряжения и передаточного импеданса излучателя и приемника на частоте тона установлена лишь для бесконечного времени измерений, поскольку эта взаимосвязь базируется на математических абстракциях — определении преобразования Фурье и теореме конволюции. Поскольку интеграл Фурье берется в бесконечных пределах, измерения должны быть выполнены в бес-

конечном по времени существовании звуковом поле, т. е. в свободном поле. Конечное время существования либо конечная протяженность области свободного поля невозможны. Выражаясь образно, время выступает здесь как категория философская, у которого нет начала и конца:

$$Z_{PH}(f_0) = \int_{-\infty}^{\infty} Z_{PH}(f) \delta(f - f_0) df, \quad (3)$$

где $\delta(f_0)$ — спектр бесконечного по продолжительности тонального сигнала частоты f_0 .

Что же происходит на практике, когда вследствие причинности физически реализуемой системы и конечности времени наблюдения время из разряда категории философской переходит в разряд физической величины? При использовании временной селекции выходной сигнал приемника вынужденно обрывают по времени прихода первого отражения $\tau_{отр}$, отсекая принятый тональный сигнал прямоугольным временным окном. Для измерений амплитуды оказывается доступным лишь свободный от отражений участок принятого тонального сигнала на временном интервале $\Delta t < \tau_{отр}$. В соответствии с теоремой о свертке вместо формулы (3) получим

$$Z'_{PH}(f_0, \tau_{отр}) = \int_{-\infty}^{\infty} Z_{PH}(f) W_n(f - f_0, \tau_{отр}) df \neq Z_{PH}(f_0). \quad (4)$$

Взвешивающая функция

$$W_n(f - f_0, \tau_{отр}) = \frac{\sin(\pi(f - f_0)\tau_{отр})}{\pi(f - f_0)\tau_{отр}} \exp[-j\pi(f - f_0)\tau_{отр}]$$

задана на всей оси частот и, не обладая явным фильтрующим свойством, искажает искомый результат усреднением в отличие от дельта функции $\delta(f_0)$, к которой она слабо сходится с увеличением времени $\tau_{отр}$ ($\tau_{отр}$ — параметр, определяющий форму взвешивающей функции (закон усреднения) в текущий момент времени). Поведение модуля $W_n(f - f_0, \tau_{отр})$ показано на рис. 1, где нуль на оси частот соответствует частоте f_0 , ширина главного лепестка составляет $2/\tau_{отр}$, точки пересечения функцией оси частот повторяются с шагом $\Delta f = 1/\tau_{отр}$.

Таким образом, значение $Z'_{PH}(f_0, \tau_{отр})$, 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. Заметим, что в силу особенностей взвешивающей функции $W_n(f - f_0, \tau_{отр})$ при всех прочих равных условиях влияние $Z_{PH}(f)$ на результат усреднения тем меньше, чем больше частота f отличается от f_0 . Другими словами, бесконечные пределы интегрирования в (4) можно без ущерба для точности результата заменить на конечные, поскольку основной вклад в интеграл вносит участок $Z_{PH}(f)$, заключенный в конечного размера окрестности частоты f_0 . На практике эту окрестность принято называть эффективной полосой частот, а ширину полосы $\Delta f_{эфф}$ выражать величиной, кратной $2/\tau_{отр}$. Связь между $\Delta f_{эфф}$ и $\tau_{отр}$ подчинена универсальному частотно-временному соотношению, известному как соотношение неопределенности $\tau_{отр} \Delta f_{эфф} \geq 1$.

Соотношение неопределенности изменяет смысловую нагрузку результатов измерений методом временной селекции. Полученное значение $Z'_{PH}(f_0, \tau_{отр})$ можно с одинаковым успехом приписать любой частоте в пределах эффективной полосы. Иными словами, если утрату информации о скрытой отражениями части принятого сигнала рассматри-

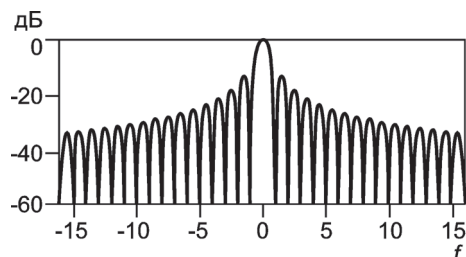


Рис. 1. Модуль нормализованного спектра прямоугольного временного окна

вать как неопределенность сигнала во временной области, то эквивалентом этой неопределенности в частотной области будет неизбежное размытие результатов измерений по частоте, аналогичное размытию спектра в частотном анализе.

Преобразование Фурье — линейный оператор, для которого выполняется принцип суперпозиции. Учитывая что результаты, полученные выше для предельных случаев тестового сигнала — сверхширокополосного (δ -функция) и сверхузкополосного (гармонического) — нетрудно распространить на тестовый сигнал с произвольным спектром: усечение по времени в методе временной селекции вызывает размытие результатов измерений в соответствующей полосе частот вне зависимости от формы спектра. Усечение по времени прихода отражений $\tau_{отр}$ отклика гидрофона на тональный импульс, заданный дискретным спектром частот f_i (набором гармоник с частотами f_i), приводит к тому, что вместо набора искомым значений передаточного импеданса в свободном поле $Z_{PH}(f_i)$ получают в полном соответствии с принципом неопределенности набор размытых в полосе частот $\Delta f_{эфф} \geq 1/\tau_{отр}$ значений $Z_{PH}(f_i, \tau_{отр})$. Близость значе-

ний $Z_{PH}(f_i)$ и $Z_{PH}(f_i, \tau_{отр})$ при градуировке широкополосных преобразователей не означает их идентичности, что проявляется в расхождении значений для резонансных (узкополосных) преобразователей.

Очевидно, чем больше время $\tau_{отр}$, предшествующее появлению отраженного сигнала в точке приема, тем меньше ширина частотной полосы размытия $\Delta f_{эфф}$. При измерениях с использованием временной селекции излучатель и приемник располагают в отражающем бассейне так, чтобы обеспечить возможно большее время $\tau_{отр}$. При этом связанные соотношением неопределенности $\tau_{отр}$, $\Delta f_{эфф}$ становятся численными параметрами, характеризующими соответственно во временной и частотной областях близость условий, реализуемых при измерениях, к условиям свободного поля.

Временная селекция тонального импульса предполагает выполнение измерений в отсутствии отражений. Это главный аргумент противопоставления временной селекции методам, отнесенным к способам пересчета на том основании, что измерения выполняют в реверберационном поле, т. е. в присутствии отражений. Покажем, что $\tau_{отр}$ и $\Delta f_{эфф}$ также применимы для численной оценки качества свободного поля, реализуемого методами, отягощенными отражениями. Рассмотрим методы, получившие распространение при эталонных измерениях.

Спектрометрия временных задержек. Продукт технологического прогресса в аналоговой технике — метод СВЗ — разработан в лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института (США) в 1967 г. Он позволяет разделить в реальном времени прямой и отраженный ЛЧМ-сигналы, основываясь не на разнице времени их прихода, а на разнице их мгновенных частот $S\tau_{отр}$ (S — скорость нарастания частоты ЛЧМ-сигнала) [6]. Сигнал приемника гетеродинируют и подают на фильтр промежуточной частоты (ФПЧ), настроенный на прямой сигнал.

Ширина полосы пропускания $\Delta F_{ФПЧ} \leq S\tau_{отр}$ и время интегрирования ФПЧ связаны отношением $\Delta T_{ФПЧ} = 1/\Delta F_{ФПЧ} \geq (S\tau_{отр})^{-1}$, при этом частотный интервал усреднения ЛЧМ-сигнала пропорционален скорости нарастания частоты и времени интегрирования ФПЧ:

$$\Delta f_{эфф} = S\Delta T_{ФПЧ} \geq 1/\tau_{отр}.$$

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 (лучше сигнал очищен от отражений), тем больше время и шире полоса частот усреднения, и сильнее будет искажена (размыта усреднением в полосе частот) искомая частотная характеристика [6].

Реализация условий свободного поля методом **временной селективной гомоморфной** (относительно преобразования Фурье) **постобработки** выглядит следующим образом [7]. В реверберационном поле помещения с отражающими стенами измеряют комплексную частотную зависимость пары излучатель—приемник, к которой применяют обратное преобразование Фурье, переходя таким образом из частотной в квазивременную область временных задержек — квефренций. Полученный кепстр представляет 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 отсекают окном по квефренции $\tau_w < \tau_{отр}$, оставляя свободную от отражений часть исходного кепстра. В качестве примера на рис. 2 приведены нормализованные спектры окон Хэмминга и Блэкмана—Наталла.

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. Преобразование Фурье (прямое либо обратное) преобразует свертку в произведение и наоборот. Если усечение по квефренции представить как умножение кепстра на квазивременное окно (прямоугольной либо заданной формы) продолжительностью τ_w , то преобразование Фурье усеченного кепстра — свертка искомой частотной характеристики и спектра примененного окна, эквивалентная усреднению искомой частотной характеристики в эффективной полосе частот $\Delta f_{эфф}$. Другими словами, при реализации свободного поля происходят два действия, находящиеся в диалектическом противоречии. Одно дает положительный результат — частотная зависимость очищается от искажений, вызванных отражениями, а другой ему противоположен — искомая частотная характеристика размывается, усредняется по частоте, что составляет «плату» за выигрыш от первого действия. При этом $\Delta f_{эфф}$ зависит от типа и параметров применяемого окна, а ее связь с временем $\Delta\tau_{отр}$, предшествующим отражениям, подчинена известному соотношению неопределенности $\Delta f_{эфф} \geq 1/\Delta\tau_{отр}$.

Метод скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ). В рассмотренных выше методах условия свободного поля реализуют усечением измеряемого сигнала или характеристики напрямую или опосредованно во временной (квазивременной) области. Усечение влечет размытие частотной характеристики как следствие вызываемого усечением усреднения по частоте. Однако если прочитать соотношение неопределенности в обратном направлении, то размытие в частотной области должно вызывать соответствующее усечение во временной области. Например, если спектр

$$\frac{\sin(\pi(f - f_0)\Delta t)}{\pi(f - f_0)\Delta t} \exp[-j\pi(f - f_0)\Delta t]$$

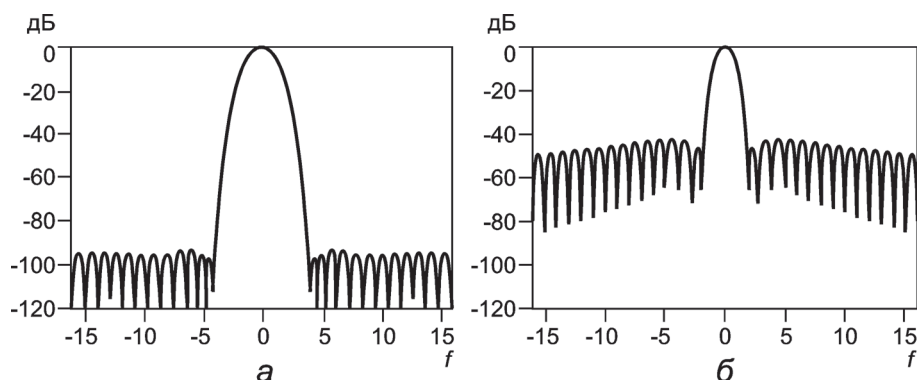


Рис. 2. Модуль нормализованного спектра окна Хэмминга (а) и Блэкмана—Наталла (б)

тонально-импульсного сигнала длительности Δt рассматривать как своего рода размытие спектра $\delta(f_0)$ бесконечного по продолжительности гармонического сигнала, то при излучении этого сложного спектра на приеме получим тональный импульс длительности Δt . 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 частотной зависимости пары излучатель—приемник в реверберационном поле среды с отражающими границами. Метод был разработан в 2005 г. во ВНИИФТРИ для градуировки гидроакустических приемников, применяемых при измерениях шума корабля [8]. С помощью СКВУ получают искомую частотную характеристику в свободном поле непосредственным восстановлением ее из комплексной частотной зависимости, измеренной в реверберационном поле. Способ получения зависимости значения не имеет. В этом смысле идея метода СКВУ близка идее гомоморфной постобработки. Искажения частотной зависимости, вызванные отражением, запаздывающим в точке приема относительно прямого сигнала на время $\tau_{отр}$, устраняют скользящим усреднением частотной зависимости в частотном интервале шириной $1/\tau_{отр}$. Если отражений несколько, их устраняют последовательными скользящими усреднениями в частотных интервалах, соответствующих запаздываниям отражений, либо одним взвешенным скользящим усреднением в частотном окне $\Delta f_{эфф} > 1/\tau_{отр}$ [8, 9].

Обработку СКВУ применяют к компактному фрагменту частотной зависимости. Метод дает возможность привлекать дополнительную информацию о поведении искомой частотной характеристики — априорную либо полученную в процессе обработки. Однако в основе СКВУ лежит то же фундаментальное соотношение неопределенностей, которое связывает частотный интервал взвешенного усреднения и запаздывание отражений в точке приема.

С точки зрения качества условий свободного поля, реализуемых в бассейне заданной геометрии, рассмотренные выше методы будут различаться лишь константой $k = \Delta f_{эфф} \tau_{отр}$. Чем ближе k к единице, тем меньше полоса усреднения по частоте и вызванные усреднением искажения частотной характеристики. Именно с позиций минимизации соотношения неопределенностей целесообразно рас-

сматривать: приведенные в [11] методы градуировки в акустическом поле непрерывной волны с применением техники сглаживания или усреднения; градуировку в поле случайного шума; технику кросскорреляционной обработки; деконволюцию в кепстральной области; моделирование акустического поля в бассейне; методы, использующие направленность протяженного приемника и гидрофонной антенны; методы минимизации соотношения неопределенностей на основе привлечения априорной информации о системе излучатель—приемник (экстраполяцию сигнала путем моделирования его установившейся части, продолжение отклика с использованием простых мо-

делей 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 гарантировали бы высокое качество результата вне зависимости от условий измерений. Принципиальность различий в реализации методов (присутствие или отсутствие отражений при измерениях) оказывается лишь кажущейся 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 ближе к методам свободного поля, чем метод временной селекции тонального импульса, поскольку обеспечивают меньшую ширину частотной полосы усреднения, соответственно, меньшее размытие результатов измерений по частоте. Упомянутое принципиальное различие методов — это лишь следствие несовершенства традиционно применяемых при калибровке акустического приемника понятий «свободное поле» и «градуировка в свободном поле».

Затрагивая тему целесообразности и обоснованности разделения методов измерений, отметим следующее. Буквальное понимание понятий «свободное поле» и «градуировка в свободном поле» приводит к необоснованному противопоставлению условий, а следовательно и методов градуировки, родственных хотя бы в том смысле, что они относятся к одному и тому же отражающему бассейну. Нетрудно 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—пересчет, выполняемую явно или неявно. Примеры явно выраженной математической обработки численными методами — СКВУ и гомоморфная постобработка. Примеры аналоговой реа-

лизации математической обработки — методы СВЗ и временная селекция. 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. В результате применения компьютерных технологий эти и многие другие аналоговые операции сегодня с успехом реализуются цифровыми методами. Нередко не учитывают, что математическая обработка не заканчивается выделением прямого сигнала излучателя. За этим этапом следует оценивание параметра, чаще всего амплитуды сигнала, и, наконец, оценка близости полученного значения искомой величине, т. е. определение погрешности. Поэтому приведенные примеры — это лишь различные способы реализации математических преобразований.

Выводы. общепринятое определение свободного поля, безусловно, необходимо. Оно позволяет сформулировать понятие чувствительности приемника в свободном поле. Однако с практической точки зрения оно более всего подходит к акустике концертного зала, где все слушатели, независимо от занимаемого места, должны слышать качественный, не искаженный отражениями звук, и избыточно для решения задачи градуировки акустического приемника. В соответствии с определением чувствительности приемника в свободном поле при градуировке по полю интерес представляет звуковое давление не во всем окружающем приемник пространстве, а лишь в достаточно малой его области — в месте расположения приемника. Условия измерений в лабораторном бассейне также значительно отличаются от идеального свободного поля бегущей плоской волны: приемник находится в звуковом поле сферической волны, время измерений ограничено запаздыванием отраженной волны в точке приема, результаты измерений размыты усреднением по частоте.

Единственным общепризнанным методом реализации свободного поля остается строительство заглушенной камеры. До недавнего времени коэффициент звукопоглощения 0,95—0,99 вполне удовлетворял требованиям градуировки микрофонов. С повышением точности градуировки такое звукопоглощение оказалось недостаточным и к заглушенной камере стали относиться точно так же, как к бассейну с отражающими стенками, исключая влияние отражений гомоморфной постобработкой [7]. Это означает, что понятие свободного поля из области практической переходит в область философскую и понятийную, и может использоваться только для теоретических построений, например для установления истинного значения при вычислении погрешностей измерений.

В общем смысле реализацию условий свободного поля при градуировке не следует рассматривать как совокупность мер (например инженерно-строительных при возведении заглушенных камер), направленных на создание собственного свободного звукового поля, но следует понимать как создание методики измерений, при использовании которой результат градуировки можно рассматривать как чувствительность приемника в свободном звуковом поле. Это правило в совокупности с частотно-временным соотношением неопределенностей составляет объединяющую основу при рассмотрении методов реализации условий свободного поля. На практике вполне достаточно выполнить следующие

условия: падающая на приемник прямая звуковая волна — сферическая локально плоская [13], запаздывание отраженных волн в точку приема превышает время установления сигнала в системе излучатель—приемник (или, что то же самое, в пределах частотной полосы усреднения частотная характеристика указанной системы существенно не изменяется).

Соотношение неопределенностей устанавливает предел качества измерений по полю, но не дает оценки точности измерений и его нельзя напрямую подставить в бюджет неопределенностей. Частотные свойства системы излучатель — эталонная установка — приемник являются вторым объективным фактором, характеризующим качество измерений по полю. В совокупности оба этих фактора определяют точность и нижнюю частоту измерений по полю в бассейне заданных размеров.

Л и т е р а т у р а

1. **IEC 60565(2006).** Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 1 МГц.
2. **Исаев А. Е.** Нижняя частота градуировки гидрофона по полю при излучении тональных сигналов в незаглушенном бассейне // Измерительная техника. 2010. № 1. С. 20—24; **Isaev A. E.** Lower frequency of free-field calibration of hydrophones in emission of tonal signals in a non-anechoic water tank // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N. 1. P. 28—34.
3. **Зверев В. А.** Принцип акустического обращения волн и голография // Акустический журнал. 2004. Т. 50. № 6. С. 792—801.
4. **Зверев В. А.** Получение изображения акустической антенной через слой неоднородностей // Акустический журнал. 2004. Т. 50. № 1. С. 62—67.
5. **Зверев В. А.** Обращение волнового фронта для снижения влияния многолучевости на результат активной локации // Акустический журнал. 2003. Т. 49. № 6. С. 814—819.
6. **Pedersen P. C., Lewin P. A., Bjorno L.** Application of time delay spectrometry for calibration of ultrasonic transducers // IEEE Trans. Ultrasonics, ferroelectric and frequency control. 1988. V. 35. N. 2. P. 185—205.
7. **Barrera-Figueroa S., Rasmussen K., Jacobsen F.** A time-selective technique for free-field reciprocity calibration of condenser microphones // J. Acoust. Soc. Am. 2003. Sept. V. 114 (3). P. 1467—1476.
8. **Исаев А. Е., Матвеев А. Н.** Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в ревербирующем бассейне // Акустический журнал. 2009. Т. 55. № 6. С. 727—736.
9. **Исаев А. Е.** Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2008.
10. **МЭК 50 (801).** Международный электротехнический словарь. Гл. 801: Акустика и электроакустика. 1994.
11. **Robinson S.** Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks. PL Report CMAM 034, 1999.
12. **Р 50.2.037—2004.** ГСИ. Измерения гидроакустические. Термины и определения.
13. **Исакович М. А.** Общая акустика. М.: Наука, 1973.

Дата принятия 18.02.2014 г.