

УДК 534.6

ГРАДУИРОВКА ГИДРОФОНОВ ПО ПОЛЮ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ИЗЛУЧЕНИИ В РЕВЕРБИРУЮЩЕМ БАССЕЙНЕ

© 2009 г. А. Е. Исаев, А. Н. Матвеев

ФГУП «ВНИИ Физико-технических и радиотехнических измерений»

141570 Московская обл., Солнечногорский р-он, пос. Менделеево

Тел. 536-94-43, 660-21-66, факс 660-25-39

E-mail: isaev@vniiftri.ru, matveev@vniiftri.ru

Поступила в редакцию 5.08.08 г.

Рассмотрен метод оценивания переходного импеданса излучателя и приемника в свободном поле, основанный на скользящем комплексном усреднении частотной зависимости переходного импеданса излучателя и приемника, полученной при непрерывном излучении в незаглушенном бассейне. Метод позволяет ослабить влияние отраженных сигналов и получить частотные характеристики, практически совпадающие с измеренными в условиях свободного поля. Приводятся результаты экспериментальных исследований метода и его применения для градуировки гидрофонов по полю методом взаимности в ревербирующем поле.

PACS: 06.20.Fb, 43.30.Xm, 43.60.Lq, 43.60.Pt

ВВЕДЕНИЕ

В ряде измерительных задач градуировка гидрофона на $1/3$ октавном ряде частот оказывается недостаточной и необходимо измерять практически непрерывные частотные характеристики с равномерным шагом перестройки частоты. Использование тональных сигналов и техники импульсного излучения и приема приводит в таких случаях к большой трудоемкости измерений. Применение сигналов с распределенной в полосе частот мощностью позволяет значительно сократить время измерений, но требует режима непрерывного излучения. При непрерывном излучении в ревербирующем бассейне условия свободного поля можно обеспечить ослаблением отражений, либо применением специальных методов обработки принятых сигналов. Эффективность заглушающих покрытий, применяемых для ослабления отражений, при измерениях в широком диапазоне частот оказывается явно недостаточной. К настоящему времени в подводной акустике получили распространение такие процедуры, как комплексное сопряжение, либо временная инверсия волны, обращение волнового фронта, позволяющие существенно ослабить влияние отражений в гидроакустическом канале [1–3]. При измерениях в натуральных и лабораторных условиях широко применяется спектрометрия временных задержек (СВЗ) [4]. Частотное разделение прямого и отраженных линейно частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов, положенное в основу метода СВЗ, обладает рядом преимуществ в

сравнении с временной селекцией. Разрешающая способность метода СВЗ не зависит от частоты измерений, метод позволяет получать практически непрерывные частотные характеристики и обладает высокой помехозащищенностью. Как будет показано ниже, при измерениях в гидроакустическом бассейне метод СВЗ представляет собой один из способов реализации принципа селекции прямого сигнала излучателя, основанного на свойствах передаточной функции ревербирующего бассейна. Специфика такой селекции накладывает определенные ограничения на характеристики, получаемые в результате измерений. Вместе с тем лабораторный измерительный бассейн представляет собой идеальный случай гидроакустического канала, параметры которого, в отличие от натуральных условий, контролируемы и обладают необходимой временной стабильностью. Это позволяет повысить эффективность селекции, упростить ее реализацию, сделать возможным ее использование в гидроакустических эталонах. Применение сигналов со сложным спектром в режиме непрерывного излучения позволяет значительно расширить возможности эталонной установки.

Для обеспечения условий градуировки, эквивалентных условиям свободного поля, при использовании непрерывных сигналов весьма перспективным является метод, основанный на скользящем комплексном усреднении передаточной функции ревербирующего бассейна.

МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО УСРЕДНЕНИЯ ПРИВЕДЕННОГО ПЕРЕХОДНОГО ИМПЕДАНСА СИСТЕМЫ ИЗЛУЧАТЕЛЬ-НЕЗАГЛУШЕННЫЙ БАССЕЙН-ПРИЕМНИК

Рассмотрение метода начнем с соотношения, связывающего спектральную плотность тока $i(t)$ излучателя и взаимную спектральную плотность тока излучателя и напряжения $u(t)$ на выходе приемника при излучении и приеме в условиях свободного поля. Допустим, что излучатель и приемник точечные, и разнесены в безграничном однородном пространстве на расстояние r . Предположим, что ток $i(t)$ представляет собой процесс с отличной от нуля в интервале частот $[f_0 - \Delta f/2, f_0 + \Delta f/2]$ спектральной плотностью $I(f) = \mathcal{F}[\mathcal{R}_i(\tau)]$, полученной преобразованием Фурье автокорреляционной функции $\mathcal{R}_i(\tau)$ процесса $i(t)$. Обозначим $\mathcal{R}_{i,u}(\tau)$ взаимную корреляционную функцию тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$. Обозначим $\dot{U}_{i,u}(f)$ взаимную спектральную плотность процессов $i(t)$ и $u(t)$, и найдем ее преобразованием Фурье взаимной корреляционной функции $\mathcal{R}_{i,u}(\tau)$:

$$\dot{U}_{i,u}(f) = \mathcal{F}[\mathcal{R}_{i,u}(\tau)].$$

Дальнейшие рассуждения будем основывать на том, что для линейной системы взаимный спектр входного и выходного процессов представляет собой произведение спектра входного процесса на комплексную передаточную функцию (ПФ) системы [5]. Как показано в [6], ПФ $\dot{Z}_{PH}(f)$ системы излучатель-приемник, разнесенных на расстояние r в свободном поле сферической волны, представляет собой произведение приведенного переходного импеданса (ППИ) излучателя и приемника $\dot{Z}_{PH, sph}(f)$ на комплексную ПФ среды $\dot{\Omega}(f) = \frac{r'}{r} \exp[-jk(r-r')]$:

$$\dot{Z}_{PH}(f) = \dot{Z}_{PH, sph}(f) \dot{\Omega}(f).$$

Используя соотношение для спектров процессов на входе и выходе линейной системы и выражение для ПФ $\dot{Z}_{PH}(f)$, взаимную спектральную плотность $\dot{U}_{i,u}(f)$ в интервале частот $[f_0 - \Delta f/2, f_0 + \Delta f/2]$ представим выражением:

$$\dot{U}_{i,u}(f) = \dot{Z}_{PH, sph}(f) \dot{\Omega}(f) I(f).$$

Таким образом, частотная зависимость ППИ излучателя и приемника в свободном поле сферической волны получается как отношение:

$$\dot{Z}_{PH, sph}(f) = \frac{\dot{U}_{i,u}(f)}{I(f)} \dot{\Omega}(f)^{-1}.$$

При непрерывном излучении в бассейне звуковое давление $\dot{p}_\Sigma(f)$ в точке приема создается прямой волной излучателя и волнами, отражен-

ными дном, стенками и поверхностью воды. В предположении конечного числа значимых отражений:

$$\dot{p}_\Sigma(f) = \dot{p}_0(f) + \sum_{i=1}^n \dot{p}_{ref,i}(f),$$

где $\dot{p}_0(f)$ — давление в прямой волне, $\dot{p}_{ref,i}(f)$ — давление в i -ой отраженной волне.

ППИ излучателя и приемника в бассейне выразим через ППИ в невозмущенном поле сферической волны и комплексные функции, характеризующие фазовые задержки отраженных волн относительно прямой волны излучателя [6]. Для этого отражение с номером i охарактеризуем коэффициентом:

$$\dot{W}_i(f) = \frac{\dot{p}_{ref,i}(f)}{\dot{p}_0(f)} \dot{\Omega}_{ref,i}^{-1}(f),$$

где $\dot{\Omega}_{ref,i}(f) = \frac{r}{r_i} \exp[-jk\Delta r_i]$ — функция с осциллирующими по гармоническому закону при изменении частоты действительной и мнимой частями, $\Delta r_i = r_i - r$ — разность хода прямой и отраженной волны, k — волновое число. Выражение для ППИ излучателя и приемника в бассейне $\dot{Z}'_{PH, sph}(f)$ запишем в виде:

$$\dot{Z}'_{PH, sph}(f) = \dot{Z}_{PH, sph}(f) \left[1 + \sum_{i=1}^n \dot{W}_i(f) \dot{\Omega}_{ref,i}(f) \right].$$

Множитель в квадратных скобках представляет собой ПФ бассейна $\dot{\Omega}_{WT}(f)$.

Проблему обеспечения условий, эквивалентных условиям свободного поля, будем трактовать как задачу восстановления $\dot{Z}'_{PH, sph}(f)$ по частотной зависимости $\dot{Z}_{PH, sph}(f)$, полученной при непрерывном излучении в бассейне. Сделаем следующие типичные допущения о поведении функций $\dot{Z}_{PH, sph}(f)$ и $\dot{W}_i(f)$ в рассматриваемом частотном интервале:

— величина $\dot{W}_i(f)$ слабо изменяется с частотой (постоянная величина);

— период осцилляций функции $\dot{Z}_{PH, sph}(f)$ много больше периода осцилляций $\dot{Z}'_{PH, sph}(f)$, обусловленных функциями $\dot{\Omega}_{ref,i}(f)$.

Не нарушая корректности дальнейших рассуждений, значения $\dot{W}_i(f)$ примем равными единице, а постоянный множитель r/r_i в целях сокращения записей опустим. Оценку ППИ в невозмущенном поле на частоте f_0 получим комплексным

усреднением зависимости $\dot{Z}'_{PH, sph}(f)$ в интервале частот $[f_0 - \Delta f/2, f_0 + \Delta f/2]$:

$$\begin{aligned} \tilde{Z}_{PH, sph}(f_0) &= \frac{1}{\Delta f} \int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} \dot{Z}'_{PH, sph}(f) df = \\ &= \dot{Z}_{PH, sph}(f_0, \Delta f) + \sum_{i=1}^n \dot{\epsilon}_i(f_0, \Delta f) \end{aligned}$$

где $\dot{Z}_{PH, sph}(f_0, \Delta f) = \frac{1}{\Delta f} \int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} \dot{Z}'_{PH, sph}(f) df$ — среднее в интервале частот значение ППИ излучателя и приемника в свободном поле; $\dot{\epsilon}_i(f_0, \Delta f) =$

$$= \frac{1}{\Delta f} \int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} \dot{Z}'_{PH, sph}(f) \exp[-j2\pi f \Delta t_i] df$$
 — слагаемое, обусловленное остаточным влиянием i -ой отраженной волны; $\Delta t_i = \Delta r_i/c$ — временная задержка i -го отражения; c — скорость звука в воде. Покажем, что при определенном выборе частотного интервала усреднения слагаемые $\dot{\epsilon}_i(f_0, \Delta f)$ будут составлять малые величины, и оценка $\tilde{Z}_{PH, sph}(f_0)$ будет практически совпадать со средним значением в интервале частот ППИ излучателя и приемника в свободном поле.

Заменив медленно изменяющуюся функцию $\dot{Z}'_{PH, sph}(f)$ средним значением $\dot{Z}_{PH, sph}(f_0, \Delta f)$, для $\dot{\epsilon}_i(f_0, \Delta f)$ получим приближенное выражение:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_i(f_0, \Delta f) &\approx \dot{Z}_{PH, sph}(f_0, \Delta f) \frac{1}{\pi \Delta f \Delta t_i} \times \\ &\times \sin(\pi \Delta f \Delta t_i) \exp[-j2\pi f_0 \Delta t_i]. \end{aligned}$$

В правую часть выражения входит сомножитель, представляющий собой осциллирующую функцию, которая убывает с расширением частотного интервала усреднения, и обращается в ноль для Δf , кратных $1/\Delta t_i$. Из этого следует, что $|\dot{\epsilon}_i(f_0, \Delta f)| = 0$ для $\Delta f = 1/\Delta t_i$ и $|\dot{\epsilon}_i(f_0, \Delta f)| \ll |\dot{Z}_{PH, sph}(f_0, \Delta f)|$ для $\Delta f > 1/\Delta t_i$.

Изложенный принцип оценивания ППИ излучателя и приемника в свободном поле по характеристике, измеренной при непрерывном излучении в бассейне, иллюстрируют данные рис. 1, полученные в результате специального эксперимента. Измерения ППИ излучателя и приемника проводились на глубине 1.44 м в полузаглушенном измерительном бассейне с одной отражающей поверхностью (поверхностью воды) при расстоянии между излучателем и приемником 0.5 м. При таком расположении разность хода прямой и отраженной волн $\Delta r = 2.4$ м и частотный интервал

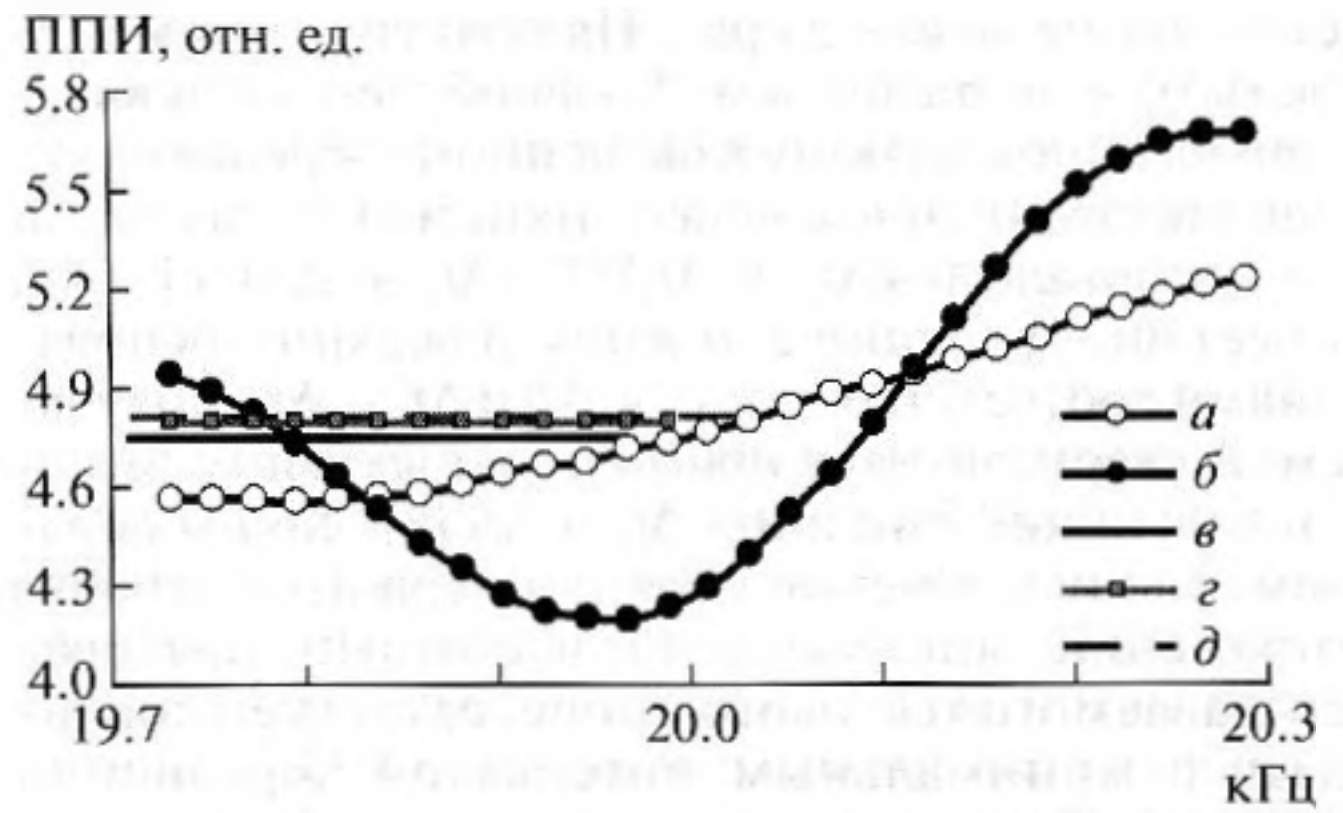


Рис. 1. Частотные зависимости модуля ППИ излучателя и приемника, измеренные в бассейне с одной отражающей поверхностью в интервале частот $20 \pm \pm 0.3$ кГц в свободном поле (а); при непрерывном излучении (б); значение модуля ППИ в свободном поле на частоте 20 кГц (в), среднее значение модуля ППИ в свободном поле (г), модуль среднего значения ППИ при непрерывном излучении (д).

усреднения $\Delta f = c/\Delta r$ составляет 600 Гц. Зависимости ППИ излучателя и приемника измерялись в частотном интервале 20 ± 0.3 кГц на гармонических сигналах в тонально-импульсном режиме (в свободном поле) и при непрерывном излучении полосового процесса. В частотном интервале 600 Гц фазовая задержка отраженного сигнала изменяется не менее чем на 2π , а вызываемые отражением искажения модуля ППИ описываются знакопеременной функцией. В результате усреднения ППИ в полосе частот 600 Гц влияние отражения исключается практически полностью. Полученная оценка близка к среднему значению ППИ в свободном поле и значению ППИ в свободном поле на средней частоте интервала усреднения, о чем говорит совпадение линий г и д и их близость к линии в.

Обычно первое отражение вносит наибольший вклад в искажения частотной зависимости ППИ излучателя и приемника. Влияние первого отражения исключается практически полностью равнозначным комплексным усреднением частотной зависимости ППИ системы излучатель-незаглушенный бассейн-приемник в строго определенном интервале частот Δf_1 , равном $1/\Delta t_1$. Временные задержки второго и последующих отражений превышают Δt_1 , поэтому усреднение в частотном интервале Δf_1 приводит к уменьшению влияния этих отражений не менее чем в 5 раз.

Если частотная зависимость $\dot{Z}'_{PH, sph}(f)$ измерена в интервале, значительно превышающем Δf_1 , остаточное влияние второго отражения устраняется повторным равнозначным усреднением в частотном интервале $\Delta f_2 = 1/\Delta t_2 < \Delta f_1$. В результате повторного усреднения суммарное уменьшение влияния третьего и последующих отражений со-

ставляет не менее 25 раз. На практике это может оказаться достаточным. Такая обработка эквивалентна однократному взвешенному усреднению с использованием весовой функции $h(f)$, заданной на интервале $[-(\Delta f_2 + \Delta f_1)/2, (\Delta f_2 + \Delta f_1)/2]$. Она имеет вид трапеции с нижним и верхним основаниями соответственно $\Delta f_1 + \Delta f_2$ и $\Delta f_1 - \Delta f_2$, получаемой сверткой двух прямоугольных взвешивающих функций шириной Δf_1 и Δf_2 [7]. Таким образом, для исключения влияния первого и второго отражений минимальный частотный интервал создаваемого тестового процесса должен совпадать с минимальным интервалом усреднения $\Delta f_1 + \Delta f_2$. Последовательное усреднение в трех частотных интервалах Δf_1 , Δf_2 и $\Delta f_3 = 1/\Delta t_3$ позволяет полностью исключить влияние первых трех отражений и ослабляет влияние остальных отражений не менее чем в 125 раз. Таким образом, применяя к частотной зависимости ППИ системы излучатель-незаглушенный бассейн-приемник скользящее комплексное взвешенное усреднение в интервале частот Δf_{wa} , влияние отражений удастся исключить практически полностью. Ширина Δf_{wa} равна сумме частотных интервалов, определяемых значимыми отражениями с весовой функцией $h(f)$, полученной сверткой соответствующих прямоугольных частотных окон. Нетрудно показать, что, несмотря на увеличение интервала взвешенного усреднения Δf_{wa} , фактический интервал усреднения, влияющий на искажения искомой частотной характеристики, увеличивается незначительно, и его можно оценить как немногим превышающий Δf_1 .

Чем больше временная задержка первого отражения, тем уже частотный интервал усреднения и ближе к искомой получаемая характеристика. Для уменьшения интервала усреднения излучатель и приемник в бассейне следует размещать таким образом, чтобы получить максимальную разность хода прямой волны и первого отражения.

Частотный интервал Δf_{wa} , в котором при усреднении обеспечиваются условия, близкие к условиям свободного поля, будем называть частотным интервалом взвешенного усреднения. Частотный интервал Δf_1 , по которому можно оценивать искажение искомой частотной характеристики усреднением, назовем частотным интервалом бассейна Δf_{WT} , $\Delta f_{WT} \leq \Delta f_{wa}$.

Частотный интервал бассейна выразим через скорость звука в воде и разность хода прямой и первой отраженных волн $\Delta f_{WT} = c/\Delta r_1$. Разность хода Δr_1 будем называть эффективным размером бассейна Δr_{eff} . При непрерывном излучении в бассейне условие $\Delta f_{WT} \times \frac{\Delta r_{eff}}{c} = 1$ можно интерпретировать как соотношение для частотно-временных преобразований $\Delta f \times \Delta t = 1$. Чем больше разность хода прямого и первого отраженного сигналов в

бассейне, тем больше его эффективный размер и уже частотный интервал бассейна.

Рассмотренный метод селекции прямой волны излучателя реализует свойство ПФ измерительного бассейна $\dot{\Omega}_{WT}(f)$ в частотном интервале взвешенного усреднения, которое можно выразить следующим соотношением:

$$\left| \frac{1}{\Delta f_{wa}} \int_{\frac{\Delta f_{wa}}{2}}^{\frac{\Delta f_{wa}}{2}} h(f') \dot{\Omega}_{WT}(f - f') df' \right| \approx 1.$$

Скользящее взвешенное комплексное усреднение частотной зависимости ППИ излучателя и приемника позволяет при измерениях в бассейне получать зависимость ППИ, близкую к измеренной в свободном поле. Результатом такой обработки является частотная зависимость ППИ в свободном поле, усредненная в частотном интервале бассейна:

$$\dot{Z}_{PH, sph}(f, \Delta f_{wa}) \approx \frac{1}{\Delta f_{WT}} \int_{\frac{\Delta f_{WT}}{2}}^{\frac{\Delta f_{WT}}{2}} \dot{Z}_{PH, sph}(f - f') df',$$

что составляет "плату" за устранение влияния отражений.

Учитывая, что взвешивающая функция $h(f)$ известна, вызванные усреднением искажения искомой частотной зависимости могут быть в значительной мере ослаблены с помощью хорошо отработанных методов восстановления спектра по форме фильтра. Поскольку обратные Фурье-преобразования $\dot{Z}_{PH, sph}(f, \Delta f_{wa})$, $h(f)$ и $\dot{Z}_{PH, sph}(f)$ связаны соотношением

$$\mathcal{F}^{-1}[\dot{Z}_{PH, sph}(f, \Delta f_{wa})] = \mathcal{F}^{-1}[h(f)] \times \mathcal{F}^{-1}[\dot{Z}_{PH, sph}(f)],$$

"улучшенную" оценку частотной зависимости ППИ излучателя и приемника в свободном поле можно получить, используя выражение:

$$\begin{aligned} \tilde{\dot{Z}}_{PH, sph}(f) &= \\ &= \mathcal{F} \left[\left[\mathcal{F}^{-1}[h(f)] \right]^{-1} \times \mathcal{F}^{-1}[\dot{Z}_{PH, sph}(f, \Delta f_{wa})] \right]. \end{aligned}$$

Такая коррекция результата эквивалентна применению операции деконволюции — обращенной свертки.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА КОМПЛЕКСНОГО УСРЕДНЕНИЯ ППИ ИЗЛУЧАТЕЛЯ И ПРИЕМНИКА ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ В РЕВЕРБИРУЮЩЕМ БАССЕЙНЕ

Качество селекции прямого сигнала при измерениях в ревербирующем бассейне экспериментально оценивалось по данным проверки соблюдения обратно пропорционального закона изменения звукового давления при непрерывном излучении в незаглушенном бассейне (время реверберации 200 мс) шириной 6.5 м, длиной 10 м и заполненным водой на 5 м. Нарушение закона определялось по зависимости значений переходного импеданса "в свободном поле", полученных комплексным усреднением, от расстояния между излучателем и приемником. Для этого строился график зависимости $1/Z_{PH}$ и прямая ее наилучшего приближения. Поскольку в реальном эксперименте данная зависимость может быть искажена рассеянием на корпусах и креплениях гидрофонов, она сравнивалась с зависимостью, полученной при тонально-импульсном излучении. Для уменьшения рассеяния в качестве излучателя и приемника применялись бескорпусные гидрофоны, представляющие собой укрепленные на кабелях пьезоэлектрические сферы, которые устанавливались в бассейне на глубине 2.5 м с помощью штанг в форме иглы. Расстояние между излучателем и приемником изменялось с шагом 0.5 м от 0.83 до 4.3 м. Разность хода прямой волны и первого отражения оставалась постоянной и составляла 2 м. Разность хода для второго отражения изменялась от 4 до 2.1 м. Частотный интервал взвешенного усреднения рассчитывался для каждого положения преобразователей и изменялся от 1071 Гц при минимальном измерительном расстоянии до 1412 Гц при максимальном. Частотные зависимости переходного импеданса излучателя и приемника при непрерывном излучении измерялись с использованием ЛЧМ сигнала, частота которого изменялась не менее чем на 1412 Гц. Для каждого измерительного расстояния комплексное усреднение частотной зависимости переходного импеданса проводилось в соответствующем интервале частот.

На рис. 2 приведены частотные зависимости ППИ излучателя и приемника, полученные в интервале частот (17.8–22.2) кГц при расстояниях между излучателем и приемником 0.83 и 4.3 м соответственно. Рядами 2 и 3 показаны зависимости модуля ППИ, полученные соответственно после первого и второго равноточного скользящего усреднения комплексной частотной зависимости ППИ излучателя и приемника. Рядом 1 представлены значения модуля не усредненной комплексной частотной зависимости. Чтобы показать разницу между комплексным и не комплексным усреднением, рядом 4 представлены

зависимости, полученные после первого и второго равноточного скользящего усреднения ряда 1 (не комплексное усреднение). Не комплексное скользящее усреднение частотной зависимости модуля ППИ излучателя и приемника приводит к появлению положительного смещения, обусловленного энергетическим вкладом отражений. Смещение зависит от частоты и взаимного расположения излучателя и приемника в бассейне. При расстоянии 0.83 м между излучателем и приемником смещение составляет от 12 до 15%. При расстоянии 4.3 м смещение в 2–3 раза превышает значения ППИ излучателя и приемника в свободном поле. Из этого следует, что усреднение модуля частотной зависимости ППИ излучателя и приемника не позволяет получать несмещенную оценку ППИ в свободном поле.

Параметры первого комплексного усреднения выбраны так, чтобы исключить влияние первого отражения, при этом влияние остальных отражений подавляется недостаточно. Оставшиеся искажения почти полностью исключаются вторым комплексным усреднением, что демонстрируют ряды 2 и 3. Результирующие зависимости ППИ излучателя и приемника, полученные при разных расстояниях, практически совпадают. Различия, полученные для расстояний 0.83 и 4.3 м, не превосходят половины процента. При комплексном усреднении смещения не возникает, что подтверждается совпадением результатов, полученных при непрерывном и тонально-импульсном излучении.

Отметим, что остаточные искажения после первого комплексного усреднения оказываются во много раз меньше, чем искажения исходной характеристики. Это означает, что если искомой характеристикой является не комплексная частотная зависимость, а ее модуль, то она может быть получена не комплексным повторным усреднением. При этом смещение, обусловленное энергетическим вкладом остаточных искажений, будет вызывать пренебрежимо малое смещение. Практического выигрыша это не дает, поскольку частотный интервал взвешенного усреднения остается неизменным.

На рис. 3а приведены зависимости значений $1/Z_{PH}$ от расстояния r_{PH} между излучателем и приемником, полученные для частот 10 и 20 кГц при непрерывном и тонально-импульсном излучении, и прямые наилучшего приближения зависимостей для тонально-импульсного излучения. Для частоты 10 кГц несовпадения зависимостей при непрерывном и тонально-импульсном излучении не превышают 0.5% на расстояниях до 3 м, и достигают 2% на расстояниях более 3 м. Примерно на столько же зависимость при непрерывном излучении отклоняется от прямой наилучшего приближения зависимости при тонально-импульсном излучении. На частоте 20 кГц откло-

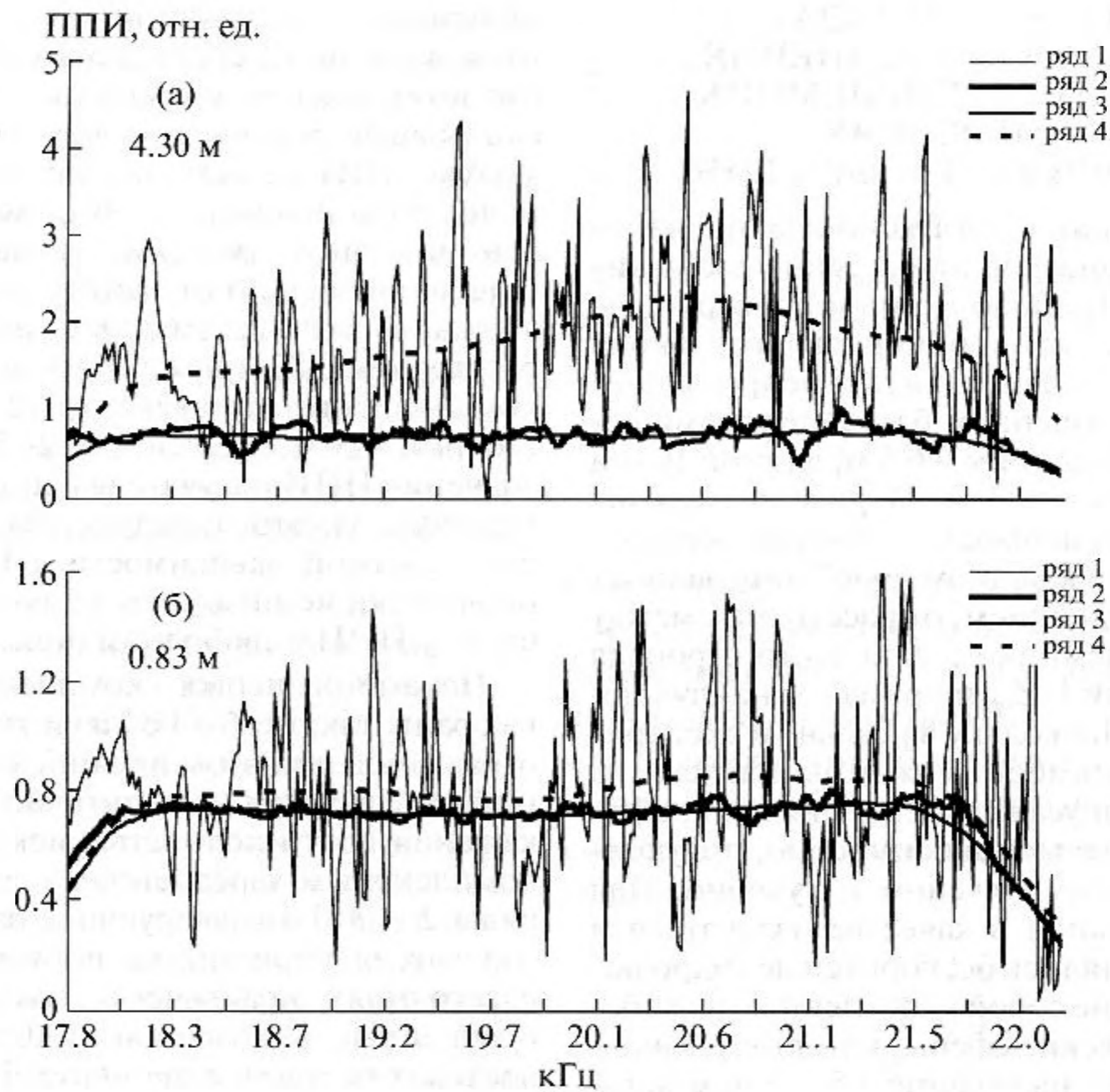


Рис. 2. Частотные зависимости ППИ при расстояниях между излучателем и приемником 4.30 м (а) и 0.83 м (б) при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне.

нения зависимости при непрерывном излучении от зависимости при тонально-импульсном излучении и прямой ее наилучшего приближения не превышают 0.5%. На рис. 3б представлены зависимости, аналогичные показанным на рис. 3а, для частот 63 и 100 кГц. В этом случае несовпадение зависимостей при непрерывном и тонально-импульсном излучении и их отклонения от прямых наилучшего приближения зависимостей при тонально-импульсном излучении не превосходят 0.8–1.7%. Это свидетельствует о том, что примененный метод скользящего взвешенного усреднения комплексной частотной зависимости дает результаты, совпадающие с требуемой для эталонных измерений точностью результатов, полученных тонально-импульсным методом. Близость полученных зависимостей к теоретическим прямым позволяет применить указанный метод в процедуре градуировки методом взаимности.

Для решения многих измерительных задач приемник должен быть отградуирован “в диффузном поле”. Диффузное поле определено как поле, одновременно являющееся изотропным (направления распространения звуковой волны в каждой точке равновероятны) и однородным (плотность энергии в заданной области простран-

ства статистически равномерна) [8]. Следствиями, вытекающими из этого определения, являются отсутствие обратно пропорционального закона изменения звукового давления при изменении расстояния между излучателем и приемником и отсутствие в диффузном поле свойства “направленности” приемника. Диффузное поле создают в реверберационной камере при излучении непрерывного полосового процесса (детерминированного или случайного). На рис. 4 приведены характеристики направленности гидрофона, измеренные в реверберирующем бассейне при непрерывном излучении с использованием предложенного метода (ряды 2 и 4) и при тонально-импульсном излучении (ряды 1 и 3). Полученные характеристики практически не различаются (несовпадения ряда 1 с рядом 2 и ряда 3 с рядом 4 не превышают 0.15 дБ). Приведенные результаты показывают, что при непрерывном излучении в реверберационной камере (реверберирующем бассейне) рассмотрение поля, как диффузного, неверно. Таким способом создается реверберирующее поле, которое оказывается полностью детерминированным. Применение соответствующей обработки позволяет выделять амплитуду и фазу как прямой волны, падающей с опорного

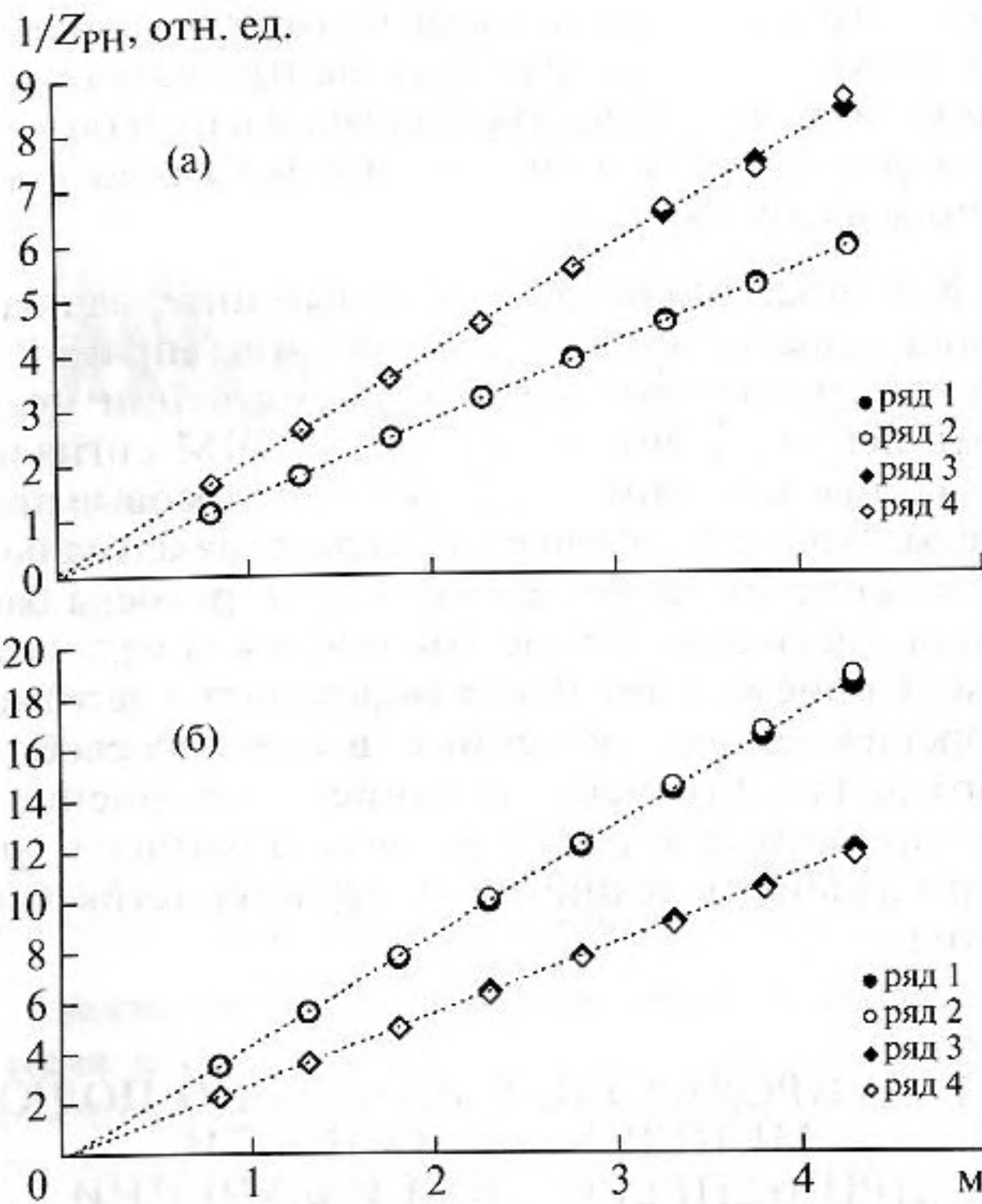


Рис. 3. Зависимость $1/Z_{RH}$ от расстояния между излучателем и приемником: (а) на частоте 10 кГц при тонально-импульсном (ряд 1) и непрерывном (ряд 2) излучении, на частоте 20 кГц при тонально-импульсном (ряд 3) и непрерывном (ряд 4) излучении; (б) на частоте 63 кГц при тонально-импульсном (ряд 1) и непрерывном (ряд 2) излучении, на частоте 100 кГц при тонально-импульсном (ряд 3) и непрерывном (ряд 4) излучении.

направления, так и отраженных волн. Этот факт объясняет причину того, что на практике при градуировке приемника “в диффузном поле” приходится изменять взаимное расположение приемника и излучателя в реверберационной камере и усреднять результаты, полученные при различных расположениях. Таким образом, вопреки распространенному мнению, возможность получения в реверберирующем поле характеристик, близких к характеристикам в диффузном поле, не исключает возможности получения характеристик, близких к свободному полю.

Обычно в качестве технических характеристик бассейна указывают его геометрические размеры и время реверберации. Эти параметры позволяют определять предельные соотношения для длительности и периода повторения тональных импульсов, при которых удастся обеспечивать условия свободного поля с использованием временной селекции [9]. Улучшения технических характеристик бассейна (расширения частотного диапазона измерений, уменьшения отражений, снижения времени реверберации) добиваются за счет увеличения размеров и применения трудо-

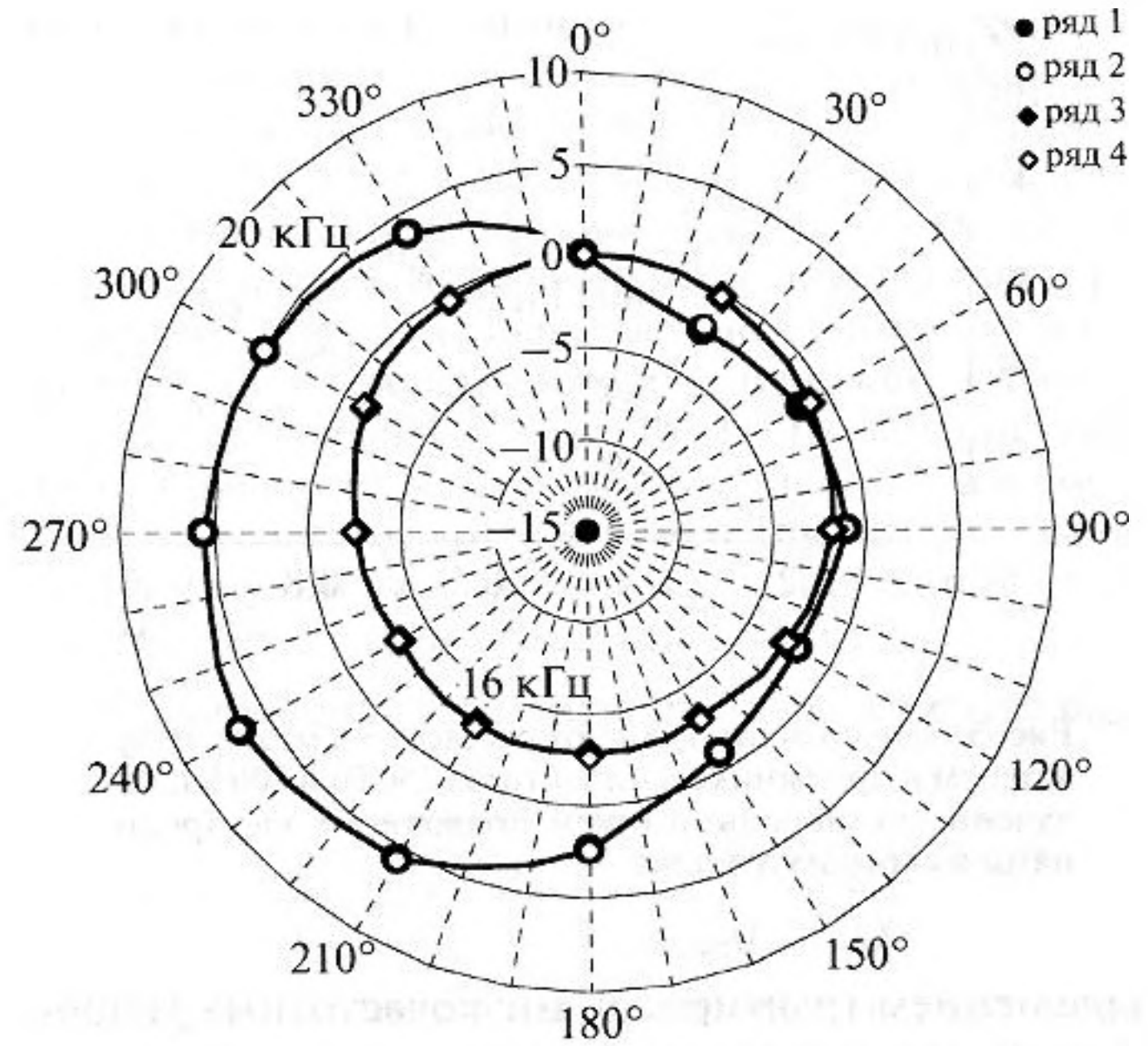


Рис. 4. Характеристики направленности гидрофона, измеренные для частот 16 кГц и 20 кГц при непрерывном (ряды 2 и 4) и тонально-импульсном излучении (ряды 1 и 3).

емких технологий с использованием дорогостоящих звукопоглощающих материалов. Тем не менее, обеспечить приемлемые условия свободного поля в результате таких мер удастся далеко не всегда. Использование свойств ПФ бассейна позволяет расширить возможности измерений в реверберирующем бассейне. При излучении непрерывных процессов условия “свободного поля” ограничены только частотным интервалом, в котором усредняется измеряемая характеристика. Это дает возможность распространить частотный диапазон измерений в свободном поле для реверберирующего бассейна на сверхнизкие частоты, на которых длина волны превышает размеры бассейна. Основная трудность освоения этого частотного диапазона связана лишь с возможностями низкочастотного излучателя.

Для излучения на низких частотах был применен подводный излучатель электродинамического типа. На рис. 5 приведены зависимости $1/Z_{RH}$ от расстояния между излучателем и приемником, полученные на частотах 250 и 800 Гц для гидрофона и этого излучателя. Как следует из рис. 5, обратно пропорциональный закон изменения давления с высокой точностью выполняется и на частотах, сверхнизких для измерений в свободном поле. Оставляя за рамками рассмотрения вопрос об обратимости примененного излучателя, на основании полученных результатов можно заключить, что для градуировки приемников звукового давления по полю на этих частотах можно применять метод сличения. Это было подтверждено

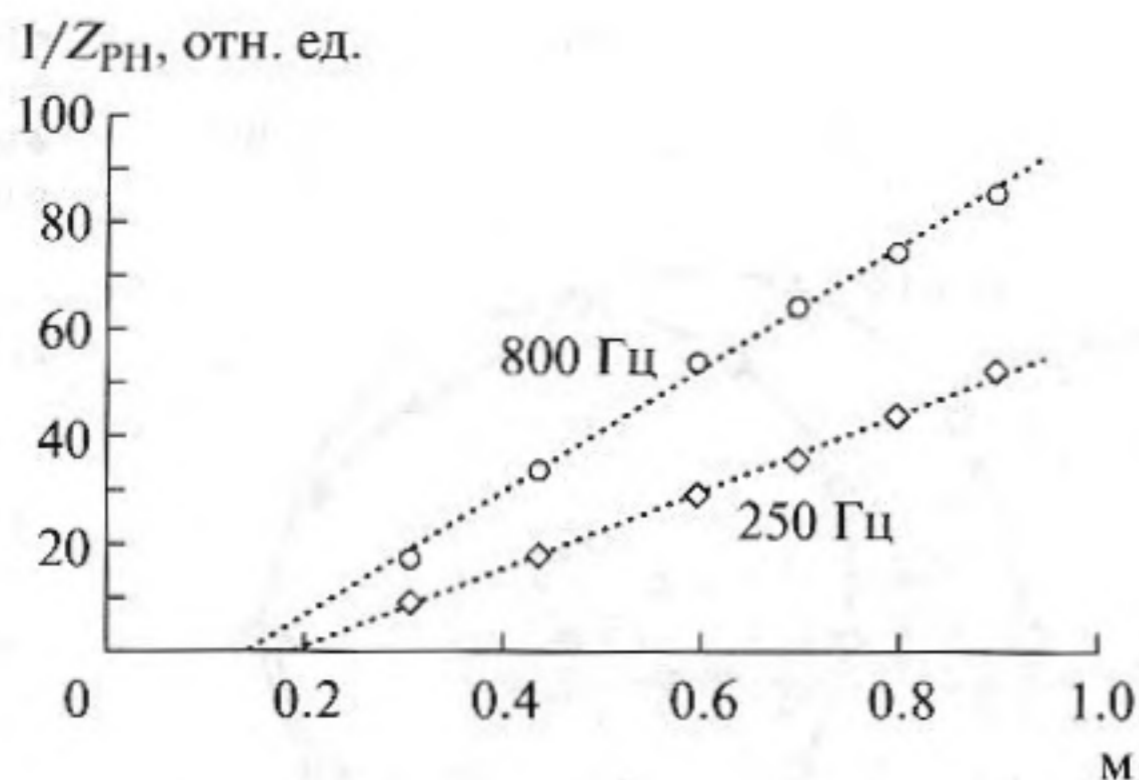


Рис. 5. Зависимость $1/Z_{PH}$ от расстояния между излучателем и приемником на частотах 250 Гц и 800 Гц, полученные с использованием подводного электродинамического излучателя.

сравнением градуировок низкочастотных гидрофонов, выполненных методом сличения, с эталонным гидрофоном, отградуированным по давлению, и обладающим пренебрежимо малой дифракцией на частотах ниже 1 кГц. Таким образом, в результате применения предложенного метода частотный диапазон градуировки по полю в реверберирующем бассейне с минимальным размером 6 м удалось расширить до частот 200–250 Гц.

При наличии отражений (рассеяния) прямые наилучшего приближения зависимости $1/Z_{PH}$ от расстояния между излучателем и приемником r_{PH} не могут быть использованы для определения расстояния между точками излучения и приема (акустическими центрами излучателя и приемника). Применение рассмотренного метода настолько ослабляет влияние отражений при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне, что позволяет по прямым наилучшего приближения графиков $1/Z_{PH}$ определять зависимость положения точки излучения (приема) от частоты. При построении зависимостей (рис. 3 и 5) в качестве расстояния r_{PH} принималось расстояние между геометрическими центрами излучателя и приемника. На рис. 3 прямые наилучшего приближения пересекают ось расстояний близко к началу координат. Это означает, что при излучении и приеме сигнала гидрофонами со сферическими активными элементами, точки излучения и приема практически совпадают с геометрическими центрами активных элементов гидрофонов. Точки пересечения прямых наилучшего приближения с осью расстояний на рис. 5 смещены относительно начала координат. Эти смещения зависят от частоты и обусловлены электродинамическим излучателем, форма “активного элемента” которого несимметрична относительно геометрического центра. Частотная зависимость смещения точки пересечения оси расстояний прямой наилучшего приближения $1/Z_{PH}$ была ис-

пользована для определения частотной зависимости положения акустического центра излучателя, и принималась в качестве поправки к измерительным расстояниям при градуировке гидрофонов методом сличения.

Как показано выше, частотный интервал бассейна определяется разностью хода прямой и первой отраженной волн. При излучении могут быть использованы тональные и ЛЧМ сигналы, случайные и детерминированные полосовые процессы. При градуировке гидрофона максимально возможное значение эффективного размера бассейна для типичного расстояния между излучателем и приемником 0.5 м определяет частотное разрешение при измерениях “в условиях свободного поля”. Его использование в дополнение к традиционным характеристикам повышает информативность технических характеристик бассейна.

ГРАДУИРОВКА ГИДРОФОНОВ ПО ПОЛЮ МЕТОДОМ ВЗАИМНОСТИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ИЗЛУЧЕНИИ В НЕЗАГЛУШЕННОМ БАССЕЙНЕ

Весовая функция $h(f)$ в виде трапеции реализует режекторный пространственный фильтр, настроенный на подавление влияния первого и второго отражений. Определив экспериментально временные задержки других значимых отражений, не составляет труда построить режекторный фильтр, настроенный на эти отражения. Искомая характеристика будет представлять собой многократную свертку прямоугольных окон, реализующих режекторные фильтры для каждого отражения. С увеличением числа учитываемых отражений частотный интервал взвешенного усреднения будет увеличиваться, а форма взвешивающей функции будет стремиться к колоколообразной. При этом частотный шаг измерения ППИ излучателя и приемника должен определяться значимым отражением с наибольшей задержкой. Как показано выше, такое усложнение взвешивающей функции при существующих точностях градуировки является избыточным. Для необходимого ослабления влияния отражений достаточно скользящего комплексного усреднения с применением взвешивающей функции в виде трапеции. Режекторный пространственный фильтр, настроенный на два первых отражения, можно считать близким к оптимальному. Однако для того, чтобы обеспечить близкое к теоретическому подавление более поздних отражений, частотный шаг измерения ППИ излучателя и приемника не должен превышать $1/10$ частотного интервала усреднения для значимого отражения с наибольшей задержкой. Это нетрудно проверить, например, применяя правило Рунге для оценки по-

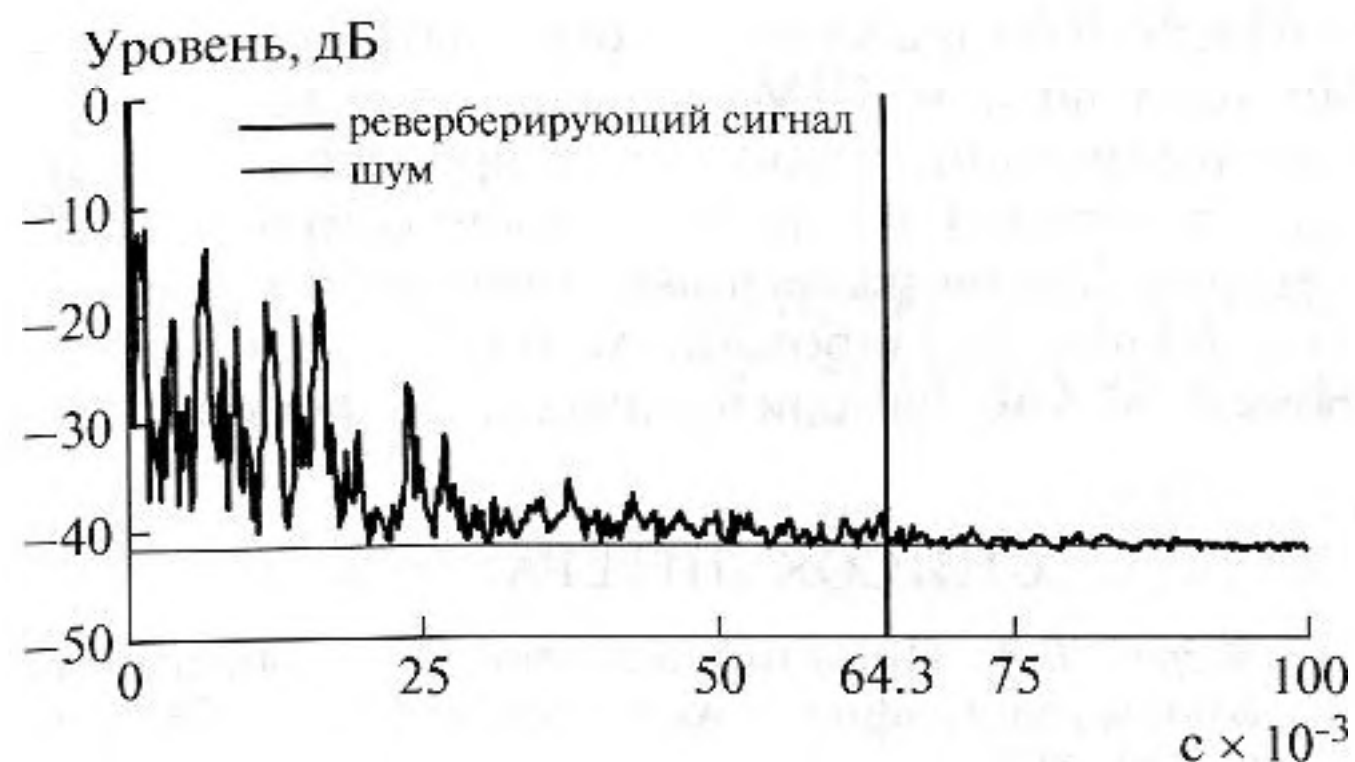


Рис. 6. Временная зависимость уровня реверberирующего сигнала.

грешности квадратурной формулы при интегрировании непрерывной функции.

Рассмотренный метод оценивания ППИ излучателя и приемника был применен для градуировки гидрофонов по полю методом взаимности при непрерывном излучении в незаглушенном бассейне с минимальным размером 6 м и временем реверберации 200 мс. Преобразователи уста-

навливались на глубине 3 м, расстояние между излучателями и приемниками составляло 0.5 м. Временные задержки первого и второго отражений относительно прямого сигнала излучателя составляли 3.8 и 4.1 мс соответственно. На рис. 6 приведена временная зависимость уровня реверberирующего сигнала при данном расположении гидрофонов. Уровень реверberирующего сигнала уменьшается за 64.3 мс на 40 дБ, что и было принято в качестве критерия значимого отражения. При этом частотный шаг измерений зависимости ППИ излучателя и приемника составляет 1.5 Гц, а частотный интервал бассейна 263 Гц.

Чувствительность гидрофона рассчитывалась по формуле:

$$M_H(f) = \sqrt{J_{sph}(f) \frac{|\dot{Z}_{PH,sph}(f, \Delta f_{wa})| |\dot{Z}_{TH,sph}(f, \Delta f_{wa})|}{|\dot{Z}_{PT,sph}(f, \Delta f_{wa})|}}$$

где $J_{sph}(f)$ – частотная зависимость параметра взаимности, $\dot{Z}_{PH,sph}(f, \Delta f_{wa})$, $\dot{Z}_{TH,sph}(f, \Delta f_{wa})$ и $\dot{Z}_{PT,sph}(f, \Delta f_{wa})$ – оценки частотных зависимостей в свободном поле ППИ излучателя и гидрофона, обратимого преобразователя и гидрофона, излучателя и обратимого преобразователя соответственно. Коррекция оценок на форму характери-

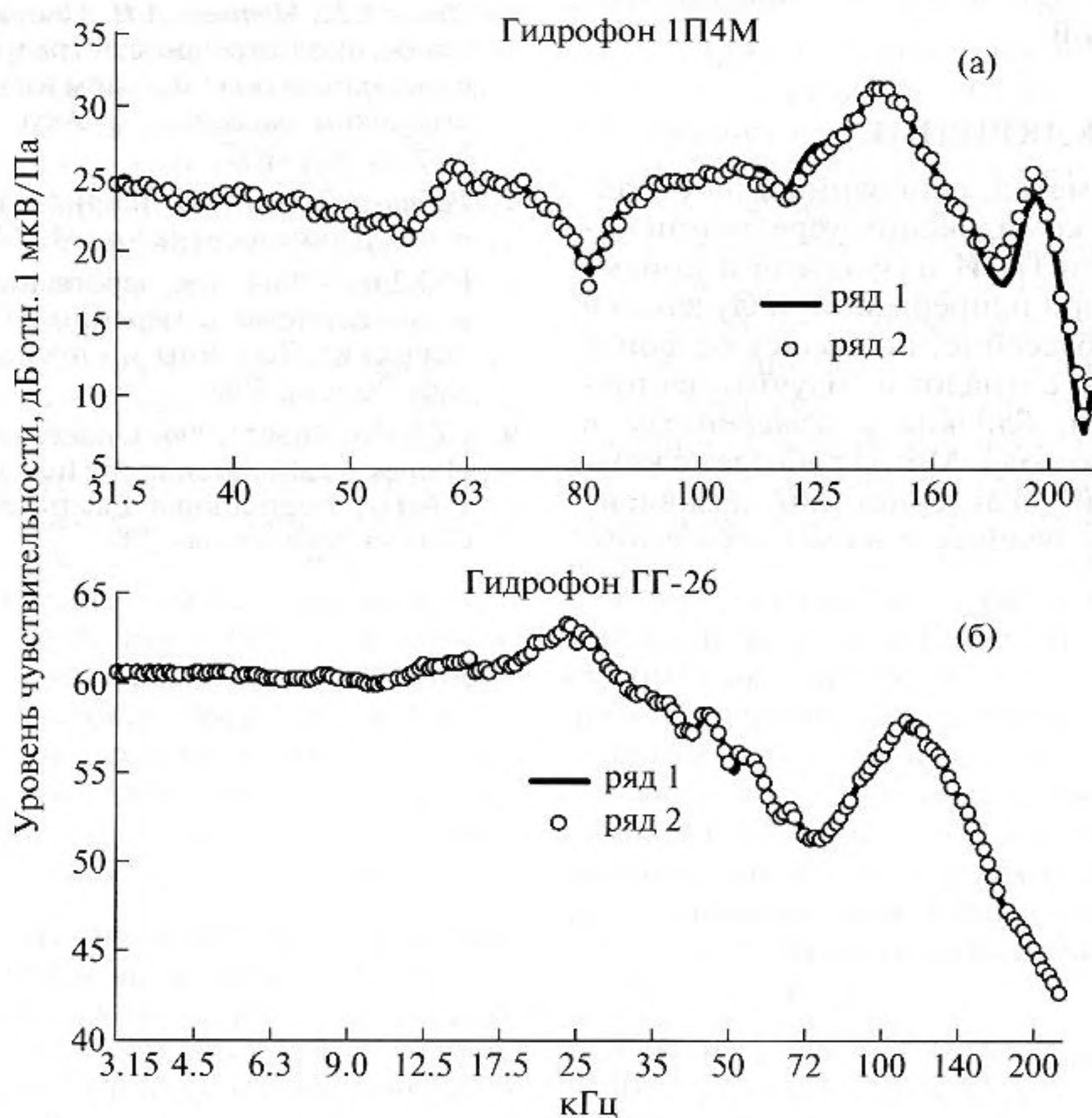


Рис. 7. Частотная характеристика чувствительности гидрофонов 1П4М (а) и ГГ-26 (б), измеренные при непрерывном излучении (ряд 1) и на тональных импульсах с частотами 1/48 октавы (ряд 2).

стики режекторного фильтра (обращенная свертка) не проводилась.

На рис. 7 рядами 1 и 2 приведены результаты градуировки гидрофонов 1П4М и ГГ-26 при непрерывном излучении и на тональных импульсах с частотами 1/48 октавы соответственно. Количество значений, полученных при непрерывном излучении, значительно превышает 48 в октавном интервале частот. Представленные зависимости показывают хорошее совпадение результатов градуировок гидрофона ГГ-26 (различия рядов 1 и 2 не превосходят 0.03 дБ). Результаты для гидрофона 1П4М также показывают хорошее совпадение, исключая участки антирезонансов. Несовпадения результатов на этих участках не превышают 1 дБ (погрешность применяемой эталонной установки), при этом ширина участков составляет малую долю октавы.

Непрерывный режим излучения вызывает погрешность, обусловленную подстановкой в формулу измерений значений ППИ, полученных усреднением в интервале частот бассейна. Отличие чувствительности от результата, получаемого на гармонических сигналах стандартным методом взаимности, проявилось на частотах, близких к выраженным резонансам гидрофонов, где чувствительность резко изменяется с изменением частоты. Это составляет "плату" за снижение трудоемкости измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный метод, основанный на скользящем взвешенном комплексном усреднении частотной зависимости ППИ излучателя и приемника, измеренной при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне, позволяет ослабить влияние отраженных сигналов и получить частотные характеристики, близкие к измеренным в условиях свободного поля. Метод работает с комплексной частотной характеристикой независимо от способа ее получения и вида излучаемого

сигнала. При излучении могут быть использованы тональные и ЛЧМ сигналы, случайные и детерминированные полосовые процессы (в отличие от метода СВЗ, использующего только ЛЧМ сигнал). Метод реализован и успешно применяется в специализированном эталоне для градуировки рабочих измерительных гидрофонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев В.А. Принцип акустического обращения волн и голография // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 792–801.
2. Зверев В.А. Получение изображения акустической антенной через слой неоднородностей // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 1. С. 62–67.
3. Зверев В.А. Обращение волнового фронта для снижения влияния многолучевости на результат активной локализации // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 6. С. 814–819.
4. Pedersen P.C., Lewin P.A., Bjorno L. Application of time-delay spectrometry for calibration of ultrasonic transducers // IEEE Trans. On Ultrasonics, ferroelectric and frequency control. 1988. V. 35. № 2. P. 185–205.
5. Бендат Дж, Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. Пер. с англ. / Под ред. Г.Я. Мирского. М.: Мир, 1974. 464 с.
6. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Смелов В.А., Шелкунов А.И. Снижение погрешности градуировки гидрофонов в свободном поле методом взаимности в гидроакустическом бассейне. // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 5. С. 628–637.
7. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 848 с.
8. Р50.2.037-2004. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения гидроакустические. Термины и определения. М.: Госстандарт России, 2004.
9. CEI/IEC 60565:2006. Underwater acoustics – hydrophones – calibration in the frequency range 0.01 Hz to 1 MHz. International Electrotechnical Commission. Geneva. Switzerland. 2006.