АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2015, том 61, № 6, с. 736–744

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.6

ЛАБОРАТОРНАЯ ГРАДУИРОВКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА В РЕВЕРБЕРАЦИОННОМ ПОЛЕ ШУМОВОГО СИГНАЛА

© 2015 г. А. Е. Исаев, И. В. Черников

ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений"
141570 Московская обл., Солнечногорский р-н, г.п. Менделеево
Тел. 8 (495) 660-21-66, факс 8 (495) 660-25-39
E-mail: isaev@vniiftri.ru

Поступила в редакцию 21.01.2015 г.

При выполнении градуировочных работ целесообразно измерять комплекс подробных частотных характеристик гидроакустического приемника с тем, чтобы на его основе получать частные характеристики, адекватные целям и условиям применения приемника по назначению. Показана возможность использования для этого реверберационного поля шумового сигнала в сочетании с обработкой методом скользящего комплексного взвешенного усреднения. Приведены результаты градуировки гидроакустических приемников в шумовом реверберационном поле лабораторного бассейна.

Ключевые слова: гидроакустический приемник, измерение подводного шума, шумовое реверберационное звуковое поле, градуировка.

DOI: 10.7868/S0320791915050093

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия круг задач гидроакустических измерений стремительно расширился в связи с общим ухудшением состояния прибрежных зон Мирового океана. Введение в действие международно-правовых документов по защите и поддержанию благоприятного экологического статуса морской среды и вызванная этим стандартизация измерений подводного шума антропогенного происхождения значительно увеличили спрос на точные гидроакустические измерения.

При измерениях уровней подводного шума (УПШ) в морских условиях гидрофон устанавливают в специальную конструкцию, называемую системой вывешивания или носителем гидрофона [1]. Акустическим характеристикам такого приемника не уделяли пристального внимания, когда погрешности измерений УПШ оценивались в 4–6 дБ. Сегодня в соответствии с требованиями стандартов погрешность измерений УПШ корабля не должна превышать 1.5–3 дБ [2]. Проведенные в нашей стране и за рубежом исследования показали, что измерителю УПШ свойственна высокая, с глубокими провалами, изрезанность частотной характеристики. Обеспечение требуемой точности потребовало как совершенствования конструкции приемника, так и выполнения градуировки приемника в частотных полосах, используемых для измерения УПШ. Поскольку габариты приемника значительно превышают размеры гидрофона, выполнение критерия дальнего поля потребовало многократно увеличить расстояние между излучателем и приемником. Возможность измерения подробных частотных характеристик оказалась весьма полезной как для исследований и совершенствования акустических свойств, так и для градуировки приемника, предназначенного для измерения УПШ [3].

Технические регламенты, регулирующие работы на шельфе, предполагают в числе прочего нормирование и измерение пиковых значений акустического импульса морского копра. Необходимость таких измерений резко ужесточает требования к гидроакустическому приемнику, при этом знание подробной частотной характеристики становится обязательным, поскольку необходимо гарантировать отсутствие крутых пиков и провалов на характеристике приемника.

Получение подробных частотных характеристик требует больших объемов измерительной информации, которые не может обеспечить тонально-импульсный метод, традиционно применяемый при градуировке гидрофонов. Для этих целей при выполнении градуировочных работ предпочтительно использовать сигнал с распределенной по частоте мощностью, например, шумовой и частотно модулированный [3–5]. В настоящей статье вниманию специалистов предложены новые результаты по градуировке гидроакустического приемника в шумовом реверберационном звуковом поле.

ГРАДУИРОВКА В ШУМОВОМ РЕВЕРБЕРАЦИОННОМ ЗВУКОВОМ ПОЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНИКИ СКВУ

Первые исследования шумового звукового поля в гидроакустическом бассейне ВНИИФТРИ с точки зрения его пригодности для метрологических целей были выполнены в 1960–1961 гг. Д.З. Лопашевым, который в экспериментах с шумовым сигналом опирался на статистическую теорию реверберации и применял методы архитектурной акустики. Более 50 лет назад Д.З. Лопашев сделал вывод о возможности использования реверберационного поля шумового сигнала в бассейне для прямых измерений чувствительности по диффузному полю с погрешностью 2.5–3 дБ [6]. Использовать шумовое реверберационное поле для получения других характеристик приемника с приемлемой точностью до настоящего времени не удавалось.

Такую возможность предоставил метод скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) частотной зависимости передаточного импеданса пары излучатель–приемник в реверберационном звуковом поле [3]. Измерение передаточных импедансов трех пар излучатель–приемник позволяет в отсутствие эталонного гидрофона использовать для градуировки абсолютный метод – метод взаимности [7]. Основу измерительной процедуры составляет получение подробной комплексной частотной зависимости передаточного импеданса пары излучатель–приемник. При выполнении градуировочных работ в шумовом реверберационном поле процедура предусматривает следующие операции:

– определение временны́х задержек τ_i отражений, подлежащих подавлению;

– вычисление для каждого подавляемого отражения частотного интервала усреднения $f_i = 1/\tau_i$;

– регистрация спектров тока через излучатель $S_i(f)$ и спектров выходного напряжения приемника $R_i(f)$;

– вычисление спектров мощности $|S_i(f)|^2 = S_i(f)S_i(f)^*$ (* означает комплексное сопряжение) и текущих взаимных спектров $R_i(f)S_i(f)^*$;

– получение оценок спектра мощности $\langle|S_i(f)|^2\rangle$ и взаимного спектра $\langle R_i(f)S_i(f)^*\rangle$ ($\langle\ldots\rangle$ обозначает усреднение по реализациям);

– расчет комплексного передаточного импеданса пары излучатель–приемник в реверберационном поле $Z_{RF}(f)$ по формуле $Z_{RF}(f) = \langle R_i(f)S_i(f)^*\rangle/\langle|S_i(f)|^2\rangle$.

Комплексный передаточный импеданс пары излучатель–приемник в свободном поле $Z_{FF}(f)$ получают обработкой передаточного импеданса пары в реверберационном поле $Z_{RF}(f)$ по методу СКВУ:

$$Z_{FF}(f) = \frac{1}{\Delta f_{wa}} \int\limits_{-\Delta f_{wa}/2}^{\Delta f_{wa}/2} Z_{RF}(f - f')h_{WT}(f')df',$$

где Δf_{wa} – частотный интервал взвешенного усреднения, равный сумме Δf_i, $h_{WT}(f)$ – взвешивающая функция. На практике взвешенное усреднение реализуют последовательными равновзвешенными усреднениями в частотных интервалах Δf_i. Таким способом получают характеристику заграждения многополюсного режекторного пространственного фильтра [3]. Настройка фильтра на времена прихода нескольких отражений обеспечивает подавление вызванных отражениями искажений частотной характеристики, вполне достаточное для эталонных измерений по полю [8].

СИГНАЛЫ ДЛЯ ГРАДУИРОВОЧНЫХ РАБОТ В БАССЕЙНЕ

На рис. 1а, 1б и 1в показаны осциллограммы выходного напряжения гидрофона в реверберационных звуковых полях с момента начала излучения в лабораторном бассейне тонального импульса, ЛЧМ и шумового сигналов соответственно. На рис. 1а легко выделить визуально прямой импульс излучателя в свободной от отражений начальной части осциллограммы. Тонально-импульсный метод предполагает измерение амплитуды прямого сигнала излучателя, который получают временно́й селекцией принятого сигнала.

В силу особенностей сигналов с частотной модуляцией реверберационное поле ЛЧМ-сигнала в точке приема имеет два информативных признака, полезных для выделения сигнала прямой волны: первый – разное время прихода прямой и отраженных волн, второй – разные мгновенные частоты прямой и отраженных волн. Известный метод спектрометрии временны́х задержек (СВЗ) основан на использовании второго информационного признака. Отличие метода СКВУ от СВЗ состоит в том, что он основан на использовании первого признака – различии времен прихода волн в точку приема. Это позволяет методу СКВУ быть независимым от вида излучаемого сигнала и формируемого им в лабораторном бассейне реверберационного звукового поля.

Недостатки ЛЧМ-сигнала. Метод СВЗ существенно уступает тонально-импульсному методу в точности, вследствие чего не получил распространения для эталонных измерений. На результаты, полученные с применением ЛЧМ-сигнала, оказывают влияние переходные процессы в излучателе, приемнике, приемно-измерительном тракте. Погрешность измерений на ЛЧМ-сигнале возрастает для резонансных преобразователей. Результат измерений в значительной степени зависит от параметров ЛЧМ-сигнала, что вынуждает использовать предварительные эксперименты, например, измерения с очень медленным изменением частоты. Акустическое поле в точке приема ЛЧМ-сигнала – нестационарное реверберационное поле, поскольку мгновенные частоты прямого и отраженного

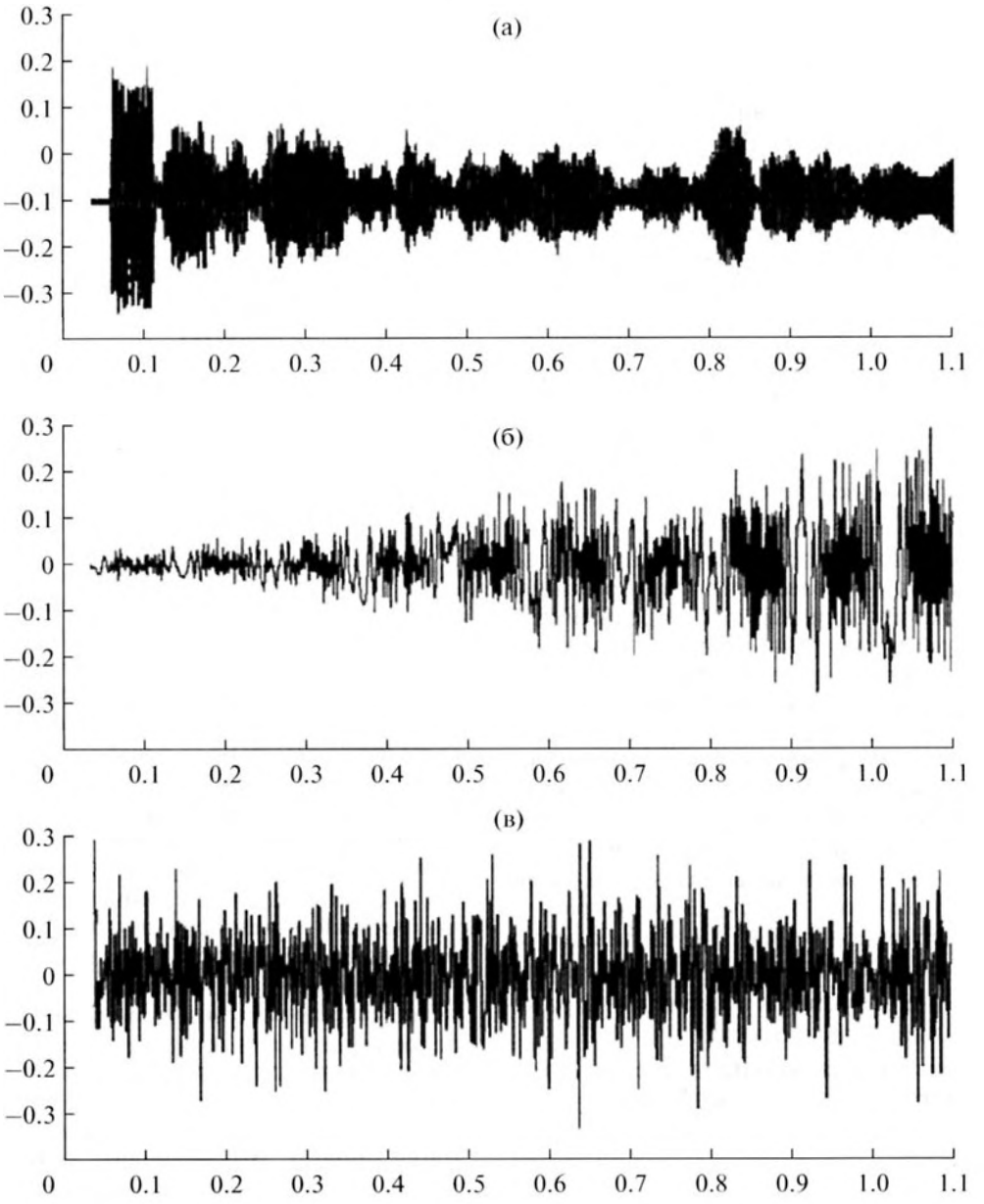

Рис. 1. Осциллограммы выходного напряжения гидрофона в реверберационных звуковых полях: (а) тонального импульса, (б) ЛЧМ и (в) шумового сигналов.

ЛЧМ-сигналов постоянно изменяются и никогда не совпадают.

Первые из перечисленных недостатков носят общий характер. На последнем остановимся подробнее. Рассмотрение его как недостатка выглядит парадоксальным, поскольку благодаря именно этому "недостатку" удается выделить прямой ЛЧМ-сигнал на фоне отражений методом СВЗ.

Нестационарное влияние отражений. Число отражений, вносящих вклад в искажения измеряемой частотной зависимости, увеличивается по мере прихода в точку приема новых отражений. Зависимость свободна от искажений в начальном частотном интервале; искажена только одним (первым) отражением в частотном интервале, предшествующем второму отражению; второе отражение добавляет свой вклад в искажения и с увеличением времени (частоты ЛЧМ-сигнала) все большее количество отражений искажают экспериментальную зависимость.

Влияние нестационарности на результат обработки методом СКВУ проявляется в искажении искомой характеристики горбами и провалами на частотах, соответствующих приходу отражений в точку приема [4]. В том, что эти искажения ложные, нетрудно убедиться, уменьшив либо увеличив скорость изменения частоты. При этом ложные горбы

и провалы на частотной зависимости окажутся сдвинутыми в сторону низких либо высоких частот.

Нарушение амплитудной модуляции ЛЧМ-сигнала. Из-за разницы времен прихода прямой и отраженной волн в точку приема законы амплитудной модуляции прямого и отраженного сигналов оказываются различными: отраженный ЛЧМ-сигнал всегда промодулирован по закону модуляции прямого ЛЧМ-сигнала, сдвинутого по времени на задержку отражения. Несовпадение амплитудных модуляций прямого и отраженных ЛЧМ-сигналов снижает эффективность редактирования экспериментальной частотной зависимости тем больше, чем больше искривлена форма измеряемой частотной зависимости. Это приводит к существенным искажениям искомой частотной зависимости на участках резких изменений [4, 9].

К недостаткам ЛЧМ-сигнала следует отнести появление характерных искажений искомой частотной зависимости при возникновении в измерительном тракте паразитного медленно меняющегося напряжения.

Шумовой сигнал. Использование шумового сигнала позволяет быстро выполнять измерения в широком диапазоне частот, при этом в рассмотренных выше измерительных ситуациях удается преодолеть недостатки ЛЧМ-сигнала.

В противоположность ЛЧМ-сигналу, разница времен прихода в точку приема прямой и отраженной шумовых волн не вызывает различий в их амплитудной модуляции, при этом не снижается эффективность редактирования экспериментальной частотной зависимости и не возникает искажений искомой частотной характеристики на участках ее резких изменений [4].

Состав спектральных компонент отраженных шумовых сигналов не меняется в течение эксперимента и идентичен составу компонент прямого сигнала, вследствие чего количество отражений, вызывающих искажения, не зависит от частоты. Это исключает присущую ЛЧМ-сигналу нестационарность искажений экспериментальной частотной зависимости, а также возникновение ложных горбов и провалов на искомой характеристике [4].

Вместе с тем, измерения на шумовом сигнале многократно уступают ЛЧМ-сигналу по помехозащищенности. Степень подробности частотной характеристики, получаемой в реверберационном поле шумового сигнала, определяет частотный шаг БПФ при заданной длительности сигнала, тогда как излучение квадратурно дополненных ЛЧМ-сигналов позволяет получать несоизмеримо более подробные частотные зависимости.

В силу изложенного шумовой сигнал следует рассматривать не как универсальную замену тонально-импульсному и ЛЧМ-сигналам, а как дополнение к ним, чтобы иметь возможность использовать преимущества каждого из сигналов в конкретных условиях измерительного эксперимента. Это позволяет оперативно выявить погрешности, возникающие при использовании одного из сигналов, исключить промахи и тем самым повысить метрологическую надежность измерений.

ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВОГО РЕВЕРБЕРАЦИОННОГО ПОЛЯ В БАССЕЙНЕ

Отличительной особенностью шумового реверберационного звукового поля в бассейне с отражающими границами является возможность выделения в нем зон свободного поля (прямая волна излучателя доминирует) и диффузного поля (преимущественное направление падения звуковой волны отсутствует), разделенных зоной перехода [6]. По мере удаления от излучателя звуковое поле приближается к диффузному. Свободное поле подразумевает абсолютно детерминированный случай распространения бегущей волны в отсутствие влияния каких-либо преград. В диффузном поле отсутствуют понятия прямой волны излучателя, направления приема (направленности приемника), зависимости акустических параметров поля от пространственной координаты. Близость реверберационного поля к свободному звуковому полю упрощает задачу точных измерений по полю. И наоборот, чем ближе реверберационное поле к диффузному, тем сложнее задача измерений по свободному полю. Соблюдение требований к дистанции дальнего поля при градуировке по свободному полю приемника УПШ больших габаритов вынуждает удалять приемник от излучателя, при этом он попадает в зону диффузного поля. Удаленность приемника осложняет определение характеристик по свободному полю из-за уменьшения отношения сигнал/помеха, но позволяет оценить помехозащищенность метода измерений. В силу перечисленных обстоятельств было важно оценить степень близости поля в бассейне к свободному или диффузному, чтобы определить возможности и границы применимости измерительной процедуры с использованием техники СКВУ.

При исследованиях шумового реверберационного поля излучатель возбуждали продолжительными (значительно превосходящими время реверберации) сигналами “белый шум”. Чтобы иметь возможность сопоставить полученные результаты с приведенными в [6], уровни звукового давления измеряли в частотных полосах шириной 3 кГц и строили зависимости уровней от расстояния до излучателя.

На рис. 2 такие зависимости представлены для полос с центральными частотами 10, 20, 30, 40, 50, 60 и 80 кГц. Наклонными штриховыми прямыми показано поведение уровня звукового давления в свободном поле сферической волны, горизонтальными – уровень звукового давления в идеальном диффузном поле. Положение штриховых прямых

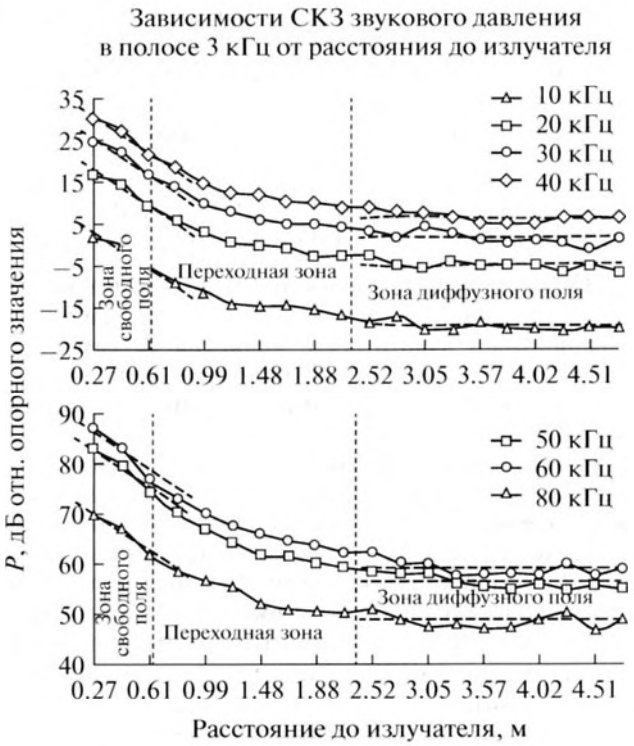

Рис. 2. Зависимости уровней звукового давления в полосе шириной 3 кГц в шумовом реверберационном поле бассейна.

соответствует прямым наилучшего (в смысле метода наименьших квадратов) приближения экспериментальных зависимостей. По отклонению экспериментальных зависимостей от соответствующих прямых наилучшего приближения оценивали близость реверберационного поля к свободному и диффузному. Области, которые в [6] названы зонами свободного поля, диффузного поля и переходной зоной, на рисунке выделены вертикальными пунктирными прямыми.

Оказалось, что выводы, сделанные более 50 лет назад на основании экспериментов, выполненных с использованием примитивной по нынешним меркам техники в отсутствие цифровых технологий, сохраняют свою актуальность и в настоящее время. Приведенные в [6] значения отклонений экспериментальных зависимостей от опорных на ±1...1.3 дБ как в зоне свободного, так и в зоне диффузного поля, протяженность зоны свободного поля от 30 до 60 см от излучателя, значение граничного радиуса примерно равное 1 м, протяженность зоны диффузного поля и ее удаленность от излучателя на 2.5 м можно проверить по поведению экспериментальных кривых в соответствующих областях на рис. 2.

Близость реверберационного поля к диффузному, как, впрочем, и качество измерений по свободному полю, удобно оценивать, используя приемник с существенно неравномерной характеристикой направленности. В диффузном поле направленность приемника отсутствует. Следовательно, какими бы глубокими и узкими провалами ни была изрезана характеристика направленности приемника по свободному полю, на угловой зависимости, измеренной в идеальном диффузном поле, провалы должны отсутствовать, а сама угловая зависимость должна иметь вид окружности. Если зависимость, полученная прямыми измерениями в шумовом реверберационном поле, заметно отличается от окружности, то звуковое поле существенно не диффузное. Изменение характера изрезанности и уменьшение глубины провалов характеристики направленности дают возможность проконтролировать и оценить количественно диффузность звукового поля.

Для экспериментов подобрали приемник с выраженными направленными свойствами. На рис. 3 приведены характеристики направленности приемника на частотах 25 и 30 кГц, кривыми *1* – в свободном поле, измеренные тонально-импульсным методом при расстоянии 0.7 м до излучателя, кривыми *2* – измеренные в частотных полосах 3 кГц в диффузной зоне шумового реверберационного поля. Характеристики по свободному полю изрезаны многочисленными узкими провалами глубиной до 35–40 дБ. Характеристики, представленные кривыми *2*, намного равномернее характеристик в свободном поле: глубокие узкие провалы отсутствуют, а неравномерность не превышает 4–5 дБ. Сравнив неравномерность характеристик направленности по диффузному полю и отклонения уровней звукового давления в области диффузного поля от горизонтальной прямой с типичной погрешностью градуировок рабочих гидрофонов, можно считать звуковое поле в диффузной зоне бассейна хорошим приближением диффузного поля.

Таким образом, условия для измерений по свободному полю в шумовом реверберационном поле бассейна были сочтены достаточно жесткими и весьма подходящими для испытаний разработанной измерительной процедуры градуировки гидроакустического приемника.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ПРОЦЕДУРЫ

Качество реализуемых при измерениях условий свободного поля принято проверять по экспериментальной зависимости звукового давления от расстояния до излучателя. В эксперименте расстояние между излучателем и приемником увеличивали с 0.3 до 5 м с шагом, близким к 0.25 м. На рис. 4 приведены зависимости, обратные экспериментальным, полученным с применением техники СКВУ в реверберационном поле шумового сигнала на частотах 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 кГц. Пунктирными прямыми показано поведение зависи-

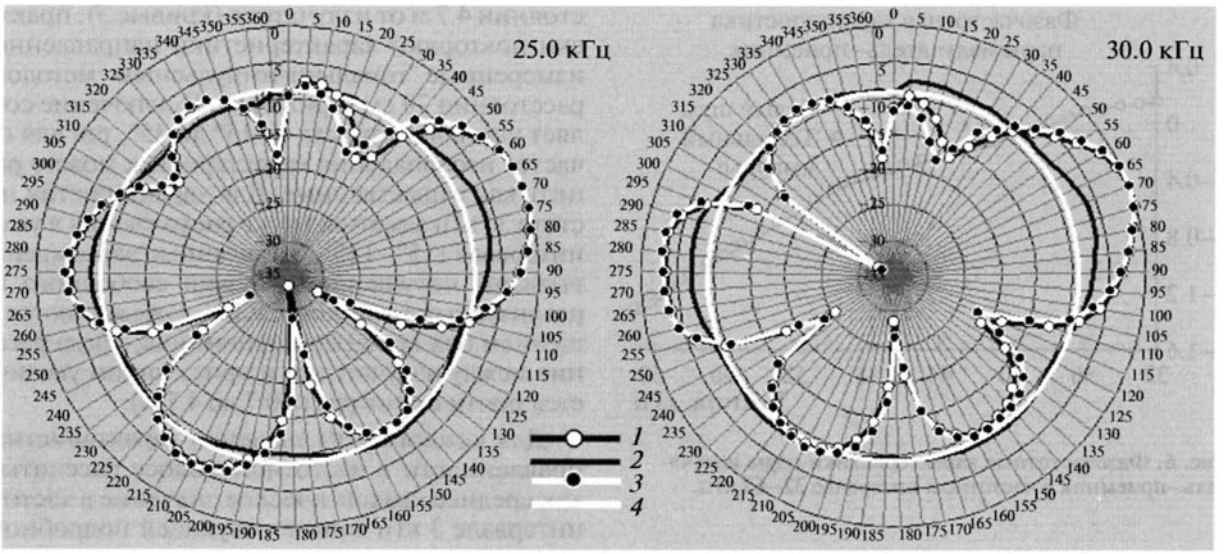

Рис. 3. Характеристики направленности гидроакустического приемника.

мостей в идеальном свободном поле сферической звуковой волны. Отклонения экспериментальных данных от прямых не превосходят 1.3%, безотносительно того, в зоне свободного поля, диффузного поля или переходной зоне находился приемник и на какой частоте выполняли измерения.

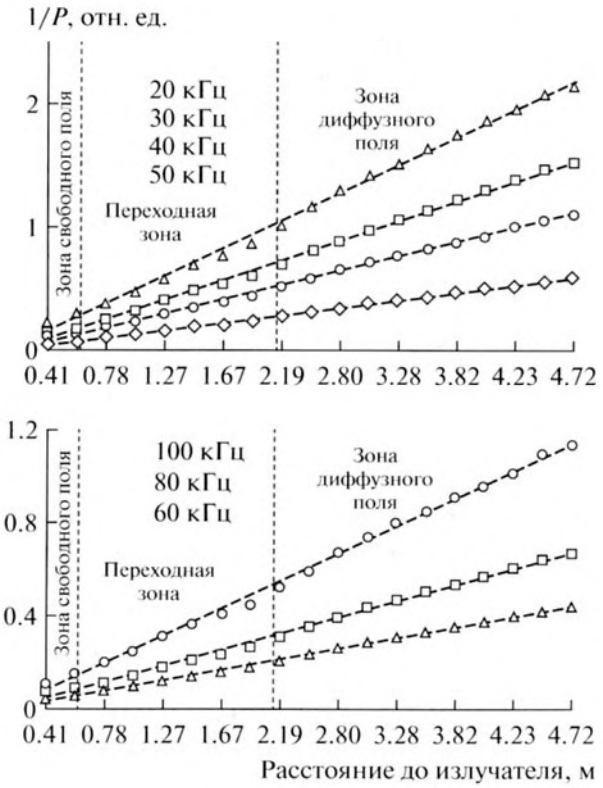

Рис. 4. Экспериментальные зависимости для проверки качества свободного поля.

На рис. 5 изображена приведенная к расстоянию 1 м частотная зависимость пары излучатель–приемник в свободном поле, измеренная тонально-импульсным методом при расстоянии 0.5 м между излучателем и приемником. Для тех же излучателя и приемника в шумовом реверберационном поле с использованием техники СКВУ были измерены 19 частотных зависимостей по свободному полю при изменении расстояния между излучателем и приемником от 0.3 до 5 м. Используя зависимость, полученную тонально-импульсным методом в качестве опорной, рассчитали среднеквадратические отклонения (СКО) зависимостей по свободному полю от опорной. Полученные значения СКО показаны на рис. 5 планками погрешностей в увеличенном масштабе 15 : 1. Для всех частот СКО не превышают 0.3 дБ, хотя и включают результаты на предельных расстояниях между излучателем и приемником. Различия СКО, полу-

Рис. 5. Частотная зависимость пары излучатель–приемник в свободном поле, измеренная тонально-импульсным методом.

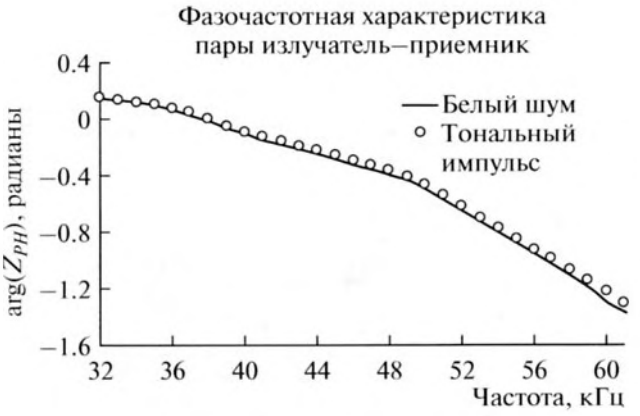

Рис. 6. Фазочастотные характеристики пары излучатель–приемник в частотном интервале 32–63 кГц.

ченных в экспериментах на разных частотах и расстояниях, оказались незначительны и не показали зависимость СКО от частоты либо от близости реверберационного поля к диффузному (данные по СКО для различных дистанций в данной работе не приведены).

На рис. 6 приведены фазочастотные характеристики пары излучатель–приемник, измеренные в частотном интервале 32–63 кГц тонально-импульсным методом при расстоянии 0.5 м между излучателем и приемником и с использованием техники СКВУ в зоне диффузного поля (на расстоянии 4 м от излучателя). Различия в значениях фазового угла, полученных разными методами в свободном поле и в зоне диффузного поля, увеличиваются с частотой, но не превышают 0.1 радиана, что соответствует точности современных эталонов для фазовой градуировки гидрофонов [10, 11].

Для уменьшения погрешности измерений в описанных выше экспериментах в качестве излучателя и приемника использовали гидрофоны с близкой к круговой характеристикой направленности. В экспериментах с направленным приемником приемник устанавливали в зоне диффузного поля на расстоянии 4.7 м от излучателя и ориентировали опорным направлением на излучатель. С помощью техники СКВУ измеряли подробные частотные зависимости пары излучатель–приемник по свободному полю при изменении угла падения на приемник прямой волны излучателя. По полученным частотным зависимостям строили характеристики направленности по свободному полю на отдельных частотах и в частотных полосах. На рис. 3 кривыми *3* показаны характеристики направленности приемника по свободному полю на частотах 25 и 30 кГц, измеренные с использованием техники СКВУ.

Представленные на рис. 3 характеристики направленности по полю, измеренные в диффузной зоне шумового реверберационного поля на расстоянии 4.7 м от излучателя (кривые *3*), практически повторяют характеристики направленности, измеренные тонально-импульсным методом на расстоянии 70 см (кривые *1*). Исключение составляет угловой интервал от 15° до 45°, где для обеих частот несовпадения характеристик можно расценить как существенные. Для характеристик на частоте 30 кГц заметны также расхождения в угловом интервале 115°–125°. Выявленные расхождения не вызваны нарушением условий свободного поля, реализуемых техникой СКВУ, а объясняются смещением оси вращения приемника, когда расстояние между излучателем и приемником увеличивается почти в семь раз (с 0.7 до 4.7 м).

Для каждого угла значения характеристик направленности в частотной полосе рассчитывали как среднее квадратическое значение в частотном интервале 3 кГц соответствующей подробной частотной зависимости пары излучатель–приемник. Характеристики направленности в частотных полосах 3 кГц настолько мало отличаются от соответствующих характеристик на центральных частотах полос 25 и 30 кГц, что не показаны на рис. 3, чтобы его не загромождать. Вследствие того, что точность измерений в свободном поле безэховой камеры превышает точность измерений в диффузном поле, пересчет характеристик по свободному полю в характеристики по диффузному полю в воздушной акустике является стандартной процедурой [12]. Для обеих частот чувствительности по диффузному полю, рассчитанные как средние значения соответствующих характеристик направленности в полосах частот, показаны на рис. 3 окружностями *4*. Поскольку точности измерений в диффузном поле в подводной и воздушной акустике примерно одинаковы, чувствительность по диффузному полю гидроакустического приемника также предпочтительно получать пересчетом из характеристик по свободному полю. Метод СКВУ позволяет определить необходимые для пересчета характеристики по свободному полю с требуемой подробностью в отсутствие безэхового бассейна. Процедура такой градуировки по диффузному полю выглядит несколько парадоксальной: излучая шумовой сигнал, в бассейне создают реверберационное поле, потом в реверберационном поле определяют частотные характеристики гидроакустического приемника по свободному полю, избавляясь тем самым от диффузных свойств поля с тем, чтобы затем пересчитать результат в чувствительность приемника по диффузному полю.

ГРАДУИРОВКА ПРИЕМНИКА ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ

Особенность экспериментов с измерением характеристик направленности состояла в том, что в качестве направленного приемника использова-

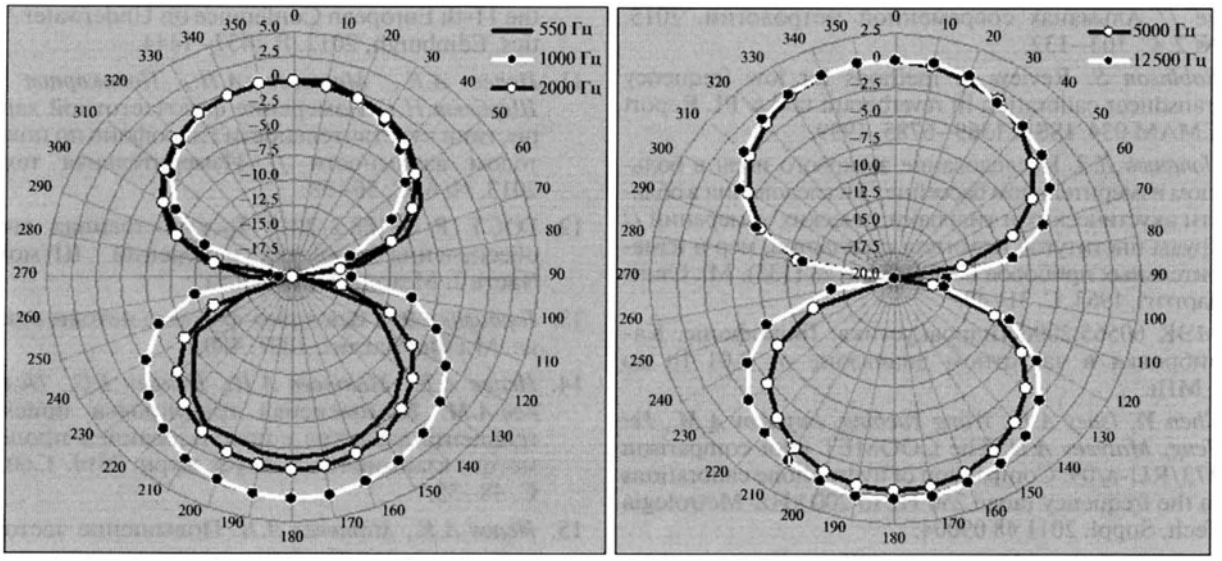

Рис. 7. Характеристики направленности приемника градиента давления на рабочих частотах.

ли приемник градиента звукового давления. На рис. 7 приведены характеристики направленности на частотах рабочего диапазона приемника, измеренные в области диффузного поля с использованием техники СКВУ. Полученные диаграммы имеют форму, характерную для диполя, что типично для характеристик направленности векторного приемника. На частотах 25 и 30 кГц (далеко за пределами рабочего диапазона) характеристики направленности приемника искажают дополнительные резкие провалы глубиной 30–35 дБ.

До недавнего времени отградуировать векторный приемник по полю не представлялось возможным, и градуировки выполняли в стоячей волне камеры малого объема в частотном диапазоне, ограниченном сверху критической частотой камеры (1–2 кГц) [13]. Попытки расширить частотный диапазон камеры на более высокие частоты успехом не увенчались. Применение техники СКВУ позволяет градуировать векторные приемники по полю в частотном диапазоне от 500 Гц и выше при излучении как шумового, так и ЛЧМ-сигнала, оставляя за стоячей волной низкие частоты, на которых погрешности измерений в камере удовлетворительны [9, 14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из исследованных преимуществ шумового сигнала является возможность использовать его для грубых прямых измерений чувствительности приемника по диффузному полю. Использование техники СКВУ позволяет в одной и той же области бассейна рассматривать звуковое поле как диффузное либо как свободное. Если на выходе приемника, помещенного в такое звуковое поле, поставить вольтметр СКЗ, получим чувствительность по диффузному полю. Если выходное напряжение обрабатывать методом СКВУ, то получим чувствительность по свободному полю. При этом сам метод СКВУ оказывается инструментом для проверки качества диффузного поля.

Неизменность состава спектральных компонент является тем исключительным преимуществом шумового сигнала, которое позволяет применить технику СКВУ для экспериментального определения функции Грина бассейна с отражающими границами, а точнее говоря, передаточной функции бассейна в заданном частотном диапазоне для заданного расположения в бассейне излучателя и приемника [15]. Использование передаточной функции позволит обойти ограничение, накладываемое на измерения в бассейне по свободному полю частотно-временны́м соотношением неопределенностей $\Delta f \geq 1/\Delta t$ [3, 16], и приблизить возможность решения обратной задачи – прием без искажений сигнала в гидроакустическом канале со сложным сценарием отражений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаев А.Е.* Лабораторная градуировка приемника для измерений уровней подводного шума корабля // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 53–58.
2. ANSI S12.64-2009 Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships. Part 1: General Requirements.
3. *Исаев А.Е.* Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ФГУП "ВНИИФТРИ", 2008. 369 с.
4. *Исаев А.Е., Поликарпов А.М., Черников И.В.* Акустические сигналы и поля для метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассей-

не // Альманах современной метрологии. 2015. № 2. С. 103–132.

5. *Robinson S.* Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks. PL Report CMAM 034. ISSN 1369–6785, 1999.
6. *Лопашев Д.З.* Исследование звукового поля в большом измерительном бассейне / Исследования в области акустических и гидроакустических измерений // Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР. Вып. 73 (133). М.: Стандартгиз, 1963. С. 31–40.
7. МЭК 60565:2006 Гидроакустика. Гидрофоны. Калибровка в частотном диапазоне от 0.01 Гц до 1 МГц.
8. *Chen Yi, Isaev A.E., Wang Yuebing, Enyakov A.M., Fei Teng, Matveev A.N.* The COOMET pilot comparison 473/RU-a/09: Comparison of hydrophone calibrations in the frequency range 250 Hz to 200 kHz. Metrologia Tech. Suppl. 2011 48 09004.
9. *Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М.* Градуировка приемника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ сигнала // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 6. С. 773–781.
10. *Hayman G., Robinson S.* Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method / Proc. of the 11-th European Conference on Underwater Acoustics. Edinburgh, 2012. P. 1437–1444.
11. *Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Поликарпов А.М., Щерблюк Н.Г.* Измерение фазочастотной характеристики чувствительности гидрофона по полю методом взаимности // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 56–58.
12. ГОСТ Р 53188.2-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Шумомеры. Часть 2. Методы испытаний.
13. *Гордиенко В.А.* Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
14. *Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М.* Комплексная градуировка приемника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 1. С. 48–55.
15. *Исаев А.Е., Матвеев А.Н.* Повышение частотного разрешения при обработке акустических сигналов методом скользящего комплексного взвешенного усреднения // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 2. С. 277–283.
16. *Исаев А. Е.* Критерий качества реализации условий свободного поля при градуировке гидроакустического приемника в бассейне с отражающими границами // Измерительная техника. 2014. № 5. С. 48–53.