

## **АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ И ПОЛЯ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ В ЛАБОРАТОРНОМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ**

**А.Е. Исаев, А.М. Поликарпов, И.В. Черников**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.*

isaev@vniiftri.ru

*«На самом деле все не так,  
как в действительности»*

Антуан де Сент-Экзюпери

*Для градуировки гидроакустического приемника предложено использовать реверберационные поля широкополосных сигналов и по результатам градуировки создавать исчерпывающую лабораторную модель приемника с тем, чтобы на ее основе получать частные метрологические характеристики, адекватные целям и условиям применения приемника по назначению. Для выполнения метрологических работ обосновано применение полей шумового и линейно частотно модулированного сигналов*

*Ключевые слова: градуировка, реверберационное поле, приемка, акустические сигналы*

### **Введение**

Понятия уровня звукового давления в 1/3 октавной полосе частот и чувствительности гидрофона на 1/3 октавной частоте настолько въелись в сознание специалистов, что сложилось устойчивое мнение: градуировка гидрофона на 1/3 октавных частотах - это именно то, что нужно для измерений шума в 1/3 октавных частотных полосах. Принято считать, что при градуировке гидроакустического преобразователя необходимо создать свободное звуковое поле. Для этого в лабораторном бассейне, границы которого (стены, дно и водная поверхность) отражают звуковую волну, излучают короткий тональный импульс. Несмотря на то, что при этом в бассейне создают реверберационное звуковое поле с многочисленными отражениями тонального импульса, полагают, что

начальный (свободный от отраженных сигналов) участок выходного сигнала приемника идентичен выходному сигналу приемника в свободном поле. На протяжении многих лет такие допущения устраивали требования практики. Тонально импульсный метод достаточно прост в реализации, позволяет контролировать качество измеряемого сигнала визуально с помощью осциллографа, обеспечивает высокую точность измерений. В отсутствии альтернативных методов, обеспечивающих приемлемую точность, мирились с тем, что тонально импульсным методом получали характеристику направленности преобразователя на частоте, а частотную характеристику измеряли с редким (обычно 1/3-октавным) частотным шагом.

Сегодня ситуация, складывающаяся в гидроакустических изме-

рениях, становится схожей с ситуацией в воздушной акустике.

Многообразие решаемых в воздушной акустике измерительных задач побуждает подбирать звуковые сигналы и акустические поля, наиболее подходящие для выполнения данного вида метрологических работ. Многочисленные стандарты регламентируют акустические условия измерений, под которыми в первую очередь понимают вид звукового поля, используемые сигналы и способы обработки сигналов. Например, в аудиометрии применяют тональный импульс, но звуковое поле – это индивидуальное поле в слуховом проходе обследуемого пациента. И, напротив, при исследовании звукопоглощающих свойств материалов и конструкций применяют шумовой сигнал, однако в зависимости от решаемой задачи измерения выполняют в свободном или диффузном полях. В зависимости от применения по назначению один и тот же измерительный микрофон градуируют по давлению, по свободному либо диффузному полю. При градуировке по давлению интерес представляют частотная и фазовая характеристики, а также акустический импеданс. В свободном поле определяют амплитудно- и фазочастотную характеристики акустического центра микрофона. В диффузном поле – чувствительность в стандартизованных полосах частот. Очевидно, что с расширением круга гидроакустических измерительных задач перечисленные выше характеристики окажутся востребованными

и для измерительного гидрофона.

### **Современные задачи гидроакустических измерений**

Обеспечение единства измерений уровней подводного шума корабля обуславливало высокие требования к точности контроля характеристик гидроакустического приемника. В этой ситуации первичный эталон должен был с максимальной возможной точностью воспроизводить единицу на строго нормированном наборе частот и передавать ее ограниченной номенклатуре измерительных гидрофонов. Под совершенствованием эталонной базы понимали расширение частотного диапазона и повышение точности воспроизведения и передачи единицы на 1/3 октавных частотах. Так продолжалось до тех пор, пока не стало очевидным, что достигли таких точностей эталона и градуировки гидрофона, что это перестало называться на инструментальной погрешности натуральных измерений. Тем самым проблема метрологического обеспечения гидроакустических измерений была сведена к проблеме жесткого допускового контроля при изготовлении и эксплуатации гидрофона. Для решения этих задач исчерпывающая модель гидроакустического приемника была избыточной, вследствие чего оказались невостребованными измерения фазовой характеристики приемника, подробной частотной характеристики, чувствительности в полосах частот по свободному и диффузному полю, переходной характеристики и т.п.

Круг задач гидроакустических измерений стремительно расширился в последние десятилетия в связи с общим ухудшением состояния морской среды в прибрежных зонах Мирового океана. Введение в действие международно-правовых документов по защите благоприятного экологического состояния морских вод и обусловленная этим стандартизация измерений подводного шума антропогенного происхождения значительно увеличили спрос на точные гидроакустические измерения, к которым сложившаяся система допускового контроля прямого отношения не имеет.

Уже сегодня рядом стран введены в действие стандарты, технические условия и терминология, касающиеся методов измерения, оценки и контроля биологической безопасности, величин и процедур для описания и измерения антропогенного подводного шума. Активно разрабатываются соответствующие международные стандарты. В качестве примера:

- стандарты НАТО для измерения и протоколирования характеристик шума, излучаемого надводными кораблями, подводными лодками, вертолетами и др. [1];

- национальный американский и международный стандарты на величины и процедуры для описания и измерений подводного шума кораблей, разработанный по запросу Международной Морской Организации (ИМО) и ее Комитета Защиты Морской Окружающей среды (МЕРС) [2,3];

- международный стандарт для измерения подводного звука, излучаемого коммерческими судами [4];

- введенные Норвегией правила классификации кораблей [5];

- руководства и технические регламенты Германии, Нидерландов, США, Великобритании, регулирующие забивание свай в морское дно, бурение на шельфе, измерения подводного шума от энергетических ветровых установок и т.п. [6-8].

Сегодня в рабочих группах технического комитета TC43/ISO «Подводная акустика» положено начало программе стандартизации гидроакустических измерений. Программа предусматривает разработку стандартов:

ISO/PWI 17208-2, Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 2: Determination of source levels in deep and shallow water;

ISO/PWI 18685, Underwater acoustics – Measurement of ambient underwater noise;

ISO/PWI 18686, Underwater acoustics – Measurement of sound from active sonars;

ISO/PWI 18687, Underwater acoustics – Measurement of sound from air guns;

ISO/PWI 18688, Underwater acoustics – Sound propagation modeling;

ISO/PWI 18697, Underwater acoustics – Measurement of sound field;

ISO/PWI 18698, Underwater acoustics – Noise mapping;

ISO/PWI 19260, Underwater acoustics - Effects of underwater sound on divers;

ISO/PWI 19261, Underwater acoustics - Measurement of radiated noise from underwater vehicles.

На совещании TC43/ISO в 2014 г. принято решение о расширении программы стандартизации включением в нее стандартов на измерение шума, излучаемого морским копром при забивании свай, по калибровке активного гидролокатора методом измерения обратного рассеяния от стандартной мишени, по калибровке гидроакустических векторных приемников и измерительных систем, используемых для натуральных измерений.

Обращает внимание разнообразие измерительных и калибровочных задач: подводный шум окружающей среды, подводный шум, излучаемый кораблем, гидравлическим молотом морского копра, бурильной платформой, ветроэнергетической установкой, звук активного гидролокатора и пневматического оружия, шум от подводных аппаратов, воздействие подводного звука на дайвера, калибровка эхолота и гидролокатора, приемников векторных величин гидроакустического поля, гидроакустической измерительной системы. С введением международных стандартов проблема измерения подводного звука становится проблемой международной. Это требует одинакового понимания всеми заинтересованными сторонами, в том числе вопросов, связанных с градуировкой измерительного приемника и

с использованием результатов градуировки для натуральных измерений, в особенности при градуировке измерительных систем.

В условиях нашей страны можно достаточно оперативно принять международные стандарты, а чтобы достичь взаимопонимания специалистов и на этой основе принять меры для совершенствования нормативной и эталонной базы требуется много времени и усилий. Эти изменения требуют существенного изменения требований к гидроакустическому приемнику, расширения номенклатуры его метрологических характеристик, выработки соответствующих методик градуировки и использования этих характеристик в натуральных условиях.

Ещё раз обратим внимание, что в воздушной акустике стандартизованы измерения множества параметров, характеризующих шум. Сегодня стандартизация гидроакустических измерений находится в начале этого пути. Предстоит выполнять измерения, для которых окажутся востребованными такие параметры гидроакустического приемника, на которые раньше не обращали внимания. Это потребует разработки соответствующих процедур градуировки, например, аналогичных применяемым в воздушной акустике.

Чтобы приблизиться к требованиям современных стандартов к точности измерений излучаемого кораблем подводного шума, единицу необходимо передавать не гидрофону, а всему гидроакустическому приемнику в том виде, как его при-

меняют в море, передавать единицу необходимо не на 1/3 октавной частоте, а в 1/3 октавной полосе частот, частотный диапазон градуировки по полю следует насколько это возможно продлить в сторону низких частот, а тонально импульсный метод градуировки плохо подходит для всех этих целей [9].

Обратной стороной экологической направленности принятой ТК43/ИСО программы стандартизации является недопущение «лишней» конкуренции на рынке высоких гидроакустических технологий. Очевидно, что при всех прочих равных условиях потребитель предпочтет гидрофон с меньшей погрешностью. Использование такого гидрофона, например, для подводной шумомерии позволит создать более точный «гидроакустический шумомер», обеспечив тем самым ему, как средству измерений, одно из главных конкурентных преимуществ.

Представим себе совершенно типичную ситуацию. Измеренное при испытаниях значение уровня излучаемого кораблем подводного шума близко к установленной норме. При этом погрешность измерений такова, что верхнее граничное значение результата измерений превышает норму. Могут ли в этом случае испытания считаться успешными? Очевиден отрицательный ответ. Современные требования к подводной шумности корабля находятся на пределе технических возможностей производителя и при больших затратах на создание образца вызывают необходимость высокой достоверно-

сти оценки степени его соответствия установленной норме. Высокая (1,5 – 3 дБ) точность измерения уровней подводного шума соизмерима с точностью градуировки гидрофона в лучших метрологических лабораториях. С одной стороны, это позволяет приблизить значение контрольного допуска к норме и снизить как неизбежные затраты производителя, так и риск потребителя [10]. С другой стороны, это заставляет уменьшать инструментальную погрешность измерений, в том числе и за счет применения в гидроакустическом шумомере точно отградуированного гидрофона.

### **Проблемы использования результатов стандартизованной процедуры градуировки**

На начальном этапе стандартизации гидроакустических измерений каждая точка на частотной характеристике гидрофона стоила больших затрат и третьоктавный ряд считали достаточно подробным для градуировки и измерений. Такая «бедная» характеристика не может удовлетворить современным запросам.

В качестве примера рассмотрим задачу измерения шума при забивании свай в морское дно. Типичная форма акустического сигнала, излучаемого в воду при ударе по свае морским гидравлическим молотом, изображена на рис. 1.

Технические регламенты предполагают нормирование и измерение следующих характеристик шума:

- пиковое акустическое давление  $P_p$  (дБ отн. 1 мкПа);
- пик-пиковое акустическое давление  $P_{p-p}$  (дБ отн. 1 мкПа);
- среднеквадратическое акустическое давление в импульсе SPL (дБ отн. 1 мкПа);

- уровень экспозиции как сумма квадратов акустического давления в импульсе SEL (дБ отн. 1 мкПа<sup>2</sup>·с).

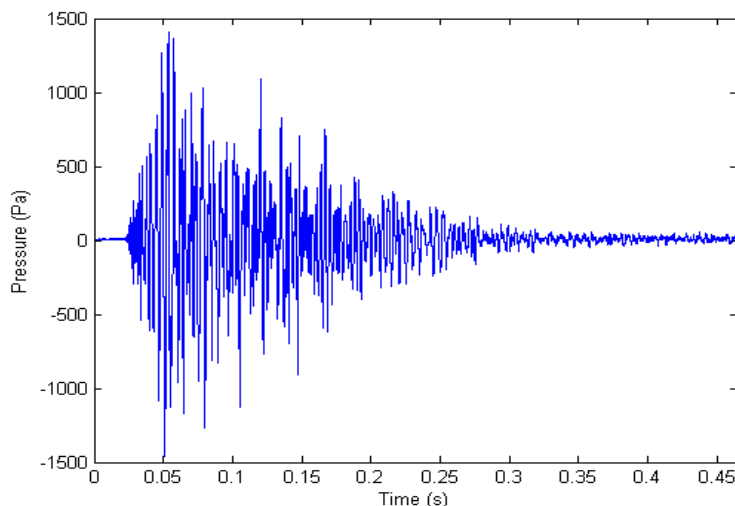


Рис. 1 Акустический сигнал копра при забивании сваи в морское дно

Если измерения двух последних шумовых характеристик может быть выполнено гидрофоном, градуированным традиционным способом, то измерения первых двух характеристик требуют точно определять форму акустического сигнала. Чтобы получить точную форму сигнала, необходимо знать точную импульсную характеристику измерительной системы, включая гидроакустический приемник. Стандарты на методы измерения таких характеристик сегодня отсутствуют. Отсутствует и понимание того, насколько подробно нужно измерять и нормировать такую характеристику. Но и это лишь малая часть проблемы.

Присмотревшись к программе стандартизации, внимательный читатель сделает вывод о том, что среди специалистов отсутствует понимание необходимости в первую очередь стандартизовать требования к измерительным гидроакустическим системам, тем самым обеспечить метрологическую основу сопоставимости результатов измерений.

В воздушной акустике традиционно требования к той или иной измерительной системе строят на основе характеристик шумомера, у которого не только конструкция и характеристики, но и методы испытаний и градуировки подробнейшим образом детализованы в стандартах.

Каждый акустик сталкивался с результатами измерений в дБ А. Само по себе понятие дБ А искусственное, поскольку есть ни что иное как результат измерений шума, показанный на индикаторе шумомера, и другого смысла не имеет. В силу этого, если система показывает результат в дБ А, она обязана удовлетворять требованиям, изложенным в стандартах на шумомеры. В противном случае результаты измерений такой системы будут несопоставимы с результатами других измерений,

выполненных за весь предшествующий период применения шумомеров, а также с нормами, требованиями и допусками, основанными на этих результатах.

Для решения другой задачи - восстановления формы акустического сигнала дельфина по записи на рис. 2 - нужно знать точную импульсную (частотную) характеристику измерительной системы. Однако ее невозможно решить, даже располагая точно отградуированными гидрофонами.

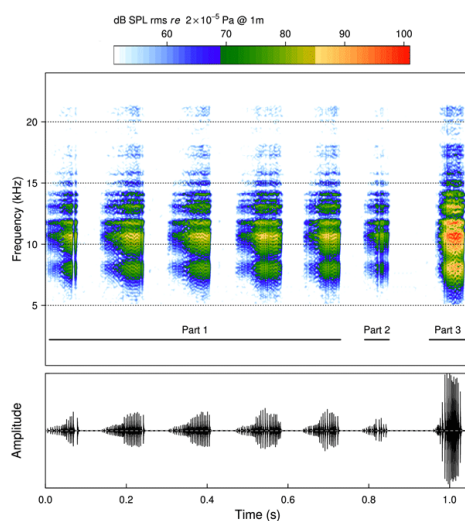


Рис. 2 Сигналы дельфина на выходе гидрофона и их спектры

Существуют только два международных стандарта: IEC 60500 на эталонный гидрофон и IEC 60565 на калибровку этого гидрофона. Этими стандартами сегодня руководствуются во всех случаях, хотя они ограничивают возможности метрологических работ калибровками на частотах 1/3 октавного ряда. На рис. 3 приведена частотная характеристика чувствительности измерительного

гидрофона, полученная при международных сличениях национальных эталонов COOMET 561/RU/12. Значений на частотах 1/3 октавного ряда явно недостаточно для решения задачи восстановления формы акустического сигнала. Этих точных данных недостаточно даже для того, чтобы правильно оценить неравномерность частотной характеристики самого гидрофона. Если выполнить

градуировку гидрофона ТС 4034 с шагом 10 кГц (см. рис. 3), то неравномерность частотной характеристики можно оценить с гораздо большей достоверностью, но это не меняет ситуации с восстановлением акустического сигнала дельфина.

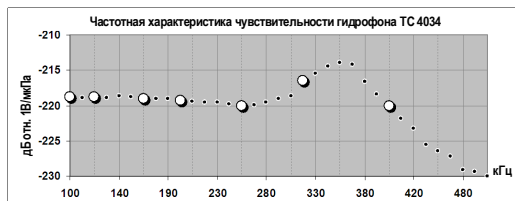


Рис. 3 Частотная характеристика чувствительности гидрофона ТС 4034

Восстановление формы сигнала дельфина представляет интерес для узкого круга специалистов и, как принято считать сейчас, не имеет экономических последствий. Энергия удара морского гидравлического молота при забивании в дно стальной сваи диаметром 5,2 м может превышать 1370 кДж. При этом требуется одновременно оценивать ударную энергию, преобразованную в подводный звук, и воздействие этого звука на морскую жизнь. Уже сегодня очевидны экономические последствия неправильного измерения уровня звуковой экспозиции или восстановления формы акустического сигнала для оценки пикового значения импульсного звукового давления.

Одной из причин сегодняшнего бедственного положения Российского гражданского авиастроения стало «закрытое небо» Европы и США для отечественных гражданских самолетов, в том числе и пото-

му, что в СССР была недооценена важность измерений такой «второстепенной» характеристики самолета, как излучаемый им шум. Недооценка последствий международной стандартизации в области гидроакустических измерений может привести к тому, что для отечественных торговых судов в недалёком будущем может быть «закрыто море», хотя речь идёт всего лишь о нарушении норм шумности в акватории порта.

При измерениях в море измерительный гидрофон устанавливают в специальную конструкцию, которую за рубежом называют системой вывешивания гидрофона [2, 3], в отечественных источниках – носитель (см. рис. 4).

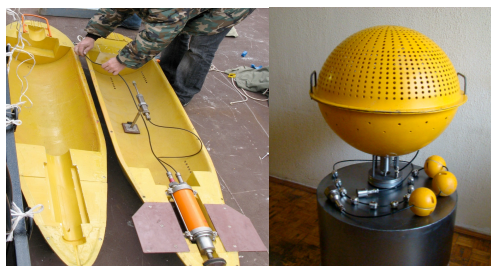


Рис. 4. Носители измерительного гидрофона

Носитель, как правило, имеет большие габариты и помимо обеспечения плавучести и ориентирования гидрофона, содержит контейнер с периферийной аппаратурой, обтекатель и другие герметичные узлы, выполнить которые акустически прозрачными не удастся.

На рис. 5 приведены результаты градуировки экспериментального образца носителя.



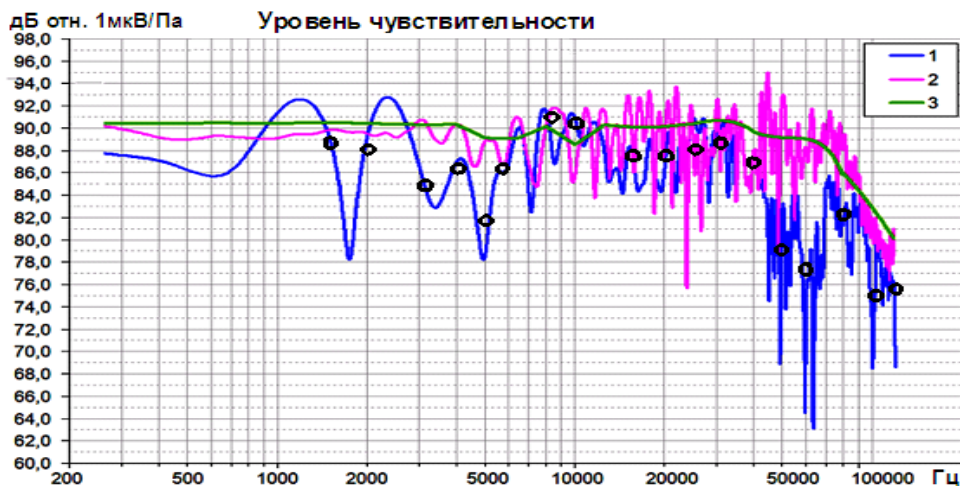


Рис. 5. Результаты градуировки гидрофона ГИ 54, установленного штатно на носителе – 1, при снятом обтекателе – 2, собственная частотная характеристика гидрофона – 3

Кривая 3 представляет частотную характеристику гидрофона, кривая 1 – частотную характеристику гидрофона, установленного штатно на экспериментальном образце, кривая 2 – то же со снятым обтекателем. Кругами на кривой 1 обозначены значения чувствительности на третьоктавных частотах. Размах и частота осцилляций зависимостей 1 и 2 со всей очевидностью демонстрируют, что градуировка такого приемника на третьоктавных частотах не имеет смысла, поскольку значения в этих точках, с какой бы высокой точностью они не были получены, не позволяют сколь-нибудь достоверно оценить неравномерности зависимостей 1 и 2.

Приведенный пример с крайне неудачной конструкцией носителя выбран умышленно, чтобы обна-  
жить и со всей очевидностью про-

демонстрировать несколько проблем. Первая - неудачная конструкция носителя, которую можно улучшить, если детально знать, насколько конструкция неудачна. Вторая – невозможность получить представленные на рисунке зависимости, используя временную селекцию тонально импульсного сигнала. Третья проблема – невозможность использовать чувствительность на третьоктавных частотах для измерения шума в третьоктавных полосах. Кроме того, если по кривой 3 (гидрофоном без носителя) можно оценить пиковое значение шума морского копра хотя бы грубо, то одного взгляда на рис. 5 достаточно, чтобы осознать бесполезность использования для этой цели всей конструкции приемника.

### Метрологическая модель гидроакустического приемника

До сих пор авторы свободно пользовались такими понятиями, как чувствительность на частоте или в полосе частот, чувствительность по свободному или диффузному полю, поскольку одно и то же определение термина «чувствительность» вряд ли подойдет для измерений импульсного подводного шума морского копра и стационарного шума корабля. Однако существует только одно международнопризнанное определение чувствительности гидрофона и оно жестко связано с понятиями частоты и свободного поля. Если градуировать гидрофон в соответствии с этим определением, то таким гидрофоном нельзя будет измерять ни шум копра, ни шум корабля, поскольку будет нарушен принцип валидации средства измерений.

Международный словарь VIM [11] применяет в термине «валидация» понятие «использование по назначению». Тем самым вводится разграничение: верификация отвечает на вопрос «продукт создан так, как и намеревались это сделать?», тогда как валидация отвечает на вопрос «правильный ли продукт создали?». Для приемника подводного шума это означает, что результаты градуировки, выполненной в строгом соответствии с действующим стандартом, привязаны к частоте и бесполезны при измерениях шума в третьоктавных полосах частот.

Казалось бы, преодолеть сложившееся положение возможно, следуя известному принципу - гра-

дуировать средство измерений необходимо на том сигнале, который будут измерять. То есть в качестве тестовых сигналов следует использовать аналоги полосового шума корабля, удара копра, шума ветрогенератора, бурильной платформы и т.п. Следуя по этому пути, придем к тому, что градуировать гидроакустический приемник необходимо в том поле, в котором будут выполнять измерения, то есть в свободном, реверберационном или диффузном звуковом поле. Тем самым задача валидации (проверка соответствия характеристик средства измерения решаемой измерительной задаче) при градуировке гидрофона будет решена «в лоб».

Этот путь неизбежно приведет к необозримому множеству комбинаций полей и сигналов, для каждой из которых придется разрабатывать и стандартизировать соответствующие понятия, нормы, методики градуировки и измерений и т. д.

Авторы не исключают, что в некоторых случаях придется идти этим путём: вибродатчики градуируют на вибростенде тональным сигналом и импульсным сигналом с помощью падающего шарика. Примером из гидроакустики может служить принцип «золотого» фьорда, использованный в стандарте Норвегии по измерению шума судов для их классификации [5]. Более рациональным представляется подход, когда при градуировке звуковое поле создают, излучая эталонной тестовой сигнал, который может учитывать реальные условия измерений,

например, реверберацию или влияние свойств морского дна. Такой подход предполагает использование идеальных условий, например, акустической либо радиобезэховой камеры [12], измерения в которых по полю не требуют особой изобретательности. В гидроакустическом бассейне, в условиях, отягощенных реверберацией звуковой волны, решение задачи валидации «в лоб» (использование шума в 1/3 октавной полосе частот для градуировки приемника УПШ), дает составляющую погрешности градуировки, обусловленную неравномерностью поля в 2-2,5 дБ, на что указывал в свое время Д.З. Лопашев [13].

В качестве альтернативы авторы предлагают другое решение. Не разбредаться по национальным фьордам и заливам, не пытаться воспроизводить в бассейне с помощью эталонных сигналов натурные условия для прямых измерений, а на основе единого понимания соотношения условий градуировки и измерений обеспечить единый подход к построению оптимальной с точки зрения метрологии модели гидроакустического приёмника и ее использованию при градуировке и измерениях. Под метрологической моделью авторы понимают набор характеристик, измеряемый при градуировке приёмника, достаточный для того, чтобы расчетным методом получать любые метрологические параметры, требуемые для решения той или иной измерительной задачи. Понимая, что любая «исчерпывающая» модель рано или поздно дос-

тигнет границ своей применимости, авторы считают, что наращивание полноты модели более продуктивно, чем наращивание числа комбинаций сигналов и полей.

Осознавая, что буквальное понимание правила: передавать единицу необходимо на том сигнале и в тех условиях, в которых средство измерений будут применять по назначению, плохо применимо к гидроакустическому приемнику, авторы предлагают воспользоваться замечательным свойством линейной системы – возможностью исчерпывающе описать ее во временной либо частотной области. Получив такое описание для гидроакустического приемника, это можно использовать для построения всевозможных метрологических характеристик и параметров, в том числе и тех, которые надеялись получить прямыми измерениями «в лоб». Пользуясь тем, что точность измерений в свободном поле безэховой камеры превышает точность измерений в диффузном поле (которая для воздушной и подводной акустики примерно одинакова), в воздушной акустике стандартизован пересчет характеристик по полю в характеристики по диффузному полю [14].

Используя результаты пересчета, современный шумомер позволяет одновременно измерять десятки параметров, характеризующих шум как в диффузном, так и в свободном поле, некоторые параметры требуют восстановления формы акустического сигнала. Конечно, и в воздушной акустике продолжается процесс

стандартизации, однако накопленный опыт позволяет четко разделять параметры шумомера, определяемые при его градуировке, в зависимости от вида измеряемых звуковых полей и сигналов. Аналогичную задачу предстоит решать в гидроакустике.

Уже сегодня понятны требования к модели гидроакустического приемника, которая должна обеспечивать измерения уровня звукового давления шума корабля с заданным частотным взвешиванием, для акустического импульса - измерять уровень звуковой экспозиции, среднеквадратическое и пиковые значения. Такая модель может быть построена на основе измерений подробной частотной характеристики приемника по полю.

Наличие таких характеристик, измеренных в зависимости от угла падения звуковой волны, позволяет расчетным путем получить характеристику направленности в полосе частот по полю, чувствительность приемника в диффузном поле и другие метрологические характеристики приемника. Чувствительность в полосе частот можно рассчитать как СКЗ в полосе частот подробной частотной характеристики гидрофона [9]. Совокупность подробной частотной и фазовой характеристик позволяет правильно измерить пиковое значение импульсного акустического сигнала.

Отметим, что построение такой модели требует больших объемов измерительной информации, обеспечить которые тонально импульсный метод не может. Для измерения

подробной амплитудно-фазовой частотной зависимости предпочтительно использовать сигналы с распределенной по частоте мощностью, например, ЛЧМ сигнал, который в условиях, отягощенных реверберацией звука, позволяет выполнить измерения по полю в гидроакустическом бассейне с эталонной точностью [9].

### **Звуковые поля для построения лабораторной модели приемника**

Первые исследования звуковых полей в гидроакустическом бассейне ВНИИФТРИ с точки зрения их пригодности в метрологических целях были выполнены в 1960-1961 гг. Д.З. Лопашевым, который исследовал реверберационные поля гармонического, тонально импульсного и шумового сигналов.

Реверберационное поле гармонического сигнала, несмотря на аппаратную обеспеченность таких измерений, было признано непригодным для метрологических работ. В экспериментах с шумовым сигналом Д.З. Лопашев опирался на статистическую теорию реверберации и применял методы архитектурной акустики. Он обосновал теоретически и подтвердил экспериментально наличие в бассейне областей свободного и диффузного поля, разделенных переходной зоной. Положение и размеры области, в которой звуковое поле наиболее близко к диффузному, показано на рис. 6 прямоугольником.

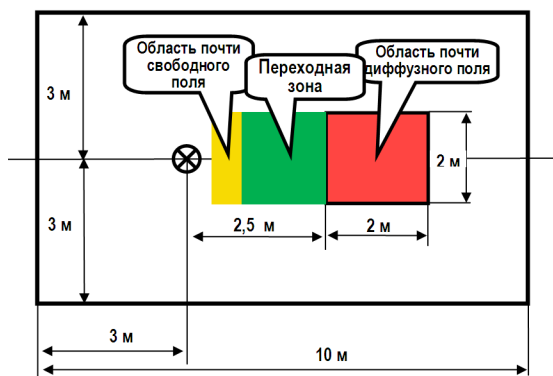


Рис. 6 Структура реверберационного поля шумового сигнала в бассейне ВНИИФТРИ

Более 50 лет назад Д.З. Лопашев сделал вывод о возможности использовать реверберационное поле шумового сигнала в бассейне ВНИИФТРИ для прямых измерений по диффузному полю с погрешностью 2,5 – 3 дБ [13]. Несмотря на совершенствование измерительной техники, заметно расширить возможности прямых измерений по диффузному полю в лабораторном бассейне либо существенно уменьшить их погрешность до настоящего времени не удалось [15]. Уже в начале 70-х годов точность эталонных градуировок тонально импульсным методом превосходила точность измерений в диффузном поле. Это явилось главным аргументом использования тонально импульсного сигнала в первичном эталоне и сделало тонально импульсный сигнал единственным, используемым при передаче единицы на всех уровнях поверочной схемы. Обратной стороной такой исключительности стал отказ от использования шумо-

вого сигнала даже при градуировке приемников, предназначенных для измерения уровней подводного шума в полосах частот. Неоспоримое преимущество одного вида сигнала в поверочной схеме - обеспечение жесткой прослеживаемости к первичному эталону, недостаток - затруднена валидация рабочих средств измерений, предназначенных для измерений различных сигналов.

Как было отмечено ранее, в соответствии с определением чувствительности по полю следует определять на заданной частоте. Выполнить такие измерения в лабораторном бассейне с отражающими стенками невозможно, поскольку принимая гармонический сигнал, невозможно выделить прямой сигнал излучателя. Измерения на тональном импульсе позволяют сделать это, но приводят к «размытию» результата по частоте [16].

Схема эталонных лабораторных измерений подразумевает ориентирование градуируемого приемника опорным направлением на излучатель либо известный относительно опорного направления угол падения звуковой волны. Опорное направление принято обозначать риской на гидрофоне. Риска, частотная характеристика и характеристика направленности в совокупности определяют лабораторную модель гидрофона.

Обратимся к проблеме, которая долгое время не привлекала внимания. Очевидно, что как только гидрофон покидает пределы лаборатории, схема эталонных лабораторных

измерений исчезает. Как только гидрофон погружают в море, где его невозможно ориентировать по отношению к источнику шума, исчезает и лабораторная модель гидрофона, полученная в результате его градуировки. Сказанное становится очевидным при переходе к оценке погрешности измерений, например, к учету влияния направленности. Высокая точность измерения характеристик гидрофона при градуировке заменяется максимальной неравномерностью диаграммы направленности в некотором телесном угле. Эта неравномерность зависит только от свойств гидрофона и не может быть уменьшена повышением точности эталона. В этой ситуации высокая точность эталонных измерений нужна лишь для того, чтобы точно установить, насколько плох гидрофон. Другими словами, лабораторная модель гидрофона, определенная при градуировке, при измерениях в море не передает единицу величины с той точностью, с которой она была определена в метрологической лаборатории. Избежать этой ситуации невозможно, поскольку гидрофон не является идеальным приемником.

Можно улучшить лабораторную модель гидрофона с тем, чтобы приблизить ее к потребностям натуральных измерений, если при градуировке вместо отдельных значений, полученных на редкой сетке частот и углов, использовать непрерывные зависимости. Следует иметь в виду, что даже такая, улучшенная лабораторная модель не может быть

использована в море. Авторы видят целесообразность такой модели не в том, чтобы после поверки гидроакустического приемника передавать модель потребителю, а в том, чтобы на её основе рассчитать необходимые заказчику метрологические характеристики. Например, рассчитать требуемую при измерении шума корабля чувствительность в  $1/3$  октавных частотных полосах и сделать вывод о пригодности гидроакустического приемника для таких измерений, то есть выполнить задачу валидации средства измерения. Также использование лабораторной модели позволяет уточнить оценку погрешности измерений в натуральных условиях.

Хотя уже сегодня востребованы такие характеристики, как чувствительность и характеристика направленности в полосе частот измерений подводного шума, чувствительность в телесном угле, чувствительность по диффузному полю, характеристики, необходимые для измерений пиковых значений звукового давления только предстоит стандартизировать. На этапе выработки подходов к стандартизации таких метрологических характеристик потребуются большая эмпирическая работа, требующая избыточных данных о модели приемника. Этот этап не является присущим только гидроакустике.

Так, в воздушной акустике из характеристик А, В, С, D сегодня остались только А и С. Из всех значений показателя эквивалентности используют только  $q = 6$ . Хотя ха-

рактеристика шумомера «Impulse» уже не рекомендована к использованию при измерении громких звуковых импульсов, понятие об «ушном рефлексе» перекочевало в нормы на изготовление пиротехнических и других, издающих резкие звуки, изделий. Про эти нормы читатель будет вспоминать каждый раз, услышав свист, предшествующий звуку подрыва фейерверка или петарды.

Приведенные примеры из воздушной акустики относятся к физиологии слуха человека. Задачи стандартизации в гидроакустике еще сложнее, поскольку потребуют учета физиологии не столько дайверов, сколько подводных обитателей.

Очевидно, что в ситуации, когда преимущественное направление прихода звуковых волн отсутствует (например, по опыту NPL при измерениях фонового шума морской акватории), более правильно использовать чувствительность гидрофона по диффузному полю [15]. Таким образом, для гидроакустического рабочего средства измерений, применяемого в натуральных условиях, востребованность характеристик не исчерпывается одной лишь чувствительностью по полю на частоте в опорном направлении.

В воздушной акустике высокое качество свободного поля в безэховой (заглушенной) камере позволяет применять в метрологических целях сигналы любого вида. Например, излучая шумовой сигнал, выполняют измерения по свободному полю, полученный результат пересчитывают к диффузному полю. Д.З. Ло-

пашев излучал шумовой сигнал и определял пригодность бассейна для прямых измерений чувствительности гидрофона по диффузному полю. Новые разработки ВНИИФТРИ позволяют в том же бассейне и в таком же звуковом поле выполнить градуировку по диффузному полю точнее. При этом процедура измерений выглядит несколько парадоксальной: излучая шумовой сигнал, в бассейне создают реверберационное поле, в реверберационном поле определяют чувствительность гидрофона по свободному полю, избавляясь тем самым от диффузных свойств поля с тем, чтобы затем пересчитать результат в чувствительность гидрофона по диффузному полю.

Изложенные выше рассуждения о моделях относились к градуировке и измерениям по свободному полю. Может показаться, что градуировке в диффузном поле уделено излишнее внимание. Однако полезные свойства диффузного поля для градуировки сегодня недооценены. При градуировке в идеальном диффузном поле неприменимы такие понятия, как ближнее поле, акустический центр, расстояние до излучателя, дистанция дальнего поля. По мере приближения реверберационного поля к диффузному понятие чувствительности на частоте переходит в понятие чувствительности в полосе частот, при этом требования к дистанции дальнего поля ослабляются. Из этого обстоятельства могут следовать совершенно практические выводы. Например, доказано, что

увеличение ширины полосы приема влечет уменьшение эффективного размера приемника и дистанции дальнего поля при градуировке в полосе частот, что позволяет градуировать габаритный приемник в лабораторном бассейне [9].

С одной стороны, отсутствие качественного диффузного поля в подводной акустике и возникшая потребность в измерениях по диффузному полю подталкивают к использованию пересчета свободное поле – диффузное поле при градуировке гидрофона, с другой стороны, разработанный во ВНИИФТРИ метод СКВУ дает возможность в отсутствие безэхового гидроакустического бассейна выполнять измерения в обычном бассейне, как в безэховой камере, и получать достаточное количество измерительных данных для такого пересчета.

#### **Реверберационное поле ЛЧМ сигнала**

Недостатки градуировки в реверберационных полях гармонического и тонально импульсного сигналов удалось преодолеть, применяя сигналы с распределенной по частоте мощностью. Первые практические результаты были получены с использованием ЛЧМ сигнала. Метод спектрометрии временных задержек был разработан в лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института США в 1967 г. Измерения по полю в реверберационном поле ЛЧМ сигнала близки к измерениям тонально импульсным методом, по-

скольку основаны на выделении прямой волны излучателя. Различие состоит в том, что в одном случае (тонально импульсный метод) для выделения прямой волны используют временную селекцию, а в другом (метод СВЗ) – частотную селекцию.

Существенно повысить точность измерений по полю при излучении ЛЧМ сигнала удалось, используя метод скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) [9]. Метод СКВУ не выделяет сигнал прямой волны, а подавляет искажения частотной характеристики приемника, вызванные отраженными сигналами.

Процедура измерений на ЛЧМ сигналах методом СКВУ сочетает в себе простоту реализации, малое время измерений, высокие помехозащищенность и высокое подавление искажений, вызванных отражениями. Использование ЛЧМ сигнала позволило, не уступая в точности тонально импульсному методу, продлить частотный диапазон градуировки гидрофона по полю в бассейне с минимальным размером 6 м от частоты 3 кГц на 11 третьоктав вниз. Это обеспечило необходимое перекрытие частотных диапазонов воспроизведения и передачи единицы звукового давления по полю и по давлению, выполнение требований регламента международных сличений, который предусматривает выполнение калибровок на произвольных частотах. Излучая ЛЧМ сигналы, удалось реализовать комплексную градуировку гидрофона методом взаимности, измерить ампли-



тудно- и фазочастотную характеристики чувствительности, исключив неоднозначность фазовых углов, исследовать смещения акустического центра. Реализация метода СКВУ на ЛЧМ сигналах позволила оценивать чувствительность гидроакустического приемника как к скалярной (по давлению), так и к векторной величине поля прямой звуковой волны (градиент звукового давления). Это дало возможность градуировать векторный приемник по полю, изучать и вырабатывать численные критерии качества локально-плоской волны по близости фаз звукового давления и колебательной скорости, а не на основании закона  $1/r$ .

Способность получать непрерывные частотные характеристики предоставила новые возможности при исследованиях акустических свойств элементов конструкции носителя и их влияния на частотные характеристики приемника, позволила определять чувствительность и характеристики направленности приемника подводного шума в  $1/3$  октавных полосах частот по подробным частотным характеристикам расчетным методом. В совокупности это позволило повысить информативность исследований акустических свойств приемника подводного шума, достоверность оценок инструментальной погрешности и эффективность процедур градуировки приемника.

В силу особенностей сигнала 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. Метод СВЗ основан на использовании второго информационного признака. Отличие метода СКВУ состоит в том, что он использует первый признак - разное время прихода волн в точку приема. Забегая вперед, отметим, что это **позволяет методу СКВУ быть независимым от вида излучаемого сигнала и формируемого им реверберационного поля в лабораторном бассейне.**

Характерные осциллограммы выходного напряжения приемника в реверберационных звуковых полях лабораторного бассейна показаны на рис. 7.

На рис. 7 а показана осциллограмма выходного напряжения гидрофона с момента начала излучения тонального импульса. Легко выделить визуально свободную от отражений часть в начале осциллограммы. На рис. 7 б показана осциллограмма выходного напряжения гидрофона при излучении ЛЧМ сигнала, а на рис. 7 в кривой желтого цвета - огибающая напряжения, которую можно рассматривать как частотную зависимость модуля передаточного импеданса системы излучатель-бассейн-приемник, полученную в реверберационном поле ЛЧМ сигнала.

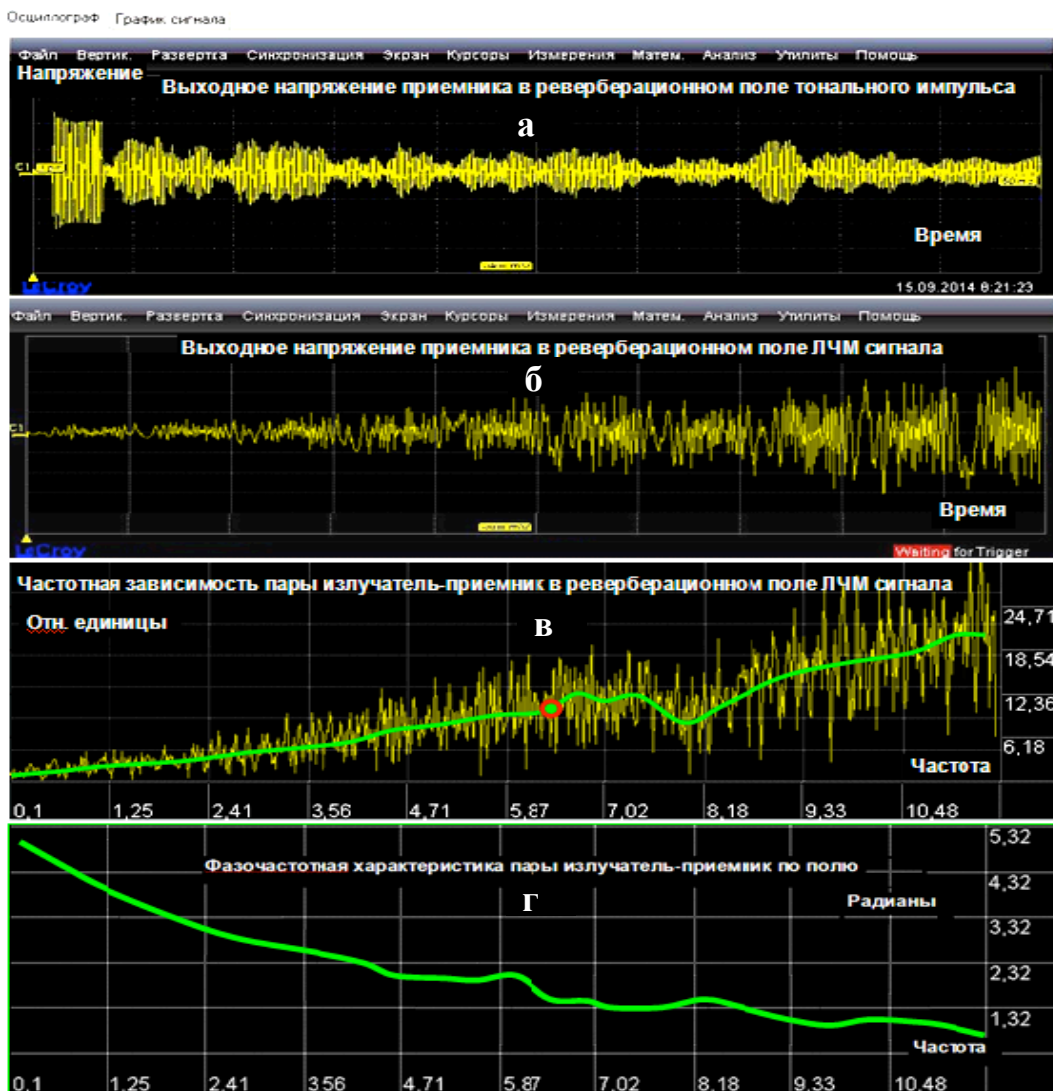


Рис. 7

Такую огибающую можно получить, излучив пару квадратурно дополненных (сдвинутых по фазе на  $\pi/2$ ) ЛЧМ сигналов, либо дополнить одиночный сигнал его парой Гильберта. При этом избегают операций гетеродинирования, детектирования и узкополосной фильтрации, необходимых при использовании метода

СВЗ, и связанных с этим погрешностей. Дополнение парой Гильберта не позволяет избежать проблем, свойственных Фурье анализу с использованием оконной аподизации, что можно отнести в пользу излучения квадратурно дополненных сигналов при планировании эксперимента.

Наличие пары принятых квадратурно дополненных ЛЧМ сигналов позволяет применить к ней обработку методом СКВУ. Кривыми зеленого цвета на рис. 7 в и г представлены результаты такой обработки: соответственно амплитудно- и фазочастотная характеристики передаточного импеданса излучатель-приемник в свободном поле.

Обратим внимание на выделенную красным цветом точку на рис. 7 в, которая представляет результат измерения тонально импульсным методом. При соизмеримом времени измерений (с учетом реверберационной паузы) тонально импульсный метод дает всего лишь одну точку на частотной зависимости. Очевидно, что информативность результатов измерений на ЛЧМ сигналах неизмеримо выше.

Измеряя подробную частотную характеристику при различных углах падения звуковой волны, можно построить исчерпывающую лабораторную 3-D модель гидроакустического приемника (см. рис. 8).

Такая модель позволяет не только наглядно представить метрологические свойства приемника, но и использовать ее для сокращения объема экспериментальных исследований. Например, выполнив измерения в «меридиональных» направлениях, можно не измерять, а увидеть и определить характеристики приемника в «широтных» направлениях. Напомним, что основной задачей исчерпывающей лабораторной модели является получение упомянутых выше частных метрологических характеристик для конкретной измерительной задачи.

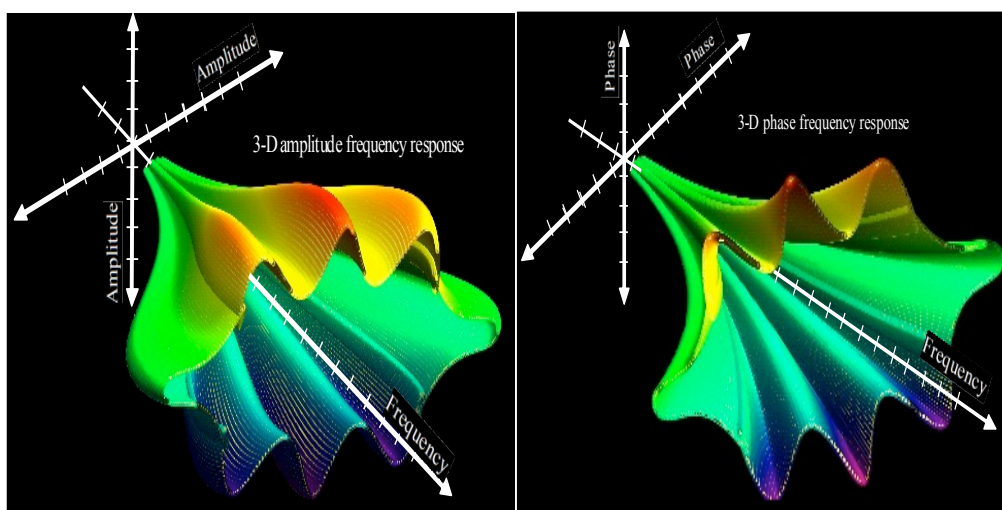


Рис. 8. 3-D модели амплитудно 1 и фазочастотной 2 характеристик гидроакустического приемника

### Недостатки ЛЧМ сигнала при измерениях методом СКВУ

Являясь одним из сигналов с распределенной по частоте мощностью, ЛЧМ сигнал не может претендовать на особую исключительность и уникальность для градуировки, поскольку как и любой другой сигнал имеет свои недостатки.

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 априорную информацию о поведении измеряемой частотной зависимости. Для получения такой информации нередко требуется предварительные эксперименты, например, измерения на ЛЧМ сигнале с очень медленной скоростью изменения частоты. Акустическое поле в точке приема ЛЧМ сигнала - нестационарное реверберационное поле, поскольку мгновенные частоты прямого и отраженного 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 именно на этом «недостатке» основан метод СВЗ. Различие мгновен-

ных частот прямого и отраженного сигналов является тем полезным свойством, благодаря которому прямой ЛЧМ сигнал удается выделить на фоне отражений в методе СВЗ.

### Нестационарное влияние отражений

Линейное изменение во времени мгновенной частоты прямого сигнала и ее отличие от мгновенных частот отраженных ЛЧМ сигналов обуславливает нестационарность искажений экспериментальной частотной зависимости (число отражений, вносящих вклад в искажения измеряемой зависимости, увеличивается по мере прихода в точку приема новых отражений). Это демонстрируют частотные зависимости выходного напряжения пары излучатель-приемник на рис. 9, измеренные в диапазоне 243 - 335 кГц в реверберационном поле шумового (ряд 2) и ЛЧМ сигнала (ряд 1). В нижней части рис. 9 обозначены начало излучения (А), приход первого (Б) и второго (С) отражений при измерениях на ЛЧМ сигнале.

Полученная на ЛЧМ сигнале зависимость свободна от отражений в частотном интервале А-Б, искажена только одним (первым) отражением в частотном интервале Б-С. На частоте С свой вклад в искажения добавляет второе отражение, с увеличением времени (частоты ЛЧМ сигнала) все большее количество отражений искажают экспериментальную зависимость.

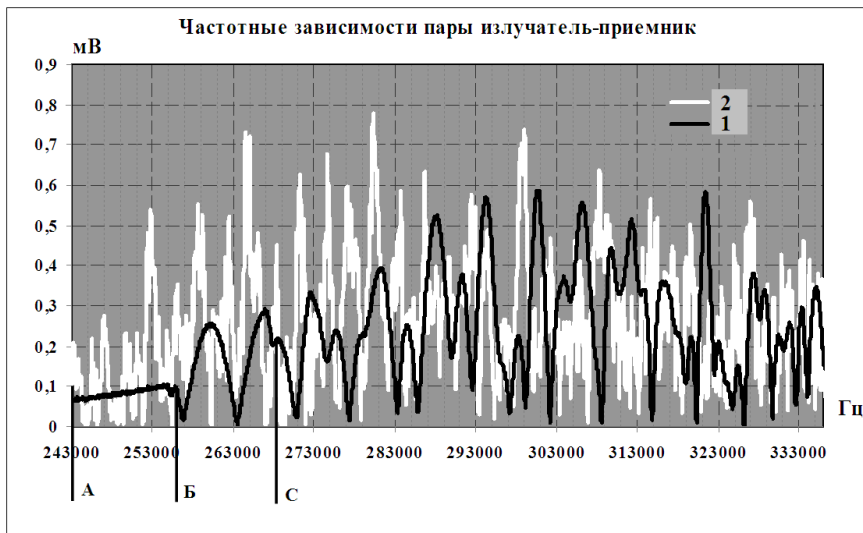


Рис. 9

Влияние нестационарности на результат обработки СКВУ проиллюстрировано на рис. 10, где в децибелах относительно максимального значения приведены частотные зависимости передаточного импеданса пары излучатель-приемник по полю, полученные при излучении ЛЧМ сигнала (ряд 1), шума (ряд 2) и тональных импульсов (ряд 3).

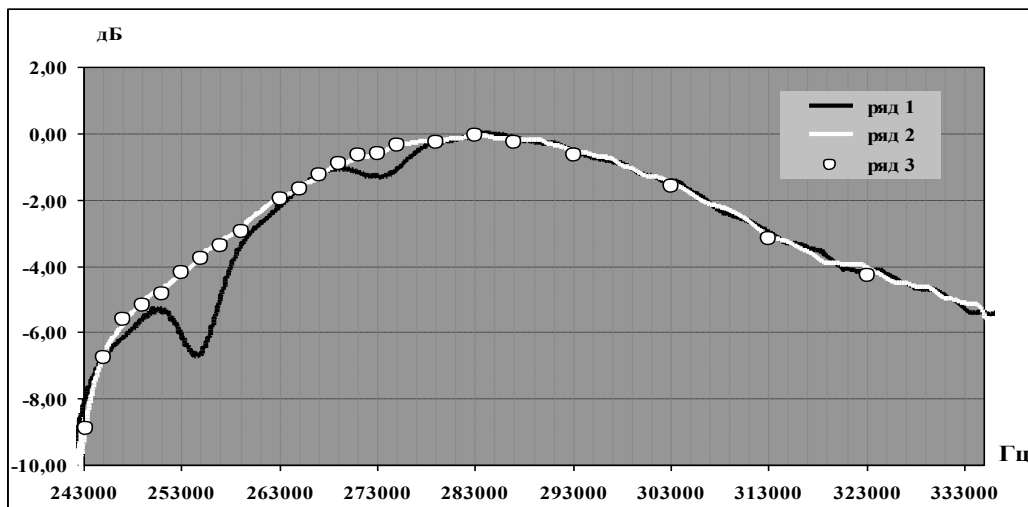


Рис. 10

Зависимость, полученная на ЛЧМ сигнале, имеет явно выраженные ложные провалы на частотах 255 кГц (глубиной до 3 дБ) и 273 кГц (до 1 дБ), соответствующих приходу в точку приема первого и второго отражений. Такие провалы отсутствуют на зависимости 3, полученной тонально импульсным методом (в отсутствие отражений). В том, что эти провалы ложные, нетрудно убедиться и при измерениях на ЛЧМ сигнале. Например, уменьшив либо увеличив скорость изменения частоты провалы на частотной зависимости, можно сдвинуть на соответствующую величину в сторону низких либо высоких частот.

#### **Несовпадение зависимостей амплитудной модуляции прямой и отраженной волн**

Из-за разницы времен прихода прямой и отраженной ЛЧМ волн в точку приема отраженный сигнал оказывается промодулированным по

амплитуде не по закону модуляции прямой волны, а по закону модуляции прямой волны, сдвинутой по времени на задержку отражения. Несовпадение амплитудных модуляций снижает эффективность редактирования экспериментальной частотной зависимости тем больше, чем больше искривлена форма измеряемой частотной зависимости. [17]. На участках перегибов при обработке методом СКВУ это приводит к существенным искажениям искомого частотной зависимости передаточного импеданса пары излучатель-приемник по полю, что демонстрируют ряды 2 (ЛЧМ сигнал), 1 (шум) и 3 (тональный импульс) на рис. 11. Чем круче изменения искомого частотной зависимости на участках перегибов, тем больше погрешность, обусловленная несопадением амплитудной модуляции прямой и отраженной волн.

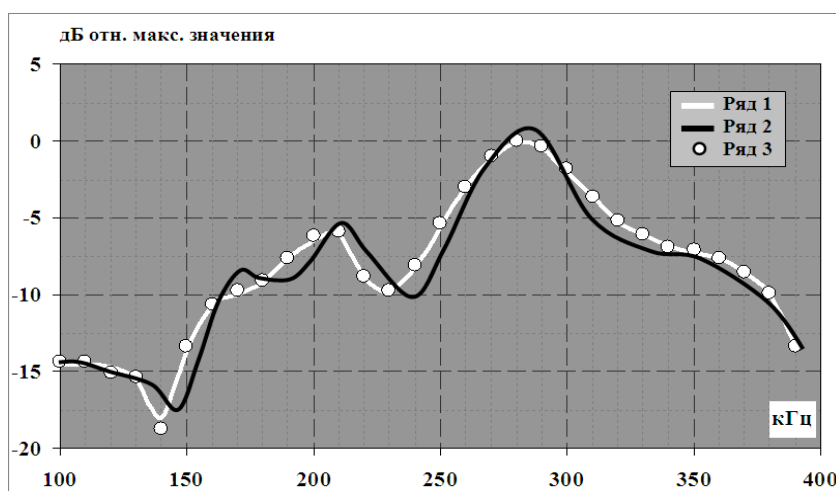


Рис. 11

При измерениях в реверберационном поле ЛЧМ сигнала невозможно идеальное редактирование экспериментальной частотной зависимости [17]. Эффект от редактирования уменьшается, если изменение частоты ЛЧМ сигнала за время запаздывания отражения соизмеримо с частотным интервалом значимых изменений измеряемой частотной зависимости. Необходимость подстраивать скорость изменения частоты ЛЧМ сигнала в зависимости резонансных свойств пары излучатель-приемник усложняет процедуру измерений.

Значимый источник погрешности при обработке ЛЧМ сигнала методом СКВУ - присутствие в измерительном тракте паразитного медленно меняющегося напряжения.

#### **Реверберационное поле шумового сигнала**

В рассмотренных выше измерительных ситуациях реверберационное поле шумового сигнала также позволяет быстро выполнять измерения в широком диапазоне частот, но с существенно меньшей, в сравнении с ЛЧМ сигналом, погрешностью.

Одним из исследованных преимуществ реверберационного поля шумового сигнала является возможность использовать его для выполнения грубых прямых измерений чувствительности приемника по диффузному полю.

В противоположность измерениям на ЛЧМ сигнале, разница времен прихода в точку приема прямой

и отраженной шумовых волн не вызывает различий в амплитудной модуляции отраженного и прямого сигналов. При этом не снижается эффективность редактирования экспериментальной частотной зависимости и не возникает искажений искомым частотной характеристики на участках перегибов, что характерно обработке методом СКВУ зависимостей, полученных на ЛЧМ сигнале. Этот эффект демонстрирует совпадение зависимостей, представленных кривой 1 и рядом 3 на рис. 11.

Шумовой сигнал создает стационарное звуковое поле в том смысле, что состав спектральных компонент (не путать с амплитудным распределением спектра шумового сигнала) отраженных сигналов идентичен составу прямого сигнала и не меняется в течение эксперимента. При приеме шумового сигнала количество отражений, вызывающих искажения, не зависит от частоты. Это исключает присущую измерениям на ЛЧМ сигнале нестационарность искажений экспериментальной частотной зависимости, вследствие чего зависимость, представленная рядом 2 на рис. 4, не имеет ложных горбов и провалов и совпадает с результатами измерений тонально импульсным методом.

Отметим еще одну полезную особенность реверберационного поля шумового сигнала, которая остается малозамеченной. Упомянутая стационарность является тем исключительным преимуществом шумового сигнала, которое позволяет применить обработку СКВУ для экспе-

риментального определения функции Грина отражающего бассейна. Точнее сказать - передаточную функцию бассейна в заданном частотном диапазоне при заданном расположении в бассейне излучателя и приемника [18]. Тем самым приблизить возможность решения обратной задачи – восстановление сигнала в гидроакустическом канале со сложным сценарием отражений. Для получения такой передаточной функции можно использовать как ЛЧМ, так и шумовой сигналы. Однако, если использование ЛЧМ сигнала для этих целей представляет сегодня скорее теоретический интерес, то использование шума – задача практическая, требующая своего воплощения.

Вместе с тем, сказанное выше не следует воспринимать как призыв отказаться от использования в метрологических целях тонально импульсного или ЛЧМ сигналов и предложение перейти к использованию другого сигнала, который полностью заменяет два первых. Не существует универсального сигнала, который позволял бы получать безусловно лучший результат вне зависимости от целей и условий измерительного эксперимента. О преимуществах тонально импульсного сигнала упоминалось выше. 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 на порядки более подробные частотные зависимости. Шумовой сигнал следует рассматривать как дополнение тонально импульсному и ЛЧМ сигналам с тем, чтобы иметь возможность использовать преимущества каждого из них в конкретных условиях измерительного эксперимента.

### Заключение

За годы практического применения не удалось выявить недостатки, органически присущие обработке методом СКВУ, которые препятствовали бы использованию реверберационного звукового поля ЛЧМ сигнала для точной градуировки по свободному полю.

Приведенные на рис. 4, 5 результаты экспериментов с шумовым сигналом подтвердили сделанный в [9] вывод о том, что результаты применения метода СКВУ не зависят от способа получения подвергаемой обработке частотной зависимости. Это позволяет относиться к шумовому сигналу не как к случайному в смысле повторяемости результата измерений, а как к одному из видов широкополосного сигнала, пригодного для выполнения метрологических работ в незаглушенном гидроакустическом бассейне. Тонально импульсный, ЛЧМ и шумовой сигналы образуют набор гармонично дополняющих друг друга сигналов, что делает актуальным использование этих сигналов на разных уровнях поверочной схемы от



первичных до рабочих эталонов.

Если возможности применения первых двух сигналов достаточно исследованы и созданы программно-аппаратные комплексы, реализующие методики градуировки по полю, то для шумового сигнала аналогичная работа только предстоит. Среди первоочередных задач можно выделить:

- дополнение программно-аппаратной реализации метода СКВУ шумовым сигналом;

- исследование применимости реверберационного поля шумового сигнала для точных измерений по полю, вплоть до уровня точности первичного эталона;

- исследование границ применимости шумового сигнала для градуировки по полю;

- определения областей преимущественного использования реверберационных полей тонально импульсного, ЛЧМ и шумового сигналов с тем, чтобы в обозримое время довести методику измерений по полю в реверберационном поле шумового сигнала до практического применения.

Другими словами, программно-аппаратная реализация метода СКВУ переходит в разряд технологии измерений, особо необходимой для выполнения метрологических работ во вновь создаваемом многофункциональном бассейне ВНИИФ-ТРИ. Следующими по актуальности задачами по совершенствованию и расширению возможностей технологии являются:

- исследования границ рабочей

области пространства в бассейне;

- определение допустимых погрешностей измерения положения акустического центра излучателя и приемника;

- определение допустимых погрешностей позиционирования преобразователей;

- исследование границ применимости понятия акустического центра преобразователя;

- разработка способа определения временных задержек отражений для заданных точек расположения излучателя и приемника;

- разработка способа определения временных задержек отражений для моделей излучателя и приемника с учетом размеров, формы, расположения активного элемента и т. п.;

- разработка 3-D лабораторных метрологических моделей гидроакустического приемника.

Решение перечисленных задач должно быть подчинено достижению главной цели метрологической лаборатории - передать физическую единицу потребителю с наименьшими потерями точности.

Обычно под измерительными и калибровочными возможностями понимают строки в СМС данных на сайте ВІРМ. Однако СМС данные далеко не полностью характеризуют калибровочные и измерительные возможности лаборатории. Под калибровочными и измерительными возможностями метрологической лаборатории следует понимать способность лаборатории получать как можно более полные метрологические модели средства измерений и

получать из этих моделей как можно более широкий спектр частных сокращенных метрологических характеристик с тем, чтобы обеспечить решение как можно более широкого круга измерительных задач.

### Литература

1. STANAG 1136:1995 NATO Standards For Use When Measuring And Reporting Radiated Noise Characteristics Of Surface Ships, Submarines etc. in relation to sonar detection and torpedo acquisition risk.

2. ANSI S12.64-2009 Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships - Part 1: General Requirements Величины и процедуры для описания и измерений подводного шума кораблей – Часть 1: Общие требования.

3. ISO/PAS 17208-1 Acoustics - Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships - Part 1: General requirements for measurements in deep water.

4. ISO/DIS 16554.2 Ships and marine technology – Marine environment protection – Measurement and reporting of underwater sound radiated from merchant ships.

5. Det Norske Veritas AS. Rules for classification of ships. Part 6 Chapter 24. Newbuildings, Special Equipment and Systems- Additional Class. Silent class notation, 2011.

6. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie BSH Offshore wind farms. Measuring instruction for un-

derwater sound monitoring. Current approach with annotation Application instructions

7. TNO-DV 2011 C251 Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part II, Procedures for measuring of underwater noise in connection with offshore wind farm licensing.

8. Technical Guidance for Assessment and Mitigation of the Hydroacoustic Effects for Pile Driving on Fish. California Department of Transportation. Sacramento, CA 94274.

9. Исаев А.Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». 2008. 369 с.

10. Еняков А.М., Сильвестров С.В./ Проблемы развития средств гидроакустических измерений и методов обработки информации. Сб. научн. трудов ВНИИФТРИ. М.: ВНИИФТРИ, 2000, с. 44-48.

11. JCGM 200 : 2008 International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms.

12. Тищенко В.А. О радиобезэховой камере ВНИИФТРИ/ ISSN 2313-8068. // Альманах современной метрологии, ФГУП 2014, № 1, с. 338 – 341.

13. Лопашев Д.З. Исследование звукового поля в большом измерительном бассейне/ Исследования в области акустических и гидроакустических измерений/ Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР, вып.

73(133). М.: Стандартгиз, 1963, с. 31-40.

14. ГОСТ Р 53188.2-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Шумомеры. Часть 2. Методы испытаний.

15. Robinson S. Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks. PL Report SMAM 034. ISSN 1369-6785. 1999.

16. Исаев, А. Е. Критерий качества реализации условий свободного поля при градуировке гидроакустического приемника в бассейне с отражающими границами// Изме-

рительная техника. – 2014, № 5, с. 48-53

17. 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. журнал, 2013, т. 59, № 6, с. 773-781.

18. Исаев А. Е., Матвеев А. Н. Повышение частотного разрешения при обработке акустических сигналов методом скользящего комплексного взвешенного усреднения// Акуст. журнал, 2010, т. 56, № 2, с. 277–283.