

УДК 534.681.88

НОВЫЕ ПОДХОДЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ В ИЗМЕРЕНИЯХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

В.И. Теверовский, С.Г. Цыганков

ФГУП «ВНИИФТРИ»

Гидроакустика как специфическая область прикладной физики имеет многовековую историю своего существования, развития и практического применения. Можно отметить, что первые предложения по использованию физических явлений, связанных с генерацией и распространением звука в водной среде, были высказаны Леонардо да Винчи ещё в конце XV века, за два столетия до создания Ньютоном математической теории звука, т.е. собственно акустики как раздела физики. Леонардо да Винчи предложил прослушивать шумы, создаваемые движущимися судами, с помощью трубки, один конец которой опущен в воду, а другой приложен к уху наблюдателя. Разумеется, речь ещё не шла о каких-либо измерениях – отмечался лишь факт наличия движущегося судна, т.е., говоря современным языком, - о пассивном гидроакустическом обнаружении морского движущегося объекта.

Возможность и потребность практического использования свойств звука, распространяющегося в жидкой или газообразной среде (например, в воздухе), вызвала к жизни собственно акустические измерения, в первую очередь – измерения скорости распространения звука в воздухе и воде. Первые, достаточно грубые, измерения скорости звука в воздухе были выполнены французами П. Гассенди и независимо М. Марсенном в первой половине XVII века, а в пресной воде Женевского озера – Д. Колландоном и Ш. Штурмом в 1827 г.

Большую роль в практическом использовании акустических явлений сыграли работы в области анализа частотного состава звуковых колебаний, выполненные в конце XVIII – середине XIX веков Даламбером, Лагранжем, Бернулли, Эйлером, Омом, в том числе работы по применению гармонического анализа звуковых сигналов на основе рядов Фурье. Эти работы имели важное значение не только для акустики, но, как выяснилось позднее, для проблемы анализа сигналов любой природы.

Огромное прикладное, в том числе, военно-прикладное, значение гидроакустики было осознано ещё до первой мировой войны. Гидроакустические принципы были использованы для измерения расстояния до маяков, излучавших одновременно световую вспышку и

акустооптический сигнал с помощью подводного колокола. Появление подводных лодок стимулировало интерес к вопросам эхолокации и шумопеленгования, а гибель «Титаника» обострила интерес к проблеме эхопеленгования подводных частей айсбергов.

В период первой мировой войны и межвоенный период происходил бурный рост гидроакустической техники применительно к проблеме противолодочной борьбы, при использовании как активных (эхолокация), так и пассивных (шумопеленгование) средств, разрабатывались принципы применения гидроакустики в навигации (эхолоты, акустические лаги). Бурное развитие технических приложений гидроакустики вызвало необходимость быстрого развития методов и средств гидроакустических измерений. Основное внимание в первый период развития технических приложений гидроакустики уделялось измерениям характеристик излучающих и приёмных систем, измерениям характеристик распространения звука в морской среде.

Необходимость измерения акустических характеристик движущихся шумящих морских объектов – подводных лодок, надводных кораблей, гражданских судов была осознана военно-морскими специалистами в конце 30-х годов прошлого века. Одним из первых документов в СССР, предписывающих производить измерения характеристик шумности подводных лодок, было Решение Главного военного Совета ВМФ от 21 октября 1940 г. № 036, предписывающее в срочном порядке разработать оперативно-тактические нормы слышимости ПЛ, оборудовать на флотах полигоны для прослушивания и паспортизации ПЛ. Несмотря на задержку выполнения этого решения в условиях военного времени, к концу 1943 года были разработаны положение о гидроакустических контрольных станциях (ГСК), «Временная методика паспортизации шумов».

Уже в 1945 году было выпущено «Наставление по контролю шумности» (РКШ-45), которое неоднократно корректировалось в связи с появлением новых кораблей, нового оружия, новых средств гидроакустического вооружения (РКШ-62, РКШ-64, РКНШ-80), были построены гидроакустические контрольные суда, оснащённые измерительными комплексами ГИА-101, ГИА-301, суда контроля физических полей (СФП), оснащённые измерительными комплексами ГИА-301М, ГИА-495, создан стационарный измерительный полигон в заливе Хара-Лахт (Эстония). В конце 80-х годов была создана стационарная информационно-измерительная система (СИИС) «Батарея» для измерительных полигонов Северного и Тихоокеанского флотов. Нелишним будет отметить, что все измерительные комплексы (кроме ГИА-101) были созданы ВНИИФТРИ.

Проблема оценки акустических характеристик морского объекта не исчерпывается определением количественных характеристик излучаемого

объектом сигнала. Весьма важным является получение ответа на вопрос, какими источниками формируется этот сигнал, каков в количественном отношении «вклад» каждого источника в общую излучаемую акустическую мощность.

Характерной особенностью всех перечисленных измерительных комплексов, несмотря на существенное их различие по техническому оснащению, степени автоматизации процесса измерений и обработки информации, является то, что реализуемая ими методология измерений оставалась неизменной, основанной на измерении максимальных значений уровня акустического давления, создаваемого шумоизлучением контролируемого объекта в точке, расположенной на относительно небольшом расстоянии от траектории движения объекта (так называемой характеристики прохода). Такая методология основана на сформулированной ещё в 50-х годах концепции описания характеристик шумности. Эта концепция вполне адекватна задаче оценки защищённости кораблей от неконтактного подводного оружия. Что касается оценки скрытности подводных лодок от средств дальнего гидроакустического обнаружения, предполагалась возможность пересчёта полученных результатов измерения в дальнее поле по простейшим соотношениям, основанным на предположении, что геометрические размеры источника излучения малы даже по сравнению с небольшой (50-100 м) дистанцией измерения. Хотя геометрические размеры объекта, как правило, значительно больше этой дистанции, размеры источника (зоны) излучения в ряде случаев могут удовлетворять условию пересчёта в дальнюю зону. Такая ситуация вполне адекватна акустическим характеристикам относительно «шумных» кораблей старых проектов, акустическое излучение которых формируется механизмами и гребным винтом, причём, на каждой частоте излучение в основном формируется одним преобладающим малоразмерным источником.

Резкое снижение шумности кораблей новых проектов, достигнутое подавлением шумоизлучения преобладающих источников, радикально изменило ситуацию, т.к. во многих частотных полосах акустический сигнал стал формироваться совокупностью многих близких по интенсивности источников, разнесённых вдоль корпуса корабля, в том числе источников гидродинамического происхождения. Поэтому во многих случаях расчёт акустической скрытности по стандартным, измеряемым на малом расстоянии, уровням подводного шума стал давать недостоверные результаты. Эта же ситуация существенно осложнила решение задачи выявления источников, формирующих шумоизлучение.

Существенным недостатком традиционного метода измерений характеристик шумности является его высокая чувствительность к фоновой помехе, поскольку реально максимум характеристики прохода определяется

суммой акустических давлений полезного сигнала и фоновой помехи. Этот недостаток не играл серьёзной роли при измерении акустических характеристик «шумных» объектов, поскольку измеряемый сигнал в несколько раз превышал фоновый и вносимая фоном погрешность измерений лежала в допустимых пределах. Согласно существующим нормативным документам, традиционный метод измерений уровней подводного шума как максимальных значений характеристики прохода (МЗПХ) может применяться, когда превышение измеряемого уровня над фоновым не менее 6 – 10 дБ (2 – 3 раза по давлению).

Актуальность проблемы измерения характеристик шумоизлучения при воздействии фоновой помехи стала осознаваться отечественными специалистами ВМФ и промышленности с конца 70-х годов при подготовке к сдаче флоту строящихся малошумных ПЛ III поколения. Следует отметить, что несмотря на существующее в то время отставание отечественного ВМФ в области шумности ПЛ от ВМС США, у последних проблема помехоустойчивых измерений имела гораздо меньшую остроту, т.к. географические условия США позволяли найти акватории с уникально низкими фоновыми шумами, а экономика США позволяла за счёт больших капиталовложений оборудовать эти акватории необходимыми измерительными средствами и создать зачастую на голом месте необходимую инфраструктуру. Акватории созданных США полигонов обладают настолько низкими фоновыми шумами, что позволяют контролировать шумность даже новейших ПЛ ВМС США.

К сожалению, географические условия СССР и тем более России не позволяют создать полигоны с низкими уровнями фоновых шумов. Поэтому с начала 80-х годов была поставлена перед наукой и промышленностью задача создания методов и технических средств, обеспечивающих измерение акустических характеристик малошумных ПЛ в условиях воздействия фоновых шумов, сравнимых или даже превышающих по уровню измеряемый полезный сигнал. Поскольку с проблемой выделения полезного сигнала на фоне помех уже многие десятилетия назад пришлось столкнуться при создании гидроакустического вооружения, многими специалистами предлагалось в проблеме измерения пойти уже проторенным путём использования многоэлементных направленных систем, который себя полностью оправдал при создании систем обнаружения. Однако детальный анализ условий применения таких систем для обнаружения и измерения показал, что между этими условиями имеется принципиальная разница:

- чрезвычайно широкий частотный диапазон измерений – 16 октав (2-100000 Гц); ни одна система обнаружения не работает в таком диапазоне;
- требования жёсткого согласования характеристик источника, среды и приёмной системы; если в системах обнаружения рассогласование этих

характеристик ведёт к некоторой, в большинстве случаев – допустимой, потере помехоустойчивости, то в системах измерения одновременно с потерей помехоустойчивости возникают недопустимо большие погрешности измерения – до 6...10 дБ и более;

- ввиду существенного влияния формы волнового фронта на отклик пространственного фильтра, коим является многоэлементная пространственно-протяжённая система, отсутствует однозначная связь между результатами измерения методом МЗПХ с использованием одиночного гидрофона и с помощью направленной системы, а это означает отсутствие преемственности результатов измерения характеристик одних и тех же или аналогичных объектов;

- существует противоречие между требованием сформированности характеристики направленности (ХН) антенны и отношением сигнал/помеха на входе антенны – для обеспечения сформированности ХН необходимо увеличивать дистанцию измерений, при этом входное отношение сигнал/помеха падает быстрее, чем увеличивается усиление антенны.

Попытки преодолеть упомянутые трудности эволюционным путём совершенствования приёмных систем при сохранении основного принципа их применения – выделения полезного сигнала на основе пространственной фильтрации, не привели к полноценному решению задачи измерений уровней подводного шума в соответствии с общепринятым их определением.

Например, созданный НПО «Океанприбор» измерительный комплекс на основе принципа калиброванного поля с использованием в качестве приёмной системы основной антенны штатного гидроакустического комплекса (ГАК) так и остался опытным образцом ввиду ограничения частотного диапазона ГАК и отсутствия преемственности в результатах измерений с существующими системами.

В конце 80-х годов была предпринята попытка создания новой стационарной полигонной измерительной системы, в которой также предполагалось использовать для измерений в условиях помех многоэлементные стационарные решётки. Эта работа так и не была доведена до конца из-за предполагавшейся очень высокой сложности и стоимости и из-за нерешённости ряда принципиальных методических вопросов.

Определённый прорыв в решении задачи наметился при создании измерительных систем, в которых для помехоустойчивых измерений использованы «точечные» сверхнаправленные системы на основе комбинированных гидроакустических приёмников ГКП (приёмник колебательной скорости (ПКС) + гидрофон). Принципиальным свойством таких систем является их «точечность», т.к. их геометрические размеры

существенно меньше размеров источника и расстояния от него до приёмника, а это обеспечивает близость условий измерения таким приёмником к условиям измерения одиночным гидрофоном. При этом помехоустойчивость определяется направленностью ПКС и возможностью формирования различных алгоритмов совместной обработки выходных сигналов ПКС и гидрофона (дипольная – при использовании в качестве принимаемой величины компонент колебательной скорости или плотности потока мощности, кардиоидная – при взвешенном суммировании выходных сигналов гидрофона и ПКС и т.п.) и зависит от различия между пространственными спектрами помехи и полезного сигнала. В определённых условиях измерений выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с одиночным гидрофоном может достигать 8 – 10 дБ, например, когда измеряемый объект находится снизу под приёмной системой, а источником помехи является шум взволнованной поверхности моря и формируется кардиоидная характеристика направленности. Определённый выигрыш может быть достигнут и при подавлении помех от дальнего судоходства, приходящих с горизонтального направления, и использовании в качестве измеряемой величины вертикальной компоненты вектора колебательной скорости или плотности потока мощности. Правда, в условиях стационарного полигона, когда измеряемый объект находится выше приёмной системы, подавление шума поверхности невелико – не превышает 3 дБ, что явно недостаточно для измерения акустических характеристик малошумных объектов в весьма важном поддиапазоне частот от 200 до 2000 Гц.

Существенным недостатком измерительных комплексов с комбинированным приёмником являются:

- высокая виброчувствительность, что препятствует их использованию на низких звуковых частотах при постановке приёмной системы с СФП, находящегося в дрейфе;
- не гарантируется совпадение результатов измерения с помощью КГП и одиночного гидрофона при неизвестной форме волнового фронта сигнала источника – только для плоского фронта эта связь базируется на известном соотношении между давлением p и колебательной скоростью v через плотность воды ρ и скоростью звука c $p = \rho c v$;
- ограниченность частотного диапазона КГП.

Поэтому создание измерительных систем с КГП не позволило в полном объёме решить задачу измерения параметров малошумных кораблей во всём требуемом диапазоне частот.

Перечисленные выше проблемы применения для измерений акустических характеристик малошумных кораблей направленных приёмных систем, в том числе и на основе «точечных» ГКП, стимулировали работу по поиску

таких методов измерений, которые позволили бы, с одной стороны, решить проблему достижения необходимой помехоустойчивости во всём диапазоне частот, а с другой – позволили бы сохранить преемственность результатов измерений с традиционным методом МЗПХ.

В качестве альтернативы принципу пространственной фильтрации, лежащему в основе направленных приёмных систем, было предложено применение траекторно-избирательной согласованной обработки сигналов, т.е. такой, которая позволяет оценить параметры сигнала, создаваемого источником, движущимся по определённой траектории, наблюдаемого на фоне помех, создаваемых другими источниками. Этот подход, как было показано в ходе исследований, выполненных во ВНИИФТРИ, может быть использован для оценки различных параметров гидроакустического поля, включая:

- уровни подводного шума на стандартной дистанции (в соответствии с идеологией РКНШ-80);
- уровни и характеристики направленности шумоизлучения в дальнем поле;
- местоположение зон шумоизлучения на корпусе корабля и зон шумоизлучения отдельных источников;
- параметры дискретных составляющих (частоты, уровни, энергетическая ширина спектра).

Для измерения основной характеристики шумности было предложено использовать согласованную фильтрацию выходного сигнала типового звена «полосовой фильтр-квадратичный детектор-интегратор», являющегося одним из основных элементов любой системы измерения уровней сигнала в выбранной полосе частот.

Сама по себе теория согласованной фильтрации достаточно развита в работах отечественных и зарубежных авторов (достаточно упомянуть ставшие классическими монографии Б.Р. Левина, Г. Ван-Трисса и др. работы). Однако основные результаты в этой области были получены при решении задач выделения сигналов известной формы из аддитивной смеси с помехой и измерении его параметров (локация, связь и т.п.), поскольку полезный сигнал является случайным (шумовым), непосредственное его выделение из смеси со случайным шумовым помеховым сигналом методами согласованной фильтрации невозможно. Именно поэтому было предложено применять согласованный фильтр к выходному сигналу типового звена. Поскольку выходной сигнал звена пропорционален мощности сигнала в полосе, т.е. его энергетической характеристике, метод получил название метода энергетической согласованной обработки (ЭСО). При статистической независимости акустического сигнала объекта и фоновых шума выходной сигнал типового звена представляет собой суперпозицию

сглаженных интегратором (фильтром нижних частот) значений квадратов измеряемого сигнала (первое слагаемое в формуле, фоновой помехи (второе слагаемое) и перекрёстного члена, равного сглаженному значению их произведения (третье слагаемое).

$$W_f(t) = \langle P_{sf}^2(t) \rangle_{\tau} + \langle P_{nf}^2(t) \rangle_{\tau} + 2 \cdot \langle P_{sf}(t) \cdot P_{nf}(t) \rangle.$$

Первое слагаемое, рассматриваемое как функция времени, есть не что иное, как характеристика, описывающая зависимость мощности полезного сигнала от времени – проходная характеристика (ПХ). Как указывалось выше, именно её максимальное значение и есть величина, подлежащая измерению. Если источник в процессе измерений движется по известной траектории, известны его характеристика направленности и свойства среды распространения звука, можно считать, что форма ПХ известна с точностью до величины максимума и момента достижения этого максимума. В этом случае согласованная фильтрация применяется в своём классическом виде путём вычисления корреляции между измеренной ПХ, отягощённой помехами, как это видно из формулы, и её моделью, рассчитываемой на основе данных о траектории движения источника, характеристиках среды. Максимум взаимокорреляционной функции первого слагаемого суммы (1) и модели с точностью до легко вычисляемого масштабного множителя и есть искомый результат измерений. Отклики согласованного фильтра на второе и третье слагаемые имеют нулевое среднее значение, а их дисперсии определяют случайную составляющую ошибки измерений. Помехоустойчивость определяется отношением суммы дисперсий к квадрату максимума полезного отклика. Как показывают теоретические расчёты и экспериментальные исследования, реально достижимое отношение сигнал/помеха, при котором возможны измерения с приемлемой точностью, достигает минус 10 – минус 12 дБ, в зависимости от ширины полосы додетекторного фильтра, характера помехи.

Для реального внедрения в практику метода ЭСО необходимо было решить ряд принципиальных вопросов, из которых наиболее важным был вопрос о зависимости формы ПХ от характеристики направленности источника излучения. Решение этого вопроса было найдено путём применения алгоритма выбора максимума нормированной корреляции между измеренной ПХ и набором из нескольких модельных ПХ, соответствующим источникам различного типа (монополь, диполи различной ориентации и др.). Правда, остаётся вопрос о том, насколько выбранные априори модели соответствуют реальным характеристикам источников.

Решение этой задачи опирается, с одной стороны, на анализ возможных характеристик источников подводного шума, а с другой – на оценку погрешности определения УПШ, вызванную несоответствием реформ

реальной ПХ и весовой функции согласованного фильтра. Теоретические расчёты, исследования на математических моделях и обработка большого массива реально измеренных ПХ объектов различного типа (не менее 1500 реализаций) показали, что эта погрешность не превышает в среднем 1,5 дБ, если в качестве “модельных” выбрать ПХ монополя в свободном пространстве, диполя с осью, перпендикулярной траектории движения, монополя в плоском волноводе с цилиндрическим законом спада уровня с расстоянием. Такая погрешность вполне допустима. Характеристики среды при относительно малом расстоянии (50 – 100 м) от приёмной системы до траектории движения источника заметного влияния на погрешность измерения не оказывают. Не представляет принципиальных трудностей и создание технических средств для реализации ЭСО, т.к. могут использоваться существующие приёмные системы и анализаторы спектра. Это привело к быстрому внедрению метода ЭСО как в уже существующие измерительные комплексы типа ГИА-495, так и во вновь создаваемые полигонные и судовые комплексы технических средств.

На первых порах (1991 – 1994 гг.) были созданы простые неавтоматизированные приставки АСФ к комплексу ГИА-495 на базе персональных ПЭВМ и специально разработанных устройств обмена данными между анализатором и ПЭВМ, а с 1994 года развернулись НИОКР по созданию автоматизированных комплексов технических средств для стационарных полигонов. В 2012 году были успешно завершены государственные испытания новой судовой системы «Звук», существенно расширяющей возможности судовых измерительных комплексов. Были разработаны, аттестованы и введены в действие «Методики выполнения измерений» с использованием как простейших приставок АСФ, так и всех перечисленных автоматизированных комплексов.

Разработка и внедрение технических, методических и программных средств, реализующих метод ЭСО при измерении параметров шумности морских объектов, революционным образом изменило ситуацию с натурными акустическими измерениями. Например, почти полностью прекратились длительные, иногда в несколько месяцев, задержки с проведением акустических испытаний вновь построенных кораблей, связанные с ожиданием благоприятных метеоусловий, особенно болезненные для промышленности. Для особо малошумных объектов, таких как дизель-электрические и атомные подводные лодки последних лет сдачи применение существовавших измерительных систем делало измерение параметров акустического поля в условиях российских полигонов вообще невозможным, в то время как использование измерительных систем с ЭСО обеспечивает быстрое проведение их акустических испытаний.

Начиная с 1992 г. заводские, государственные, расширенные, специальные и иные испытания ПЛ проводятся только измерительными комплексами, использующими ЭСО, а начиная с 2007 года на ТОФ выполняются и все плановые контрольные замеры шумности. По мнению компетентных специалистов ВМФ, РАН и промышленности, внедрение ЭСО позволяет решить проблему контроля шумности ПЛ на перспективу до 2015 – 2020 годов.

Дальнейшим развитием метода ЭСО является так называемый метод энергетической согласованной траекторной обработки (ЭСТО), сущность которого заключается в том, что при прохождении корабля вдоль измерительной линии из нескольких разнесённых на значительное расстояние гидрофонных баз может быть проведено усреднение проходных характеристик (ПХ), полученных по каждой базе, предварительно сдвинутых во времени таким образом, что все они одинаково сориентированы по отношению к моментам траверза приёмников, а усреднённая ПХ подвергается процедуре энергетической согласованной обработки. В результате этой операции дисперсия флуктуационных компонент уменьшается обратно пропорционально числу усредняемых ПХ и достигается выигрыш приблизительно $5Lg N$ (N число усредняемых ПХ), по сравнению с обычной ЭСО. Условием достижения такого выигрыша является некоррелированность флуктуаций помеховых компонент отдельных ПХ. Метод ЭСТО внедрён в полигонных измерительных системах и создаёт определённый запас помехоустойчивости, необходимый для измерения параметров шумности строящихся и проектируемых перспективных особо малозумных кораблей (как правило, для измерения акустических характеристик современных кораблей вполне достаточно применения ЭСО). В настоящее время прорабатывается вариант ЭСТО для судовых измерительных комплексов с единичным приёмником, при котором усредняются ПХ, полученные на нескольких одинаковых измерительных галсах. Это обеспечит возможность применения таких комплексов для контроля акустических характеристик перспективных кораблей.

Существенной положительной особенностью методов энергетической согласованной обработки является возможность применять их при обработке выходных сигналов не только одиночных гидрофонов, но и более сложных систем, таких как комбинированные приёмники, пространственные каналы антенн и т.п. При этом происходит суммирование эффективности пространственной и траекторно-избирательной обработки.

Таким образом, применение методов энергетической согласованной обработки и траекторного накопления коренным революционным образом изменило ситуацию с измерением уровней шумоизлучения движущихся морских объектов в условиях воздействия фоновых помех. Существовавшая

много лет проблема контроля шумности малошумных кораблей на российских полигонах, характеризующихся высоким уровнем фоновой помехи, была снята на длительную перспективу – по крайней мере, до 2025 года.

Как указывалось выше, одной из важнейших задач, стоящих перед специалистами по гидроакустическим измерениям, является получение информации, необходимой для выявления источников подводного шумоизлучения и количественной оценки вклада этих источников в общую мощность акустического излучения корабля. Без решения этой задачи невозможно ни поддержание шумности корабля на заданном уровне, ни снижение шумности новых строящихся и проектируемых кораблей.

Даже для кораблей старых проектов, характеризующихся наличием относительно небольшого числа превалирующих источников, формирующих подводное шумоизлучение, получение этой информации представляло непростую задачу. Наиболее употребительными путями её решения являлись измерение уровней подводного шума, создаваемого отдельными механизмами «на стопе», контроль виброактивности механизмов, а также метод включения и выключения либо изменения режима работы отдельных механизмов, в том числе и на ходовом режиме. Даже выполнение таких, казалось бы, достаточно простых операций вызывало значительные трудности. Например, далеко не каждый механизм может быть включён, особенно на ходовом режиме, многие механизмы могут работать только на одном режиме. Поэтому задачи выявления источников подводного шума зачастую решались с большими трудностями, в течение длительного времени.

Создание малошумных кораблей существенно усложнило ситуацию. Во-первых, в спектре шума таких кораблей резко уменьшилось количество значимых дискретных составляющих, являющихся ранее основной причиной высоких уровней подводного шумоизлучения. Во-вторых, в связи со снижением виброактивности механизмов, улучшением их виброизоляции снизился вклад в подводный шум источников механического происхождения и, соответственно, возрос вклад гидродинамических источников, которые проявляются только на ходовых режимах, а также источников, связанных с гидродинамическими и аэродинамическими процессами в трубопроводах, циркуляционных трассах и т.п. В-третьих, подавление наиболее значимых источников привело к тому, что во многих частотных полосах уровень подводного шума стал определяться совокупностью вкладов нескольких близких по значимости источников, что существенно усложнило процедуры их выявления. Вследствие указанных причин выявление источников подводного шума малошумных кораблей последних поколений стало серьёзной проблемой, из-за нерешённости

которой выявление некоторых источников в процессе акустических испытаний стало затягиваться иногда на многие месяцы, а некоторые корабли так и вступали в строй и плавали с невыявленными источниками подводного шума. Более того, нерешённость этой проблемы стала тормозом на пути достижения высокого акустического качества проектируемых и строящихся кораблей.

Работы по получению измерительной информации, необходимой для выявления источников подводного шума, исторически первыми начал проводить ЦНИИ им. А.Н. Крылова, добившись определённых успехов в создании методов выявления источников, вполне работоспособных на кораблях предыдущих поколений. Во ВНИИФТРИ такие работы, в первую очередь применительно к ходовым режимам, были начаты с середины 70-х годов прошлого столетия. Первым из научно-технических решений, предложенных ВНИИФТРИ и нашедшим практическое применение, был интерферометрический метод локализации зон преобладающего шумоизлучения, основанный на принципе обращённого апертурного синтеза. Основная идея этого метода была заимствована из радиоастрономии (так называемый суперсинтез с неподвижными радиотелескопами), где решались задачи определения координат радиоисточников и оценки распределения радиояркости по поверхности естественных космических объектов. Для решения задачи определения распределения зон шумоизлучения вдоль корпуса корабля используется интерферометр, образованный двумя неподвижными гидрофонами, относительно которых по известной прямолинейной траектории движется корабль, т.е. движение корабля используется для синтеза измерительной апертуры подобно тому, как в радиоастрономии при суперсинтезе используется вращение Земли.

С начала 80-х годов интерферометрический метод успешно использовался при проведении расширенных акустических испытаний кораблей на полигонах Балтийского, Белого, Чёрного и Японского морей, позволив в ряде случаев значительно облегчить и ускорить поиск источников подводного шума испытываемых кораблей. Он позволил сделать определённый шаг в решении задачи обеспечения выявления источников подводного шума, однако имеет ряд принципиальных ограничений, не позволяющих с его помощью получить окончательное решение задачи выявления источников шума. К числу их относится ограничение по частотному диапазону снизу – на частотах ниже 50 Гц разрешающая способность и точность явно недостаточны и т.п. Но основным ограничением является невозможность выделить источники (например, механизмы), расположенные на широко используемых в настоящее время зональных блоках и сборках, а также имеющие неопорные связи с основным

корпусом. Как правило, зоны излучения шума в водную среду в этих случаях не совпадают с местоположением самого виброактивного механизма, т.к. передача колебательной энергии на излучающую поверхность основного корпуса происходит различными путями, чаще всего через амортизаторы и фундаменты блоков и сборок, а не через фундаменты механизмов.

Радикальное изменение ситуации с решением проблемы произошло после создания и применения метода динамических синхронных измерений – ДСИ, основным содержанием которого является синхронная регистрация в единой шкале времени сигналов подводного шума, принимаемых измерительными приёмниками полигона, и опорных сигналов, снимаемых с датчиков вибраций механизмов и корпусных конструкций, воздушного и гидродинамического шума в помещениях и трубопроводах, гидрофонов, расположенных в междубортном пространстве. Сама по себе идея синхронной регистрации сигналов, поступающих от независимых пространственно разнесённых источников родилась также в радиоастрономии при реализации суперсинтеза, где необходимо было получать синхронизованные сигналы с радиотелескопов, разнесённых на многие тысячи километров, для их последующей когерентной интерферометрической обработки. В гидроакустических измерениях впервые этот метод был реализован во ВНИИФТРИ в 1982 году.

Наличие синхронизованных с точностью до долей миллисекунды внешних и внутренних (опорных) сигналов позволяет при их когерентной обработке решить ряд ранее не решаемых задач по получению информации о гидроакустическом поле корабля и его источниках.

Так, появилась возможность сформировать интерферометр с переменной базой, используя сигнал внешнего неподвижного приёмника (например, гидрофона) и опорный сигнал с внутреннего приёмника (вибродатчика, междубортного гидрофона), движущегося вместе с кораблём. Такой интерферометр позволил определить местоположение зоны шумоизлучения, вызванного конкретным источником. Стало возможным количественно оценить вклад этого источника в формируемое кораблём гидроакустическое поле, определить пути передачи вибровозбуждения от источника на основной корпус. Информация об этом играет исключительно важную роль в планировании мероприятий по акустической защите корабля, т.к. позволяет определить не только источник шумоизлучения, но и оценить эффективность средств виброизоляции механизмов и вибропоглощения. Важно отметить, что реализация возможностей, предоставляемых методом ДСИ, не требует специального маневрирования корабля и применения специальных приёмных систем и совмещается с обычными измерениями параметров шумности. Необходимо, правда, учитывать, что результаты

применения ДСИ могут быть получены не в реальном масштабе времени (подобно интерферометру), а после доставки в центр обработки записей опорных сигналов, полученных на борту корабля. Обычно процедура доставки записей и обработки занимает 1 – 2 суток после завершения очередного этапа испытаний.

Хотя метод ДСИ позволяет получить значительный объём информации, необходимой для выявления и оценки характеристик источников подводного шума на ходовых режимах, обычно он применяется вместе с другими методами когерентной обработки сигналов, такими, как интерферометрический, метод «неподвижной точки», узкополосного спектрального анализа с компенсацией эффекта Доплера, времячастотных распределений, большая часть которых применительно к задаче гидроакустических измерений разработана или коренным образом доработана во ВНИИФТРИ. Эти методы, в различных сочетаниях, применяемые с 1983 года, позволили существенно упростить решение задач выявления источников подводного шумоизлучения, особенно тех из них, которые вызывают превышение норм шумности кораблей. Их применение позволило ускорить проведение заводских и расширенных акустических испытаний кораблей, обеспечив устранение превышений норм и своевременную сдачу кораблей. Начиная с 1991 года, все заводские, расширенные и специальные акустические испытания на измерительном полигоне Северного флота проводились с использованием разработанных ВНИИФТРИ методов когерентной обработки сигналов, перечисленных выше. В настоящее время эти методы реализованы в аппаратуре выявления источников, входящей в состав полигонного комплекса технических средств и в аппаратуре, изготовленной по заказу ПО «Севмашпредприятие» и переданной ему в эксплуатацию в 2006 году. Одновременно с созданием технических и программных средств указанной аппаратуры были разработаны и методические рекомендации по её использованию, вошедшие в состав эксплуатационной документации.

Широкое использование созданных методов когерентной обработки позволило коренным образом изменить ситуацию с выявлением источников как повышенного (в ходе заводских испытаний), так и «нормального» шумоизлучения, что крайне важно для бюро-проектантов и заводо-строителей кораблей. Значительно снизились затраты времени и технического ресурса кораблей при поиске источников превышения норм шумности, прекратились случаи вынужденного приёма флотом у промышленности кораблей с невыявленными источниками повышенного шумоизлучения.

Создание траекторно-избирательных методов обработки акустических сигналов позволили существенно продвинуться в решении ещё одной

важной задачи акустических измерений – определения параметров дальнего (сформированного) поля, определяющих скрытность корабля от средств дальнего гидроакустического обнаружения. Как уже говорилось в начале статьи, информация, получаемая при стандартных измерениях максимума проходной характеристики на малых дистанциях, во многих случаях не позволяет достоверно оценить акустическую скрытность корабля от средств дальнего акустического обнаружения, поскольку простой пересчёт полученных стандартных уровней подводного шума в дальнее поле, базирующийся на представлении корабля точечным ненаправленным источником, не позволяет оценить уровни дальнего поля на дистанциях обнаружения корабельными и стационарными средствами акустического наблюдения. Попытки выполнить непосредственные измерения уровней подводного шума на дистанциях обнаружения не привели к решению проблемы. Во-первых, удаление приёмно-измерительной системы на такие дистанции резко снижает и без того низкое отношение сигнал/помеха на приёмной системе, а во-вторых, на дистанциях уже в несколько сотен метров на результаты измерений начинают существенно влиять гидролого-акустические характеристики среды, учёт которых представляет собой серьёзную проблему, требующую не только наличия адекватных методов расчёта (эта проблема в настоящее время практически решена), но и детального знания характеристик среды в момент измерений, что весьма проблематично.

Ещё в начале 90-х годов было предложено паллиативное решение проблемы измерения параметров дальнего поля – измерение уровней подводного шума, создаваемых кораблём на дистанции 100 – 150 м в 4-х главных направлениях: носа, кормы, траверза левого и правого бортов. На таких дистанциях в принципе можно компенсировать с приемлемой точностью влияние среды в условиях отечественных полигонов путём учёта отражения только от поверхности и без учёта рефракции, вызванной вертикальным распределением скорости звука. Однако остаётся существенная проблема, связанная с уменьшением отношения сигнал/помеха по сравнению со стандартной дистанцией измерений на 6 – 10 дБ. Непосредственное использование описанных выше методов ЭСО и ЭСТО оказывается возможным только для траверсных направлений, где при движении корабля можно получить обычную проходную характеристику, максимум которой может быть определён с использованием ЭСО или ЭСТО при условии формирования согласованного фильтра с учётом отражения. Этот подход для измерения уровней излучения в сторону носа и кормы непосредственно неприменим. Поэтому был «разработан» специально модифицированные алгоритмы ЭСО и ЭСТО, позволяющие определить в условиях воздействия помех значение проходной характеристики,

соответствующее заданному расстоянию (например, 150 м) от центра зоны излучения, а не её максимума. Этот алгоритм реализован в КТС-2 «Тополь», создана, метрологически аттестована и утверждена методика выполнения измерений в 4-х главных направлениях в условиях помех. И всё-таки, путь решения задачи измерения параметров дальнего поля через измерение уровней излучения в 4-х главных направлениях нельзя считать радикально революционным.

Существенно более радикальным является применение для измерения параметров излучения в дальнем поле основанного на идеях голографии так называемого метода «ближнего поля». Суть его заключается в том, что вместо непосредственного измерения уровня сигнала объекта в дальнем (сформированном) поле используется измерение амплитудно-фазового распределения (АФР) вокруг объекта на малых расстояниях (например, в зоне Френеля) и последующий расчёт характеристик направленности и уровней излучения в дальнем поле на основе соотношений, вытекающих из известной теоремы Кирхгоффа-Гельмгольца. Впервые этот метод был разработан и применён в радиотехнике для измерения диаграмм направленности крупногабаритных СВЧ-радиоантенн, дальняя зона которых отстоит от раскрытия антенны на сотни километров. На основе этого метода удалось, измерив амплитудно-фазовое распределение поля в раскрыве, восстановить с высокой точностью диаграмму направленности антенны. Следует отметить, что существенную роль в создании, применении и метрологическом обосновании этого метода сыграл бывший Ереванский филиал ВНИИФТРИ (впоследствии – ВНИИ радиофизических измерений Госстандарта). Сходство математического описания волновых процессов в гидроакустике и электродинамике, естественно, наводит на мысль использовать этот же принцип и при измерении параметров дальнего поля шумоизлучения корабля. При этом нужно учитывать не только сходство, но и существенное отличие от антенной техники СВЧ. С одной стороны, поскольку корабль можно представить как линейный, а не поверхностный источник, измерение АФР можно выполнить не на плоскости, а на прямой линии, параллельной его корпусу. С другой стороны, при измерениях диаграммы направленности антенны последняя возбуждается специальным высокостабильным гармоническим сигналом, в то время как корабль излучает шумовой сигнал и при этом в одной частотной полосе могут присутствовать сигналы нескольких независимых источников, разнесённых по кораблю. Кроме того, если при измерениях АРФ в раскрыве антенны можно полностью пренебречь влиянием отражений от подстилающей поверхности и местных предметов, условия измерения АРФ поля корабля не позволяют не учитывать отражений по крайней мере, от поверхности акватории.

Тем не менее, проблемы измерения АФР и восстановление по нему ХН и уровней дальнего поля в значительной степени удалось решить. В первую очередь, этому способствовало использование динамических синхронных измерений, которые позволяли с точностью до фазы синхронизировать сигналы подводного шума, принимаемые приёмниками полигона, и опорные (возбуждающие) вибросигналы непосредственно на отдельных источниках шумоизлучения корабля. При движении корабля относительно неподвижного приёмника производятся измерения АФР каждого из независимых корабельных источников и восстанавливается частная ХН в выбранной полосе. Удалось решить задачу учёта влияния поверхности путём использования при восстановлении ХН функции Грина для полупространства при известных параметрах траектории корабля. В настоящее время достаточно успешно измеряются ХН на частотах дискретных составляющих и узкополосных подъёмов спектра подводного шума кораблей. Важной особенностью разработанного метода измерения ХН является то, что он выполняется в условиях ограниченного по размерам полигона и совмещается со стандартными измерениями подводной шумности, не требуя специального маневрирования корабля. При этом результаты измерения представляют собой характеристики точечного направленного источника и могут использоваться для расчёта уровней сигнала, принимаемого средствами гидроакустического наблюдения при известных характеристиках среды распространения в конкретной обстановке. И хотя метод «ближнего» поля ещё не получил столь широкого распространения, как помехоустойчивые методы измерения стандартных уровней подводного шума и методы когерентной обработки при поиске источников, в течение последних 7 – 8 лет они постоянно применяются при расширенных и специальных испытаниях кораблей на полигоне, а результаты измерения направляются в организации промышленности, на корабельные соединения, службы защиты кораблей.

На основании изложенного выше, на наш взгляд, может быть сделан вывод о том, что в проблеме измерения–параметров первичного акустического поля кораблей за последние 15 – 20 лет произошли коренные изменения, носящие в определённой степени не эволюционный, а революционный характер, связанный с применением новых идей и методов, ранее в акустике не применявшихся и позволивших существенным образом изменить ситуацию с измерением как стандартных, много лет используемых параметров шумности, так и с получением принципиально новой информации, необходимой для выявления источников подводного шумоизлучения и оценки параметров поля, определяющих скрытность кораблей.