

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ НАДВОДНОГО СУДНА В МЕЛКОМ МОРЕ

© 2022 г. Г. М. Глебова^а, Г. А. Жбанков^а, Г. Н. Кузнецов^{б, *}

^аЮжный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

^бИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991 Россия

*e-mail: skbmortex@mail.ru

Поступила в редакцию 21.07.2021 г.

После доработки 20.09.2021 г.

Принята к публикации 22.09.2021 г.

Исследуется возможность построения в дальней зоне акустической модели шумоизлучения надводного судна с использованием равномерно распределенных вдоль корпуса излучателей монополярного типа. На основе экспериментальных данных, полученных в мелком море, рассчитаны характеристики эквивалентных монополярных источников излучения, формирующих суммарное звуковое поле, аналогичное звуковому полю от движущегося надводного судна. Рассчитаны мощности каждого монополя и взаимно-корреляционные связи между ними. Для выбранных дискретных составляющих и линейной модели протяженного источника построены характеристики направленности, приведенные к свободному пространству. При экспериментах и расчетах применялись технические средства и алгоритмы, обеспечивающие высокоточное позиционирование судна относительно приемных элементов антенны. Эквивалентная модель передаточной функции волновода в районе выполнения работ была предварительно получена путем акустической калибровки волновода с применением специально разработанной аппаратуры, методики проведения экспериментов и алгоритмов обработки. Это позволило при расчете эквивалентного звукового поля и характеристик направленности использовать адекватные модели грунтов и передаточной функции волновода. Показано хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных — как характеристик направленности, так и распределения поля вдоль проходных характеристик. Даны практические рекомендации для разработки методик измерения шумовых полей надводных судов.

Ключевые слова: мелкое море, приведенные к свободному пространству характеристики источников, направленность излучения и эквивалентная акустическая модель шумового поля движущегося судна, передаточные функции волновода, взаимное позиционирование

DOI: 10.31857/S0320791922010038

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка и экспериментальное исследование эффективности методов и средств оценки характеристик шумоизлучения надводных и подводных источников является одной из важных проблем прикладной акустики, которой интенсивно занимаются как в России, так и в ведущих зарубежных странах. Работы выполняются в различных направлениях и в течение многих десятилетий. Среди них можно отметить пионерские исследования методов оценки характеристик надводных и подводных объектов и гидроакустических систем различного назначения [1–3]. Из современных публикаций, посвященных исследованию шумов реальных объектов, можно выделить работы [4–6], в которых формулируются нерешенные проблемы измерений гидроакустических характеристик морских объектов, обсуждаются новые подходы и современные методы измерений,

анализируются экспериментальные данные, полученные в натуральных условиях. Отмечаются большие достижения в снижении подводных шумов реальных объектов [7, 8]. Но, наряду с традиционными работами в указанных выше направлениях, в последние годы все больше внимания уделяется исследованию характеристик и путям снижения подводного шума надводных кораблей, в том числе коммерческих судов — грузо-пассажирских, танкеров, лесовозов и т.д. Исследователи обращают внимание на быстрый рост “акустической загрязненности” не только в шельфовой зоне, но и на материковых склонах и в абиссальных зонах. Причина — ежегодное увеличение количества и средней скорости движения судов, их общего и локального тоннажа. В связи с этим ставится и решается задача снижения их шумности, а для этого необходимо выполнять достоверные

измерения шумов, приведенных к свободному пространству [4, 5, 9–13].

В ряде работ изучаются шумы надводных судов — как с точки зрения их изменчивости в зависимости от типа двигательного-движительного комплекса или режима движения, так и их воздействия на экологическую обстановку в морских акваториях, например, в зоне обитания серых китов [13]. В последние годы также заметно возросли требования к экологическим нормам, предъявляемым к условиям работы и проживания личного состава, экипажей и пассажиров надводных судов различного типа, в частности, грузо-пассажирских судов и танкеров. В связи с этим, выполняются исследования зависимости уровней излучения от тоннажа, скорости движения и типа двигателей. При этом, как правило, анализируется изменчивость уровней шумов при проходе судна мимо приемных элементов. Это позволяет оценить их зависимость от аспекта излучения, в частности излучения в корму, в нос или в траверсных направлениях [4, 5, 14]. В результате установлено, что уровни излучения в зону вблизи кормы на средних и пониженных частотах существенно превышают уровни излучения в носовых аспектах.

Важно также отметить, что, помимо анализа характеристик звуковых полей, решаются задачи оценки мощности источников излучения. В [14, 15] получены экспериментальные результаты и выполнен пересчет в точку излучения в предположении, что в зоне корпуса судна имеется один консолидированный источник монополюсного типа. В [6, 16, 17] произведено теоретическое исследование модели шумоизлучения в предположении, что излучает равномерно распределенная вдоль корпуса судна группа элементарных источников (монополей). Аналогичные теоретические и, что более интересно, экспериментальные исследования по аттестации излучателей выполнены в работах [19, 20], но с точечными буксируемыми монополями.

В данной работе оцениваются свойства источников шумоизлучения в постановке, близкой к [19, 20], но на основании экспериментально зарегистрированных сигналов от движущегося в морском волноводе среднетоннажного судна. Кроме того, в отличие от [19, 20], где применяется модель с одним источником, для реального судна используется модель протяженного источника в виде суперпозиции элементарных источников.

Таким образом, в статье рассматривается задача построения модели и оценки параметров эквивалентных источников, суперпозиция которых должна создавать в дальней зоне волновода поле звуковых давлений (ЗД), аналогичное по направленности и уровням излучения реальному шумовому полю надводного судна. Для этой цели разработана и прошла экспериментальную проверку

технология последовательного решения целого комплекса прямых и обратных задач, в частности, включающих: оценку геометрии пространственно развитой антенны и позиционирование во времени движущегося судна относительно каждого приемного элемента антенны; акустическую калибровку района проведения экспериментов и построение модели передаточной функции волновода (ПФВ) с учетом реальных характеристик грунта; построение на выделенных частотах характеристик направленности излучения, пересчитанных к свободному пространству; проверку адекватности построенных моделей (экзамен) путем сравнения экспериментальных и расчетных проходных характеристик — зависимостей ЗД вдоль траекторий движения источника.

2. ИСХОДНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К УСЛОВИЯМ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

По нашему мнению, перечисленные выше задачи должны решаться в два этапа. На первом этапе необходимо: в зоне расположения приемной антенны с высокой точностью регистрировать вдоль траектории движения судна звуковые давления, выделять на фоне помех слабый сигнал от судна с минимально возможной погрешностью; пересчитывать измеренные в точках приема величины ЗД в абсолютные значения с учетом абсолютной чувствительности сквозного приемного тракта.

На втором этапе требуется: произвести непрерывное и высокоточное позиционирование судна относительно каждой точки приема; разработать адекватную модель ПФВ, построенную на основе акустической калибровки района работ; пересчитать абсолютные значения ЗД, измеренные в каждой точке приема, в точку излучения.

Проблема усложняется тем, что в общем случае судно — протяженный источник с некоторым распределением вдоль корпуса выбранного множества локальных излучателей. Отсюда следует необходимость построения и использования акустической модели судна как многопараметрического излучателя.

На низких частотах ($f < 30\text{--}70$ Гц) в отдельных случаях рекомендуется размещать в районе кормы (гребного винта) мультиполюсный источник с эквивалентными параметрами монополя, диполей и квадруполей [11, 19–22]. В таком варианте координаты источника на корпусе судна предполагаются известными и измеренные ЗД необходимо пересчитывать в эту точку. Но на средних и высоких частотах из-за произвольного распределения источников вибраций вдоль корпуса выделить ограниченную в пространстве излучающую зону затруднительно. В таких условиях рекомендуется [11, 12, 16, 17] заменять реальные распреде-

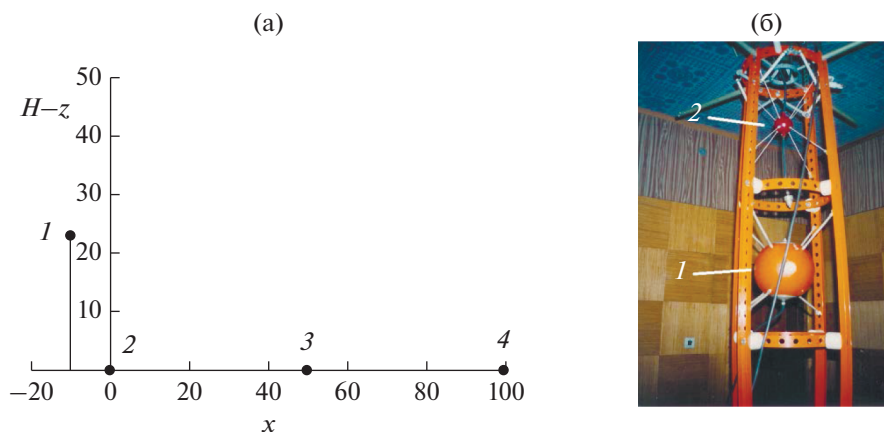


Рис. 1. (а) – Конструктивная геометрия приемной системы в вертикальной плоскости и (б) – фотография модуля приемной системы.

ленные вдоль корпуса источники группой разнесенных в пространстве эквивалентных точечных излучателей – эквивалентных в том смысле, что их совокупность должна создавать в дальней зоне звуковое поле, идентичное полю реального протяженного источника – по характеристикам направленности и уровням излучения.

Ниже предпринимается попытка экспериментально решить в указанной постановке эту задачу с тем лишь упрощающим отличием, что источник был достаточно шумным, а приемная система – хоть и прошла абсолютную калибровку, но не была сертифицирована. По этой причине пересчитанные в точку излучения значения ЗД приведены в относительных единицах. На средних частотах для оценки мощности излучаемых судном сигналов принята модель, в которой реальный объект заменяется суперпозицией равномерно-распределенных вдоль корпуса точечных монополей. Заметим, что ранее такая задача, но в модельной (компьютерной) постановке рассматривалась в [16, 17, 23–26].

На основании выполненных измерений необходимо произвести пересчет измеряемых приемниками антенны величин ЗД в вероятные точки излучения и определить не только комплексные амплитуды монополярных излучателей, но и их ковариационную матрицу. Далее для всех локальных источников с использованием вычисленных членов ковариационной матрицы [25, 26] на типовых частотах – сигнатурах, выделяющихся в измеренных спектрах шумов судна, рассчитываются для свободного пространства характеристики направленности. В спектрах, например, в момент движения судна в районе траверса, следует выделять наиболее интенсивные фурье-составляющие и на выделенных частотах решать задачу оценки приведенной шумности [6, 9–12, 14–20].

3. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

3.1. Приемная система

Экспериментальные исследования проводились в плоско-слоистом волноводе глубиной 53 м с использованием приемной антенны, состоящей из четырех разнесенных в пространстве модулей. Конструктивное расположение приемных модулей в вертикальной плоскости и номера приемных элементов представлены на рис. 1а: три модуля располагались на донном горизонтальном участке, один модуль был приподнят вертикально на 20 м от дна. На вертикальной (z) и горизонтальной (x) осях обозначены разнесения приемников в метрах. На рис. 1б приведена фотография одного из модулей антенны. Геометрическое расположение приемных элементов антенны и оценка изменяющегося расстояния от приемников до эквивалентных излучателей (до судна) были определены по акустическим сигналам путем обработки высокочастотных импульсных сигналов по методике, представленной в [26, 27].

В состав каждого модуля входили элементы, обеспечивающие прием сигналов в двух частотных диапазонах (1) 20–1200 и (2) 1000–10000 Гц. Зарегистрированные приемными модулями сигналы передавались в цифровом виде по кабелю на борт приемного судна и далее вводились в компьютер.

3.2. Взаимное позиционирование

Для решения задачи взаимного позиционирования приемных модулей и движущегося судна использовались опущенные с борта судна и буксируемые на кабель-тросе малогабаритный высокочастотный излучатель (пингер) с рабочим диапазоном 2–5 кГц и расположенный в обтекателе

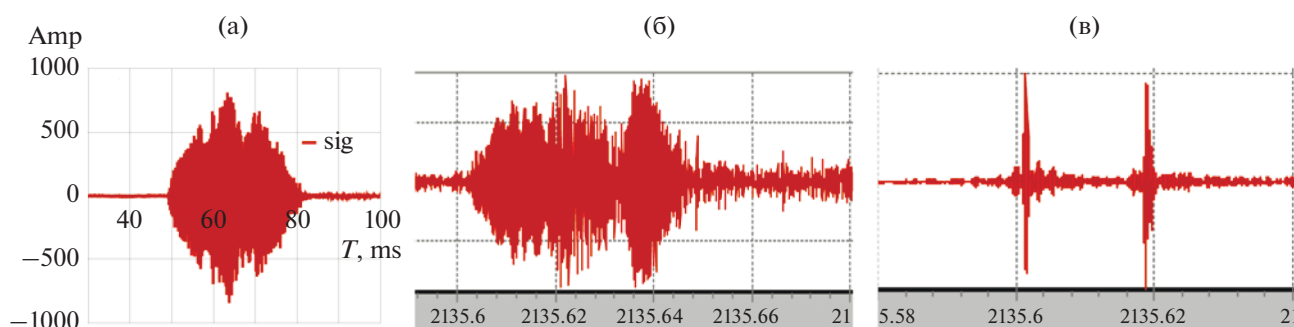


Рис. 2. (а) – Излучаемый пингером высокочастотный импульс на контрольном гидрофоне, (б) – сигнал на приемном элементе антенны и (в) – его корреляционная функция с “образом”.

на расстоянии 1 м от излучателя контрольный гидрофон. Глубина буксировки пингера (13 м) регистрировалась датчиком глубины, расположенным рядом с излучателем. Пингер излучал ЛЧМ-импульсы длительностью 0.03 с со средней частотой ~ 3000 Гц (рис. 2а), период излучения импульсов $\tau = 5$ с. Скорость движения и координаты судна измерялись непрерывно с использованием GPS. На рис. 2б изображена осциллограмма сигнала на входе приемного элемента антенны при проведении эксперимента, а на рис. 2в – его корреляционная функция с “образом”.

На борту приемного и излучающего судов были установлены приемники GPS, что позволило в системе единого времени определять времена излучения (T_0) и приема импульсного сигнала (t_i). Запуск пингера производился от импульса GPS, а в сигналах, поступающих от приемной системы, непрерывно в каждом блоке записываемой информации фиксируется время UTC. Расстояние, которое проходит i -й излученный импульс при распространении по прямому лучу, равно $r_i = [t_i - T_0 - (i - 1)\tau]C_w$. Время распространения сигналов от каждой точки излучения рассчитывалось по корреляционной функции принятых сигналов и “образа” импульса (рис. 2в). Два максимума на рис. 2в соответствуют временам прихода импульса по прямому и отраженному от свободной поверхности лучу. Расстояние, пройденное судном за промежуток времени между излучением i -го и j -го импульса, определяется с использованием скорости судна (V) и периода излучения импульсов (τ): $d_{ij} = (j - i)V\tau$. По известным сторонам треугольника с вершинами в точках излучения i и j и точках, в которых находятся приемные элементы, выполняются предварительные оценки координат приемных элементов

$$x_m^{ij} = r_i \cos \alpha_m^{ij} + V\tau(i - 1), \quad y_m^{ij} = r_i \sin \alpha_m^{ij},$$

$$m = 1, \dots, M,$$

$$\cos \alpha_m^{ij} = (r_j^2 - r_i^2 - d_{ij}^2) / 2r_j d_{ij}.$$

Координаты x_m^{ij} и y_m^{ij} далее уточняются путем осреднения при переборе данных по всевозможным треугольникам с вершинами в точках i и j . Подробнее алгоритм взаимного позиционирования и оценки точности координат по этому алгоритму, а также примеры обработки экспериментальных данных, в том числе с учетом вертикального распределения скорости звука, представлены в [26, 27].

При движении исследуемого судна со скоростью 2–3 м/с на разных расстояниях и с различной относительно приемной системы ориентацией (правым и левым бортом) были рассчитаны изменяющиеся во времени координаты приемных модулей и судна. При этом учитывались расстояния между пингером и антенной GPS, установленной на судне-буксировщике излучателя, а также приемной антенной и устройством GPS, установленным на борту приемного судна. Аппроксимирующие прямые – примеры траекторий движения судна относительно приемной системы – представлены на рис. 3.

3.3. Характеристики грунта

Для построения акустической модели передаточной функции в районе установки антенны была предварительно выполнена акустическая калибровка волновода, которая позволила рассчитать параметры модели грунта и оценить ее адекватность с использованием специальной методики [19, 28]. Экспериментальные исследования проводились в этом же районе мелководной шельфовой зоны с глубиной 53 м и сравнительно ровным в зоне движения судна плоскопараллельным дном. Скорость звука в водном слое по данным прямых измерений вертикального распределения температуры воды изменялась по глубине незначительно и равнялась 1473 м/с. Разработанная для диапазона частот 20–300 Гц единая адекватная акустическая модель дна характеризуется следующими параметрами [19, 28]: количество жидких слоев грунта, лежащих на упругом полупростран-

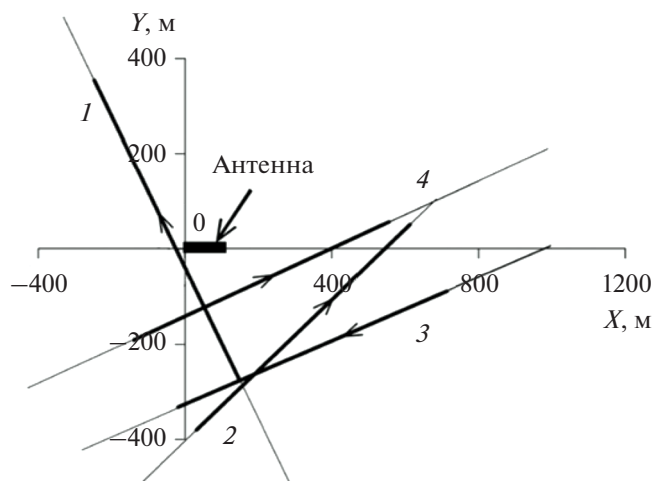


Рис. 3. Графическое представление в горизонтальной плоскости взаимного расположения приемной системы и движущегося судна для четырех прямолинейных галсов. На галсах стрелками указаны направления движения судна.

стве, равно единице, толщина, плотность, скорость звука и коэффициент поглощения звука в слое равны 30 м, 2000 кг/м³, 1710 м/с, 0.01, соответственно. Для полупространства плотность, скорость продольных колебаний и коэффициент поглощения звука имеют следующие значения 2410 кг/м³, 2890 м/с и 0.015. Скорость распространения и коэффициент поглощения поперечных волн в полупространстве равны 1446 м/с и 0.02, соответственно. Было показано, что дополнительное усложнение модели грунта, в частности, увеличение числа жидких слоев грунта практически не увеличивает точность описания экспериментальных проходных характеристик точечного излучателя, но существенно усложняет расчеты полей.

4. МОДЕЛЬ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ОБЪЕКТА

Принято, что элементарные эквивалентные источники с комплексными амплитудами a_j расположены вдоль корпуса судна (оси излучателя) с шагом $\lambda/2$, где λ — длина звуковой волны для выбранной частоты. Число эквивалентных источников задается $Q = 2L/\lambda$, где L — размер излучающего объекта по горизонтали.

Будем считать, что реальные и мнимые части комплексных амплитуд каждого из элементарных источников a_j имеют нормальное распределение плотности вероятности, среднее значение равно нулю, а дисперсия соответствует мощности элементарных источников. В рамках такой модели матрица ковариаций элементарных источников с комплексными амплитудами a_j полностью характеризует излучающий объект [20, 25, 26]:

$$A_{jq} = \langle a_j a_q^* \rangle \quad (j, q = 1, \dots, Q). \quad (1)$$

Здесь скобки $\langle \dots \rangle$ обозначают математическое ожидание. Диагональные элементы матрицы A_{qq} соответствуют мощностям элементарных источников. Поскольку положение каждого элементарного источника привязано к определенной точке на корпусе судна, то можно определить распределение интенсивности источников шума непосредственно вдоль корпуса. Недиagonальные элементы матрицы A_{jq} ($j \neq q$) характеризуют комплексные взаимно-корреляционные связи между элементарными источниками — взаимные мощности $|A_{jq}|$ и относительные сдвиги фаз $\xi_{nq} = \arctan[\text{Im}(A_{nq})/\text{Re}(A_{nq})]$. Число действительных параметров A_{jq} , однозначно определяющих модель излучателя, равно Q^2 .

В данной работе последовательно исследуется распределение мощности источников вдоль корпуса судна и характеристики направленности $D(\theta)$, а точнее, угловые распределения мощности излучения суммарного протяженного источника звука в дальней зоне свободного пространства

$$D(\theta) = \sum_{nq} \varphi_n^*(\theta) A_{nq} \varphi_q(\theta),$$

здесь $\varphi_q(\theta) = \exp(jkr_q) \cos(\theta)$, r_q — координаты q -го монополюсного источника на оси судна, угол θ отсчитывается от оси протяженного источника ($r \gg L$).

5. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ РЕАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЗВУКА

Для диагностики протяженного источника звука, модель которого задана в виде элементарных источников, распределенных вдоль корпуса судна, достаточно определить элементы матрицы ковариаций A_{jq} (1). При движении источника предполагается, что за отрезок времени, на котором выполняется узкополосная фильтрация и оценки параметров источников, поле квазистационарное. Основная информация, которая доступна наблюдателю при проведении экспериментальных работ и на которой базируется дальнейшее построение алгоритма для решения обратной задачи, содержится в сигналах $x_m(k)$, измеряемых приемными элементами антенны

$$x_m(k) = \sum_{j=1}^Q a_j \varphi_{jm}(k) + n_m(k), \quad j = 1, \dots, Q, \\ m = 1, \dots, M, \quad k = 1, \dots, K.$$

Здесь k — номер временного отрезка реализации, на котором выполняется узкополосная фильтрация, M — число приемных элементов в антенне,

a_j – комплексные амплитуды элементарных источников, $\Phi_{jm}(k)$ – значения функции Грина для каждой пары: j -й источник – m -й приемник, $n_m(k)$ – комплексная величина аддитивной помехи на m -м приемном элементе. Реальная и мнимая части помехи – случайные величины, распределенные по нормальному закону (n) со средним значением, равным нулю, и дисперсией, равной мощности шума N .

При разработке алгоритма для решения обратной задачи учитывалось следующее. Во-первых, отсутствует и не используется какая-либо априорная информация относительно вида ковариационной матрицы источника A_{jq} . Во-вторых, минимальная дистанция между приемной антенной и источником меньше границы дальней зоны источника и антенны во всем диапазоне частот. Как следствие, при нахождении источника в определенной точке на траектории движения функция Грина зависит от относительных координат излучающего судна и различается для каждой пары приемников и элементарных источников. Принимая во внимание очевидную связь между матрицей ковариаций регистрируемых антенной сигналов Φ и матрицей ковариаций источника A , получаем систему уравнений для оценки элементов матрицы ковариаций A_{jq} :

$$\Phi(k) = B^*(k)AB(k) + N(k), \quad (2)$$

где через B обозначена матрица с элементами $B = [\Phi_{jm}]$. Поскольку Φ – эрмитова матрица ($\Phi_{lm}(k) = \Phi_{ml}^*(k)$), то в каждой k -й временной приемной точке систему уравнений (2) можно записать в виде M^2 действительных уравнений, что в общем случае позволяет найти M^2 неизвестных параметров. При движении источника для упрощения решения систему уравнений (2) можно записать по K интервалам наблюдений (некогерентное накопление по пространству) и тогда размерность системы уравнений при использовании только диагональных элементов матрицы Φ_{mm} равна MK .

Система уравнений (2) является статистически переопределенной и решается методом наименьших квадратов для каждой спектральной составляющей комплексного спектра, полученного после Фурье-преобразования входных сигналов, $A = (B^*B)^{-1}\Phi$. Матрица помех $N(k)$, входящая в систему уравнений (2), может быть измерена экспериментально до выполнения измерений или включена в число неизвестных – искомым параметров. В последнем случае должна быть известной структура матрицы помех, а в число неизвестных включаются параметры этой матрицы. Для изотропного поля помех, например, шумов

моря, матрица единичная, и помеха полностью определяется неизвестной мощностью.

Таким образом, для экспериментальной реализации предложенной технологии обработки экспериментальных данных, на основе которой формируется алгоритм (2), необходимо выполнить определенные условия и технические требования:

- взаимное геометрическое расположение элементов приемной антенны и элементов движущегося многопараметрического источника непрерывно измеряется и известно в каждый момент времени;
- гидрофизические характеристики волновода известны и имеется адекватная модель ПФВ, построенная по результатам акустической калибровки;
- геометрия антенны и относительные амплитудно-фазовые характеристики всех приемных каналов антенны известны;
- ковариационная матрица помех в данном частном случае не учитывается ввиду большого отношения сигнал/помеха на входе приемных каналов;
- скорость движения источника достаточно мала, чтобы можно было пренебречь эффектом Доплера, вызывающим трансформацию спектральной плотности мощности внутри узких частотных полос для длинных реализаций сигналов.

Покажем, что использование перечисленных выше исходных данных позволяет решить обратную задачу и оценить характеристики эквивалентных источников, в сумме замещающих звуковое поле, излучаемое судном¹.

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ ПОЛЯ, ИЗЛУЧАЕМОГО НАДВОДНЫМ СУДНОМ

6.1. Размещение звуковых источников вдоль корпуса судна

Исследование характеристик излучения надводным судном выполнено при движении с одинаковой скоростью источника по четырем галсам, геометрическое положение которых относительно приемной антенны представлено на рис. 3. Направления движения источника на рис. 3 обозначены стрелками, а временные отрезки, на которых выполнялась обработка сигналов, соответствуют участкам галсов, выделенных жирной линией.

При анализе спектров с полосой $\Delta f = 3$ Гц сигналов от движущегося источника на некоторых частотах, например, 70 и 85 Гц (рис. 4) обнаруже-

¹ Вопрос о путях решения поставленной задачи для малозумных источников требует специального дополнительного рассмотрения.

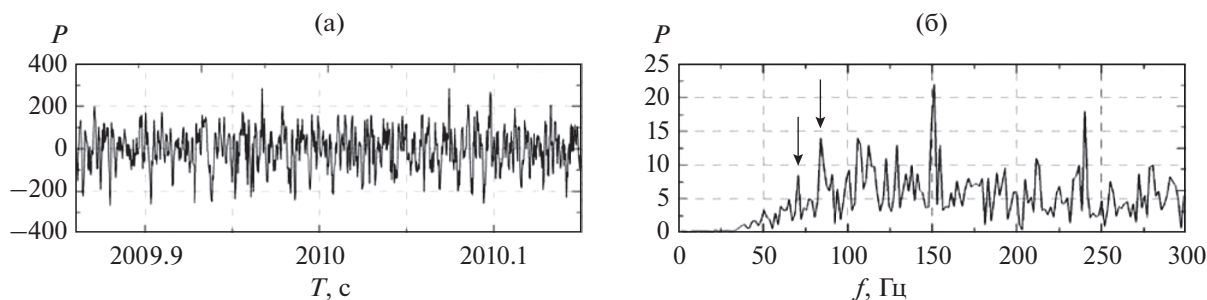


Рис. 4. (а) – Временная реализация сигнала и (б) – спектр сигнала в среднечастотном диапазоне.

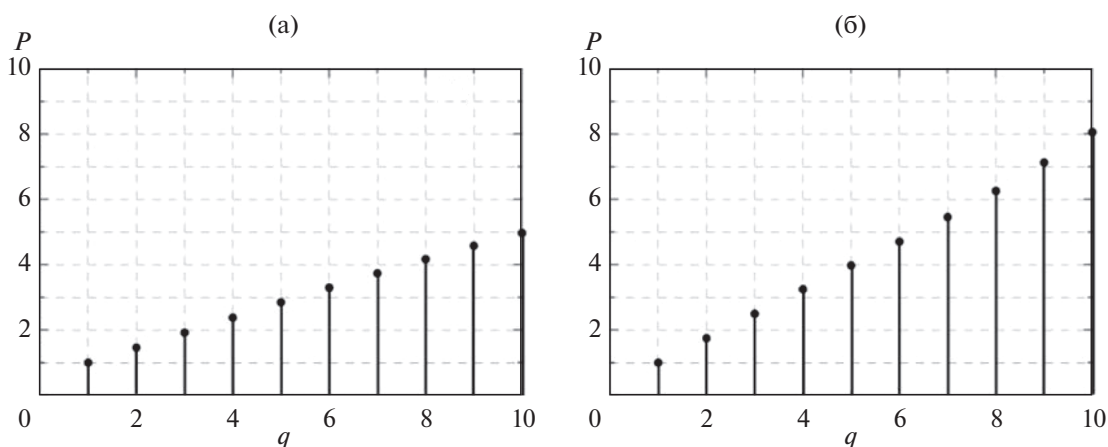


Рис. 5. Распределения мощности излучения по корпусу судна на частотах (а) 70 и (б) 85 Гц.

ны дискретные составляющие (показаны стрелками). На этих частотах наблюдается достаточно устойчивое превышение сигнала при движении источника по всем галсам. Наблюдаются дискреты и на других – более высоких частотах (150 и 240 Гц), но их пространственные интерференционные поля более изрезанные и проявились не на всех участках галсов. Поэтому далее в обработку приняты сигналы на частотах 70 и 85 Гц. Узкополосная фильтрация выполнялась на сравнительно малых временных отрезках длиной 0.3 с, для которых геометрическое расположение источника и приемника можно полагать стационарным.

Для данного судна, длина которого составляла около 80 м, модель источника задавалась в виде 10 monopольных источников, распределенных эквидистантно через $d = 8$ м ($d < \lambda/2$). Первый и последний излучатели располагались на расстояниях 5 м от носа и кормы, соответственно. Эффективная глубина излучения судном полагалась равной 6 м (это соответствует заглублению оси гребного винта). На рис. 5 приведены результаты оценки значений диагональных элементов матрицы ковариаций A_{qq} в зависимости от номера элементарного источника q . Данная зависимость соответствует распределению мощности элементарных

источников вдоль корпуса судна ($q = 1$ соответствует источнику, находящемуся в носовой части корпуса, $q = 10$ – кормовому источнику). При расчетах выполнены осреднение оценок мощности по всем четырем галсам и нормировка полученных значений на мощность, соответствующую первому элементарному источнику, расположенному в носовой части корпуса судна.

6.2. Оценка характеристик направленности излучаемого поля

Рассмотрим далее пересчитанные для свободного пространства характеристики направленности в полярной и декартовой системе координат. На рис. 6 представлены результаты, рассчитанные по одному галсу и отдельно для каждого модуля, при этом система уравнений (2) решается с использованием 400 независимых уравнений. При скорости движения судна около 2 м/с длина траектории примерно равна 800 м. При использовании всех четырех приемных элементов антенны на одном галсе статистически переопределенная система (2) состоит из 1600 уравнений. Полученные для этого случая усредненные результаты при движении по различным галсам представле-

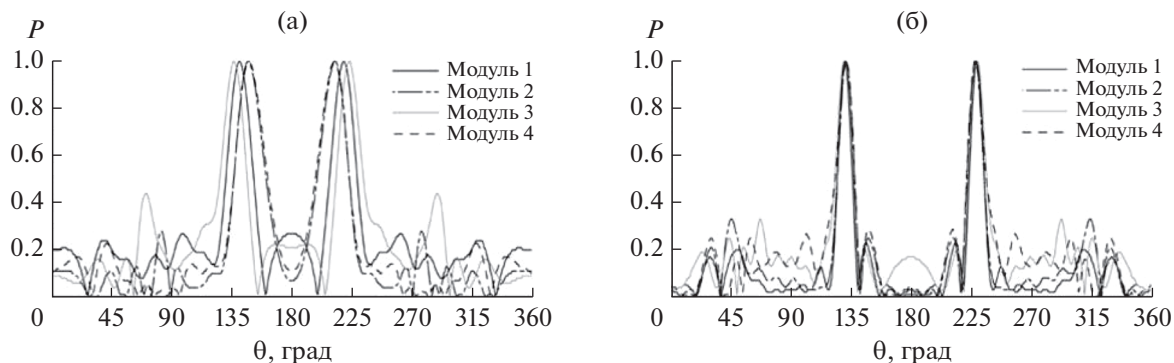


Рис. 6. Характеристики направленности надводного судна, рассчитанные при одновременном измерении сигнала на различных модулях и при движении источника по одному галсу, частоты (а) 70 и (б) 85 Гц.

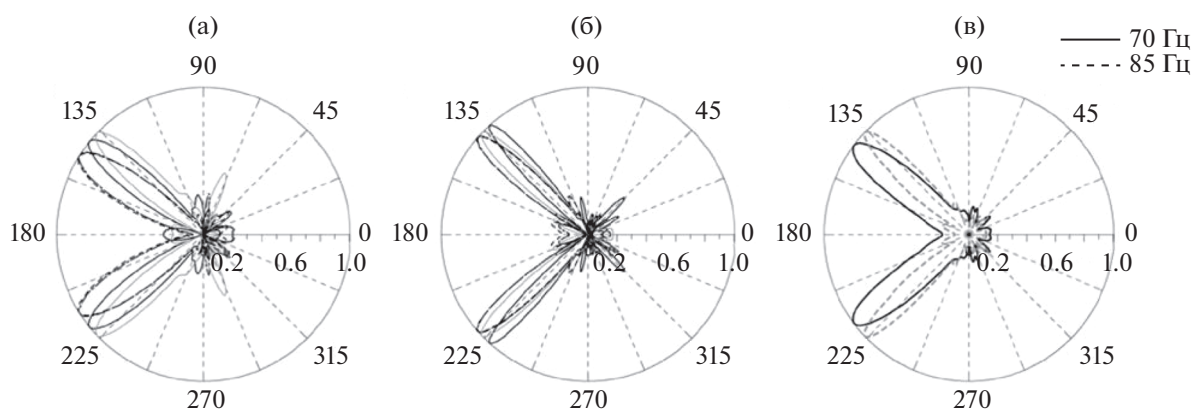


Рис. 7. Характеристики направленности надводного судна, рассчитанные на частотах (а) 70, (б) 85 Гц и (в) при измерении сигнала по всем модулям и на различных галсах. Характеристики направленности рассчитаны при измерении и усреднении сигналов по всем модулям и всем галсам, в том числе, по сигналам, зарегистрированным с левого и правого борта (частоты 70 и 85 Гц). Ноль градусов соответствует направлению излучения “в нос”, а 180° — “в корму”.

ны на рис. 7а, 7б. На рис. 7в представлены результаты при использовании всех модулей и всех галсов. Система содержит 6400 ($4 \times 4 \times 400$) уравнений, которые получены по 4 галсам, 4 приемным элементам и 400 временным отрезкам при движении источника по каждой из траекторий.

Из результатов расчетов следует, что разброс характеристик направленности по разным модулям, но на одном галсе (см. рис. 6, 7) меньше, чем при расчетах характеристик направленности с использованием нескольких галсов, выполненных в различных направлениях. Наиболее вероятная причина — не идентичность реальных передаточных функций, изменяющих свойства сигнала на различных участках района измерений, или неточность оценки расстояний от источника (судна) до приемных модулей.

Из представленных результатов видно также, что мощность распределенных вдоль корпуса эквивалентных источников возрастает при приближении к корме, что представляется естественным

в связи с режимом обтекания гребного винта неоднородным потоком, характерным для надводных судов. Вибрации оболочки корпуса при удалении от зоны источника (кормы) ослабевают. Двухфазная пелена, стелящаяся вдоль двух бортов, поглощает сигналы, распространяющиеся вдоль корпуса от гребного винта в носовых аспектах. Пузырьковый кильватерный след экранирует кормовую оконечность судна с гребным винтом и поглощает сигналы, распространяющиеся строго в кормовом направлении.

Можно также заметить, что с повышением частоты ширина характеристики направленности уменьшается (см. рис. 6, 7), что является характерным для любой антенны, в частности, протяженной оболочки корпуса судна, возбуждаемой мощными источниками гидродинамических пульсаций и вибраций, расположенными в зоне кормы. Значимость корпуса, как источника направленного шумоизлучения, можно объяснить заметным увеличением апертуры и сопротивления излучения корпусом по сравнению с анало-

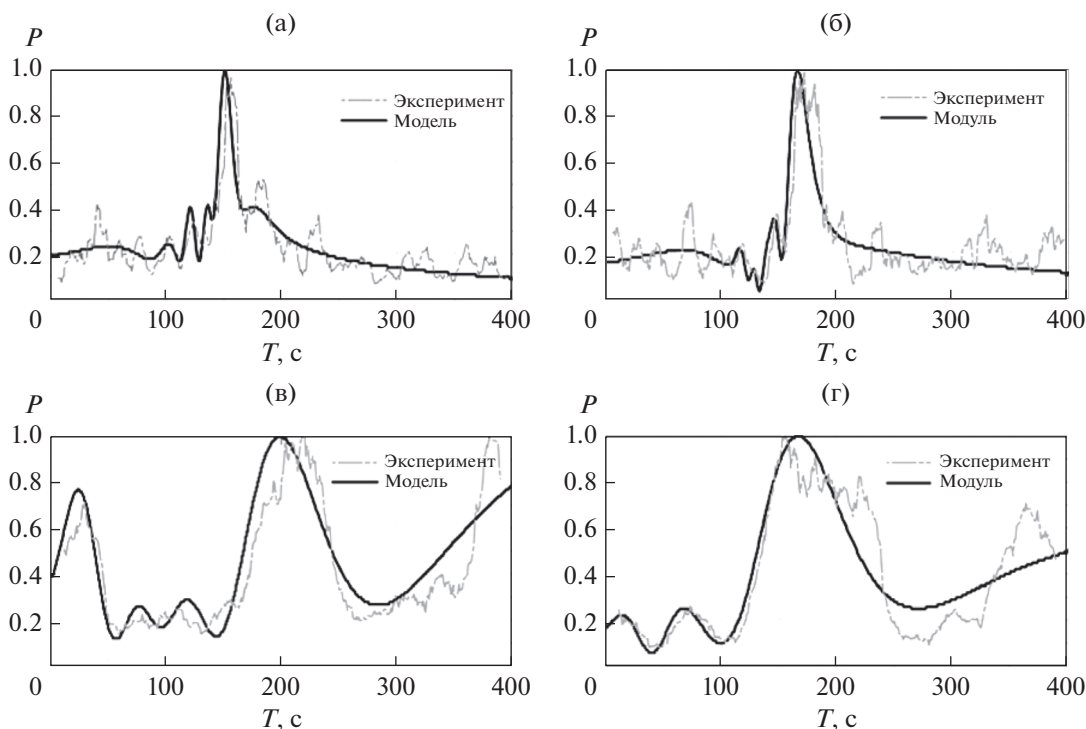


Рис. 8. Экспериментально измеренные и теоретически рассчитанные характеристики прохода при движении источника: (а) галс 1-й, модуль 1, частота 70 Гц; (б) галс 1-й, модуль 1, частота 85 Гц; (в) галс 3-й, модуль 2, частота 85 Гц; (г) галс 3-й, модуль 3, частота 85 Гц.

гичными характеристиками излучающей зоны, примыкающей к корме.

Сравнение характеристик направленности, рассчитанных на основе проходных характеристик с использованием ПФВ и линейной модели антенны с дискретными излучателями, показывает их хорошее согласие с известными экспериментальными данными. Например, в [6, 9–12] приведены данные об увеличении шума, излучаемого на низких частотах в корму, на 20 дБ и более. Увеличение собственного шумового поля корабля в кормовых аспектах отмечается и в [2]. В частности, в [2] автор отмечает: “собственные шумы практически ... не зависели от пеленга в носовых углах, но резко возрастали, когда приемная антенна поворачивалась в направлении кормы”. Приведенные в настоящей статье характеристики направленности хорошо согласуются и с результатами, представленными в [9, 12–15], согласно которым для различных типов коммерческих судов наблюдается заметное уменьшение уровня шумоизлучения в носовых аспектах и непосредственно в направлении кормы, но обнаружено резкое увеличение звуковых сигналов в направлениях, примыкающих к кормовым аспектам (аналогично рис. 6 и 7).

Представленные выше ссылки обосновывают “качественное” согласие полученных нами экспериментальных данных и известных экспери-

ментальных результатов. Для получения “количественного” согласия необходимо выполнить дополнительную обработку. А именно, сравнить вдоль траектории движения реальную экспериментальную характеристику прохода судна с расчетной, полученной с использованием разработанной модели ковариационной матрицы, характеризующей источника шумоизлучения, и известной передаточной функции в волноводе для изменяющихся во времени и контролируемых расстояний. Результаты сравнения представлены на рис. 8. На рисунке видно, что для двух частот местоположение главных максимумов и ширина зон с повышенными уровнями ЗД – рассчитанные и измеренные – практически совпадают. При этом совпадение наблюдается на всех четырех модулях и на всех галсах.

Выполненное сравнение характеристик прохода, измеренных экспериментально и восстановленных с использованием найденных оценок взаимно ковариационной матрицы, позволяет судить о точности решения обратной задачи, включающей оценку параметров источников, оценку текущих значений расстояний до каждого приемного модуля и использование передаточной функции волновода, построенной в результате акустической калибровки района установки.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена задача построения модели направленного шумоизлучения надводным судном в виде линейной суперпозиции эквивалентных источников, которые совместно должны создавать в дальней зоне волновода звуковое поле, аналогичное по направленности и кривым прохода реальному звуковому полю от надводного судна, движущегося по прямолинейным галсам. Для этой цели разработана и прошла экспериментальную проверку многоэтапная технология решения последовательности обратных задач:

- оценка геометрии антенны после морской постановки и непрерывное измерение расстояний от движущегося надводного судна до каждого приемника антенны;

- акустическая калибровка (идентификация) модели грунта и построение адекватной передаточной функции волновода;

- оценка ковариационной матрицы сигнала для построения многопараметрической модели протяженного излучателя;

- расчет характеристик направленности шумового поля, приведенных к свободному пространству;

- сравнение экспериментально измеренных характеристик прохода с рассчитанными с использованием эквивалентной модели шумового поля надводного судна и передаточной функции волновода с учетом непрерывно измеряемых расстояний от источника до каждого из приемников.

В результате получены распределения вдоль корпуса судна мощности локальных источников и их взаимно-ковариационные связи, а также приведенные к свободному пространству оценки характеристик направленности излучения. Установлено, что оценки имеют малые дисперсии и устойчивы (повторяются) на различных галсах и на сигналах от различных приемных элементов. На этой основе разработанная технология рекомендуется для использования при создании методики оценки приведенной шумности и расчета характеристик направленности в дальней зоне движущихся реальных источников в мелком море. Следует, однако, отметить, что при использовании модели с линейным расположением излучателей монополюсного типа характеристика направленности эквивалентного протяженного источника обладает цилиндрической симметрией, что в общем случае не в полной мере соответствует характеристикам направленности реальных объектов, даже на самых низких частотах [2, 3, 5]. Очевидно, что для учета асимметрии поля в горизонтальной и вертикальной плоскостях необходимо усложнять модель шумоизлучения и учитывать в качестве дополнительных источников диполи и квадрупольные [20–24]. Или, как другой вариант, необходимо задавать объемное распре-

деление монополюсных источников. Отсюда следует, что модель источника и алгоритм обработки необходимо дорабатывать. Тем не менее, в первом приближении, как показали эксперименты, разработанную в статье технологию можно использовать для построения модели реального протяженного источника, поскольку она учитывает практически все необходимые для решения задачи функции влияния.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы “Акустика мелкого моря, нелинейная акустическая диагностика, нелинейная динамика волн” (номер гос. регистрации АААА-А18-118021390174-1), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-00941) и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 0852-2020-0015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Horton J.W.* Fundamentals of Sonar. Annapolis, Maryland: US Naval Inst., 1959. 387 p.
2. *Urick R.J.* Principles of Underwater Sound. McGraw-Hill, 1975. 384 p.
3. *Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В.* Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004. 410 с.
4. *Красовский П.А., Цыганков С.Г., Теверовский Г.В.* Проблема измерения гидроакустических характеристик морских объектов // Новый оборонный заказ. 2010. № 3(10).
5. *Теверовский В.И., Цыганков С.Г.* Новые подходы и современные методы в измерениях гидроакустических морских объектов // Альманах современной метрологии. 2014. № 1. С. 102–118.
6. *Суворов А.С., Артельный В.В., Артельный П.В., Вьюшкина И.А., Коротин П.И., Шлемов Ю.Ф.* Верификация численной модели в задаче исследования характеристик направленности звукового излучения неоднородных оболочек // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 2. С. 266–272.
7. *Cote O.R., Jr.* The Third Battle: Innovation in the U.S. Navy’s Silent Cold War Struggle With Soviet Submarines / Naval War College Newport Papers. MIT Security Studies Program, 2003. <http://www.usnwc.edu/Publications/Naval-War-College-Press/Newport-Papers/Documents/16-pdf.aspx>
8. *Пархоменко В.Н., Пархоменко В.В.* Снижение шумности отечественных атомных подводных лодок в период с 1965 по 1995 г. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 2. С. 52–58.
9. *Калью В.А., Таровик В.И., Чижев В.Ю.* Уменьшение подводной шумности коммерческих судов – актуальная задача судовой акустики / Сборник трудов XXIV сессии РАО. Саратов, 2011. Т. 2. С. 218–222.
10. *Быков А.С., Законов Ю.И., Майзель А.Б., Коротин П.И., Матвеев А.Л., Салин Б.М., Турчин В.И.* Перспективный подход к решению проблемы контроля параметров акустических полей кораблей в период

- эксплуатации / Метрология гидроакустических измерений. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013. Т. 1. С. 55–57.
11. Кузнецов Г.Н. Проблемы оценки приведенной шумности движущихся объектов в мелком море / Метрология гидроакустических измерений. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013. Т. 1. С. 57–74.
 12. Бармак А.С., Коротин П.И., Салин Б.М., Салин М.Б. Восстановление временной зависимости и параметров сигнала широкополосных протяженных акустических источников в дальней зоне. Часть 2: Восстановление диаграммы направленности движущегося источника // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 1. С. 123–132.
 13. Рутенко А.Н., Гриценко В.А., Ковзель Д.Г., Манульчев Д.С., Фершалов М.Ю. Методика оценки параметров измеренных на Сахалинском шельфе акустических импульсов для многофакторного анализа их влияния на серых китов // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 5. С. 662–674.
 14. McKenna M.F., Ross D., Wiggins S.M., Hildebrand J.A. Underwater radiated noise from modern commercial ships // J. Acoust. Soc. Am. 2012. V. 131. № 1. P. 92–103.
 15. Arveson P.T., Vendittis D.J. Radiated noise characteristics of a modern cargo ship // J. Acoust. Soc. Am. 2000. V. 107. P. 118–129.
 16. Вдовичева Н.К., Турчин В.И., Фикс И.Ш. Реконструкция диаграммы направленности протяженного источника шума по его ближнему полю // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 6. С. 767–774.
 17. Вдовичева Н.К., Турчин В.И., Фикс И.Ш. Реконструкция характеристик протяженных стохастических источников звука // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 6. С. 757–763.
 18. Матвеев А.Л., Коротин П.И., Турчин В.И., Суворов А.С. Реконструкция диаграмм направленности сложных источников с использованием многоэлементной приемной системы в ближнем поле / Труды 10-й Всероссийской конференции “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики” (ГА-2010). Санкт-Петербург, Россия, 25–27 мая 2010 г. СПб.: Наука, 2010. С. 128–131.
 19. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Оценка шумности движущихся источников на основе идентификации акустической модели морского дна // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 6. С. 722–734.
 20. Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Кузнецов Г.Н. Выбор параметров пространственной области наблюдения для оценки приведенной шумности движущегося мультипольного источника звука // Гидроакустика. 2021. Вып. 45(1). С. 10–20.
 21. Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Поле эквивалентного мультипольного составного излучателя в волноводе // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 3. С. 377–385.
 22. Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Аппроксимирующие модели регулярной составляющей инфразвукового поля мультипольных источников в плоском волноводе // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 3. С. 378–390.
 23. Trevorrow M.V., Vasiliev B., Vagle S. Directionality and maneuvering effects on a surface ship underwater acoustic signature // J. Acoust. Soc. Am. 2008. V. 124. № 2. P. 767–778.
 24. Erbe C., McCauley R., McPherson C., Gavrilov A. Underwater noise from offshore oil production vessels // J. Acoust. Soc. Am. 2013. V. 133. № 6. P. EL465–EL470. <https://doi.org/10.1121/1.4802183>
 25. Глебова Г.М., Кузнецов Г.Н. Потенциальная точность оценки направленности излучения протяженного источника с использованием векторно-скалярной антенны // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2020. № 1. С. 2010301.
 26. Glebova G.M., Kuznetsov G.N. Estimating parameters of signal sources and characteristics of noise field by using spatially vector-scalar modules // The Formation of Acoustical Fields in Oceanic Waveguides. Reconstruction of Inhomogeneities in Shallow Water. Nizhny Novgorod: Inst. Appl. Phys. Russ. Acad. Sci., 1998. V. 1. P. 109–137.
 27. Kuznetsov G.N., Alekseev V.I., Glebova G.M. Positioning of horizontal–vertically developed multielement arrays and vector-scalar modules // Phys. Vibr. 2001. V. 9. № 4. P. 235–241.
 28. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Оценка акустических характеристик поверхностных слоев морского дна с использованием четырехкомпонентных векторно-скалярных приемников // Акуст. журн. 2014. Т. 63. № 2. С. 194–202.