

IV. Гидроакустические измерения

УДК 534.322: 534.8: 534.6

**АЛГОРИТМ ТРАЕКТОРНО-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
ФИЛЬТРАЦИИ ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ
ПОДВИЖНЫХ МОРСКИХ ШУМЯЩИХ ОБЪЕКТОВ****Г.И. Лосев**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
losev-ga@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются результаты разработки и применения алгоритма траекторно-пространственной фильтрации, который, используя свойство пространственной избирательности комбинированного гидроакустического (векторного) приёмника, позволил выделить акустические характеристики движущегося источника шумоизлучения для длительного промежутка времени на фоне окружающих фоновых шумов и подавить источники окружающего шумоизлучения, что обеспечивает значительное увеличение точности векторно-фазовых методов определения параметров первичных гидроакустических полей и координат зон излучения подвижных морских шумящих объектов.

Ключевые слова: гидроакустика, подвижные морские шумящие объекты, алгоритмы обработки, комбинированный гидроакустический приёмник.

**DEVELOPMENT OF A TRAJECTORY-SPACE FILTERING
ALGORITHM FOR NOISE EMISSION
FROM MOVING OBJECTS****G.I. Losev**

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
losev-ga@mail.ru

Abstract. The article discusses the results of the development and application of the trajectory-spatial filtering algorithm, which, using the property of spatial selectivity of the combined hydroacoustic (vector) receiver, allowed to isolate the acoustic characteristics of the moving noise source for a long period of time on the background of ambient background noise and suppress the ambient noise sources, which provides a significant increase in accuracy of vector-phase methods to determine the parameters of the primary hydroacoustic fields and coordinates of the radiation zones of mobile marine noisy objects.

Keywords: hydroacoustics, mobile marine noisy objects, processing algorithms, combined hydroacoustic receiver.

Одной из основных задач гидроакустики в настоящее время являются измерение параметров первичных гидроакустических полей и определение координат зон повышенного шумоизлучения подвижных морских шумящих объектов (ПМО) при соотношении сигнал/шум до -10 – -15 дБ. Векторно-фазовые методы измерений благодаря существенному увеличению объёма получаемой

измерительной информации о параметрах гидроакустических полей объектов являются перспективными. Во ФГУП «ВНИИИФТРИ» был разработан ряд методов, обеспечивающих определение координат источников шумоизлучения на корпусе объектов с применением гидроакустических приёмных модулей (ПМ), содержащих комбинированные гидроакустические (векторные) приёмники (КГП) на стояночных и ходовых режимах [1]. Метод поиска источников шумоизлучения ПМО основан на измерении проходных характеристик в заданных полосах частот исследуемых источников шумоизлучения и реперного гидроакустического излучателя, устанавливаемого на корпусе ПМО. Полученные характеристики используются для определения времени прохода источниками траверзов относительно ПМ, из которых, зная положение реперного излучателя по корпусу ПМО, рассчитываются координаты и формы диаграмм направленности источников излучения на корпусе объекта.

Однако точность этих методов в высокой степени зависит от точности определения по спектральным характеристикам частотных диапазонов источников излучений и от точности определения временных моментов траверза относительно ПМ по их проходным характеристикам, что является исключительно сложной задачей в условиях зашумлённых акваторий [2]. Тем не менее существует возможность увеличить точность определения этих характеристик за счёт появления у одиночной системы с КГП свойства пространственной избирательности, что позволяет применять новый класс алгоритмов обработки сигналов. Для увеличения точности определения частотных диапазонов и времён траверзов исследуемых шумящих объектов по их спектральным и проходным характеристикам в условиях зашумлённых акваторий было принято решение разработать алгоритм траекторно-пространственной фильтрации потоков акустической мощности (ПАМ) источников шумоизлучения ПМО, чему и посвящена эта работа.

Алгоритм траекторно-пространственной фильтрации основан на обработке измеренных с помощью КГП трёх взаимно ортогональных компонент вектора колебательной скорости $V(t)$ и поля давления $P(t)$ и рассчитанных из них проекций ПАМ на заданные направления, то есть на прямом измерении потока акустической энергии (мощности), излучаемой источниками ПМО в направлении на КГП. Поток акустической энергии — интеграл по времени от мгновенных значений вектора Умова, то есть

$$E = \int_0^{\tau} P(t)V(t)dt. \quad (1)$$

Тогда, исходя из классических представлений о мощности, поток акустической мощности — это:

$$W = \overline{I(t)} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} I(t)dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P(t)V(t)dt. \quad (2)$$

Поскольку колебания частиц среды происходят в направлении распространения акустической волны, измеренные векторные характеристики сигнала и рассчитанные проекции потоков акустической энергии уже содержат в себе информацию о направлении на источник шумоизлучения. Появление у одиночных точечных приёмных модулей свойства пространственной избирательности позволяет проводить измерения и расчёт ПАМ в выбранных телесных углах, исходящих из приёмной системы и охватывающих объекты измерений при известных траекториях их движения, как показано на рис. 1.

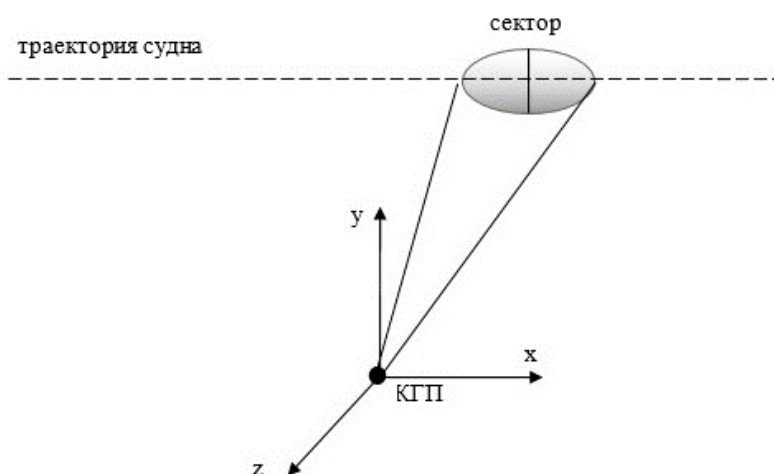


Рис. 1. Измерение ПАМ источника шумоизлучения, движущегося с известной траекторией, в телесном углу, исходящем из приёмной системы

Таким образом, если известно пространственное положение исследуемого ПМО относительно ПМ, возможно задать пространственный сектор для момента времени выборки сигналов t_i . Совокупность этих секторов для моментов времени, отстоящих друг от друга на Δt , образует пространственный контур траектории движения сигнала, который затем можно использовать при расчёте зависимости спектральной мощности сигнала от времени (далее — «сонограмма») и проходных характеристик источников шумоизлучения для единичных выборок. Пространственное положение ПМ относительно ПМО определяется исходя из наблюдений за объектом, по результатам применения сторонних датчиков и приборов определения пространственного положения ПМО, а также по результатам расчёта время-углового распределения (ВУР) ПАМ. С целью уменьшения влияния колебаний приёмной системы на результаты расчёта ВУР ПАМ и определения пространственного положения ПМ предварительно позиционируется по показаниям компаса электронного из его состава в геодезической системе координат [3].

Практическая ценность предлагаемого алгоритма заключается в том, что при измерении потока акустической мощности излучения с выбранного направления происходит значительное подавление шумов, некоррелированных с измеряемыми и приходящих с остальных направлений. При определённых условиях отношение сигнал/шум на выходе измерительного устройства с КГП улучшается вплоть до значений $S/N = -(20...25)$ дБ по сравнению с одиночным гидрофоном. Полученная величина является предельной при измерении потока акустической мощности тонального сигнала, однако для широкополосного локализованного источника теоретический предел выделения его на фоне шумов может достигать значений в $S/N = -(30...40)$ дБ [4].

Рассмотрим последовательность операций алгоритма траекторно-пространственной фильтрации при использовании данных, полученных из графика результатов расчёта ВУР ПАМ источников шумоизлучения.

1. Задаются параметры быстрого преобразования Фурье, такие как время единичной выборки анализируемого сигнала t_0 , частотное разрешение спектра (получаемое исходя из частоты дискретизации сигнала и размера окна БПФ N), сдвиг во времени Δt между соседними обрабатываемыми выборками, телесный угол в плоскости XZ и параметры усреднения результатов расчёта ПАМ.
2. Производится восстановление частотного спектра результатов измерений для взвешенных отрезков сигнала каналов $P(t)$, $V_x(t)$, $V_y(t)$, $V_z(t)$ с применением дискретного преобразования Фурье (ДПФ) на заданной частоте f_i .
3. Для каждой дискретной узкополосной составляющей сигнала с номером q со средней частотой поддиапазона f_i в заданном частотном диапазоне Δf строится массив, состоящий из трёх проекций ПАМ $W_{Rri} = W_{Rr}(t_q, f_i)$ на направление $r = x, y, z$ по формулам:

$$\begin{aligned} W_x(f_i) &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}(P(f_i) \cdot V_x(f_i)); \\ W_y(f_i) &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}(P(f_i) \cdot V_y(f_i)); \\ W_z(f_i) &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}(P(f_i) \cdot V_z(f_i)). \end{aligned} \quad (3)$$

4. В пределах единичной выборки длиной t_0 с номером q для каждого частотного поддиапазона δf_i из анализируемого диапазона Δf определяются азимутальный угол φ_i и полярный ϑ_i угол прихода сигнала по формуле (4) и интенсивность I_i этого сигнала, представляющая значение модуля вектора потока акустической мощности в направлении, определяемом углами φ_i и ϑ_i (5):

$$\varphi_i = \arcsin \frac{W_{Ryi}}{\sqrt{W_{Rxi}^2 + W_{Ryi}^2}} \quad \theta_i = \arccos \frac{W_{Rzi}}{\sqrt{W_{Rxi}^2 + W_{Ryi}^2 + W_{Rzi}^2}}, \quad (4)$$

$$I_i(\varphi_i) = \sqrt{W_{Rxi}^2 + W_{Ryi}^2} \quad \text{или} \quad I_i(\varphi_i, \vartheta_i) = \sqrt{W_{Rxi}^2 + W_{Ryi}^2 + W_{Rzi}^2}. \quad (5)$$

5. Переходят к следующей выборке $(q + 1)$ и повторяют процедуру, получая массив значений $I_{(q+1)}(\varphi_n)$ для следующего момента времени, отстоящего на Δt от предыдущего, а результаты последовательных отсчётов усредняют, получая при достаточно большом времени усреднения распределения $I(\Delta f, \varphi_n)$.
6. Распределение $I(\Delta f, \varphi_n)$ записывается в выходной массив, после чего по временной шкале производится сдвиг по времени с шагом Δt , и повторяются операции по пунктам 2–5 с записью результатов в выходной массив до тех пор, пока не будет достигнут конец записей сигналов КГП. Результат обработки выводится на экран в виде графика ВУР ПАМ (рис. 2).

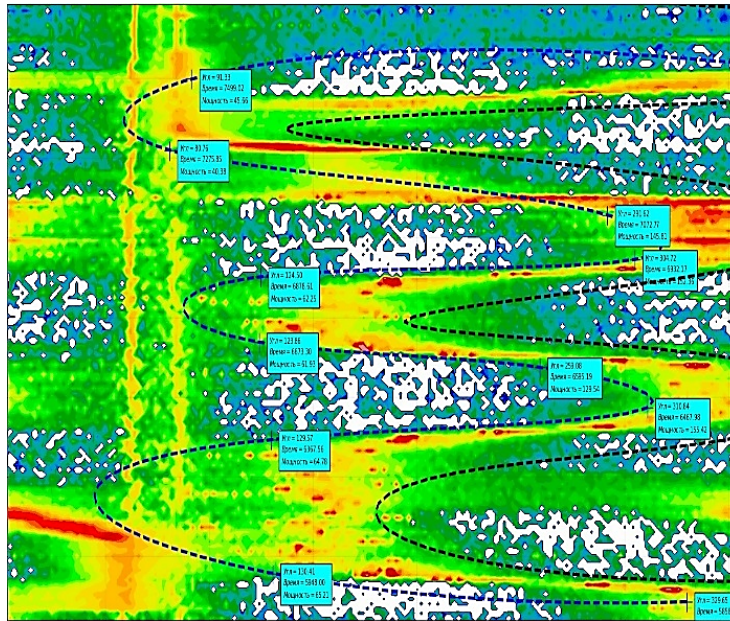


Рис. 2. График ВУР ПАМ, полученный по результатам обработки измерений с КГП-1 в течение одного часа, с построенным на нём пространственным контуром, охватывающим траекторию движения источника шумоизлучения

7. На графике ВУР ПАМ с помощью специализированного программного обеспечения строится пространственный контур, включающий в себя траекторию движения исследуемого источника шумоизлучения. Полученный контур записывается в файл, который используется в качестве входных данных программы при дальнейшей обработке.
8. Для каждой единичной по времени выборки длиной τ рассчитываются значения углов левой и правой границ контура S_i с помощью интерполяции кубическим сплайном по формуле:

$$S_i(\varphi) = a_i + b_i(\varphi - \varphi_i) + c_i(\varphi - \varphi_i)^2 + d_i(\varphi - \varphi_i)^3, \quad (6)$$

где a_i, b_i, c_i, d_i — коэффициенты «естественного» сплайна.

9. Для расчёта спектральных или проходных характеристик источников шумоизлучения производятся операции по пунктам 2–3 при условии, что значение интенсивности сигнала выборки q не равняется 0, значение соответствующего ей азимутального угла φ_i , полученное на этапах 3–5, находится в пределах заданного контура, и значение угла ϑ_i находится в пределах заданного телесного угла плоскости XZ . В противном случае выборка q игнорируется.
10. Производится переход к следующей выборке сигнала, и повторяются операции по пункту 9 до тех пор, пока не будет достигнут конец файлов записей сигналов с КГП. Результат выводится на экран в виде соответствующего графика.

Пространственный контур, построенный на графике ВУР, может быть использован для решения других прикладных задач, например для расчёта скорости движения ПМО. Совместно с алгоритмом траекторно-пространственной фильтрации возможно применение алгоритмов пространственно-частотной фильтрации, описанных в работе [5], для уменьшения влияния нестационарных источников шумоизлучения на результаты расчёта ВУР и увеличения тем самым точности построения пространственного контура, охватывающего траекторию движения исследуемого ПМО.

С целью исследования эффективности разработанного алгоритма траекторно-пространственной фильтрации ПАМ была проведена обработка результатов натурных измерений уровней подводного шумоизлучения рабочего катера, совершавшего в известное время в акватории плановые работы. В устье реки около судна обеспечения (СО), стоявшего на якорю у причала, на глубине был установлен ПМ, состоящий из широкополосного гидрофона, КГП и электронного компаса. Для проверки эффективности алгоритма по корпусу СО были установлены три излучателя. Каждый излучатель имел свои заданную амплитуду и частоту излучения. Был проведён расчёт и построение графика ВУР ПАМ (рис. 2) по результатам измерений КГП, зарегистрированным в течение одного часа. На графике можно наблюдать несколько источников, находящихся в определённом угловом секторе, и один источник, направление излучения которого изменяется с течением времени и мощность излучения которого изменяется по мере приближения и удаления от ПМ. Полученная из графика ВУР траектория движущегося источника была сопоставлена с известной траекторией движения рабочего катера, что показало их полное соответствие. Контур траектории движения катера был выделен на графике ВУР, и точки контура сохранены для передачи алгоритму в качестве входных данных.

Для определения диапазонов частот интересующих нас источников излучения на корпусе рабочего катера и СО был построен график сонограммы результатов измерений КГП-1 в течение часа по каналу датчика давления без применения дополнительных алгоритмов обработки и фильтрации (рис. 3). На графике наблюдаются несколько постоянных источников шумоизлучения

в диапазонах частот, соответствующих диапазонам частот излучателей, и источник шумоизлучения, чья мощность меняется с течением времени, что соответствует движению рабочего катера относительно ПМ. Также наблюдается высокий уровень окружающих фоновых шумов, близкий к уровням излучения отдельных исследуемых источников. Таким образом, по исходному графику определение частотных диапазонов исследуемых источников шумоизлучения представляет собой сложную задачу ввиду высокого уровня окружающих шумов и множества источников.

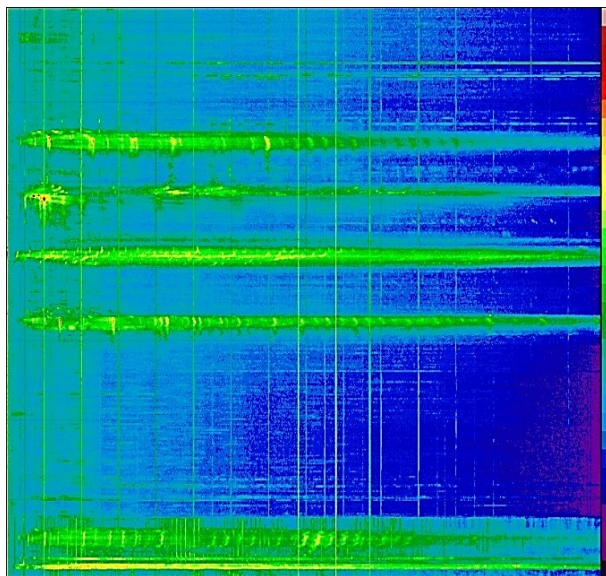


Рис. 3. График сонограммы потока акустической мощности, рассчитанного по результатам измерений КГП-1 без использования алгоритмов обработки

Используя контур траектории движения рабочего катера, построенный на графике ВУР (рис. 2), был произведён расчёт сонограммы ПАМ с применением алгоритма траекторно-пространственной фильтрации (рис. 4). Наблюдается подавление уровней окружающих ненаправленных шумов во всём частотном диапазоне на 5–20 дБ по сравнению с исходным графиком, кроме временных отрезков и частотных диапазонов, вошедших в заданный контур и соответствующих траектории движения рабочего катера. Временные отрезки, соответствующие движению катера, приобрели более чёткие очертания на графике. Также наблюдается полное подавление источников шумоизлучения, установленных на СО, и источников шумоизлучения, связанных с работой внутренних механизмов СО. Показано, что применение алгоритма траекторно-пространственной фильтрации позволяет оптимизировать определение временных и частотных диапазонов шумоизлучения ПМО, что в дальнейшем увеличит точность расчёта их проходных характеристик и диаграмм направленностей.

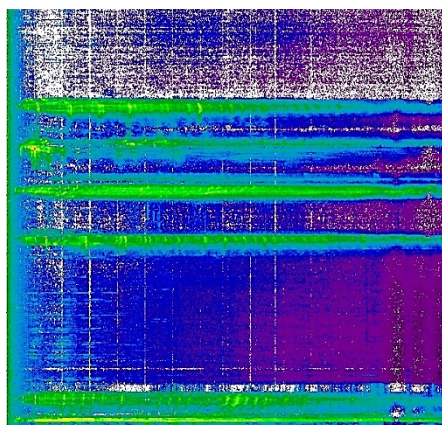


Рис. 4. График сонограммы потока акустической мощности, рассчитанного по результатам измерений КГП-1 с применением алгоритма траекторно-пространственной фильтрации внутри заданного траекторного контура

Альтернативным способом применения алгоритма является расчёт спектральных характеристик источников шумоизлучения вне траекторного контура. Пример такого использования алгоритма показан на результате расчёта сонограммы ПАМ исследуемых записей сигналов с КГП-1 (рис. 5). Алгоритм, как видно из графика, как и на рис. 4, подавил источники окружающего шумоизлучения на 5–20 дБ. При этом были подавлены источники рабочего катера, что позволило выделить уровни стационарных источников шумоизлучения на борту СО.

Полученный результат альтернативного способа применения алгоритма для расчёта спектральных характеристик вне пространственного контура показывает востребованность траекторно-пространственной фильтрации при проведении испытаний на стояночных режимах.

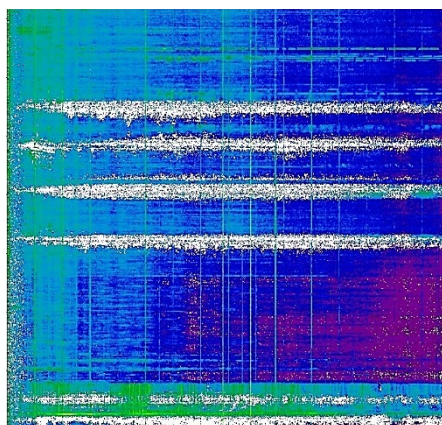


Рис. 5. График потока акустической мощности, рассчитанного по результатам измерений КГП-1 с применением алгоритма траекторно-пространственной фильтрации вне заданного траекторного контура

Используя результаты расчёта спектральных характеристик, приведённые на рис. 4, был выбран частотный диапазон, соответствующий максимальному уровню шумоизлучения рабочего катера. На рис. 6. приведена проходная характеристика источников шумоизлучения в выбранном частотном диапазоне, построенная при усреднении в 9 с по результатам измерений КГП-1 из состава ПМ, установленного в устье реки. Красной линией на графике изображена проходная характеристика, рассчитанная по результатам измерений каналом давления КГП, чёрным — по результатам расчёта ПАМ без применения дополнительной обработки, серым — по результатам расчёта ПАМ с применением алгоритма траекторно-пространственной фильтрации.

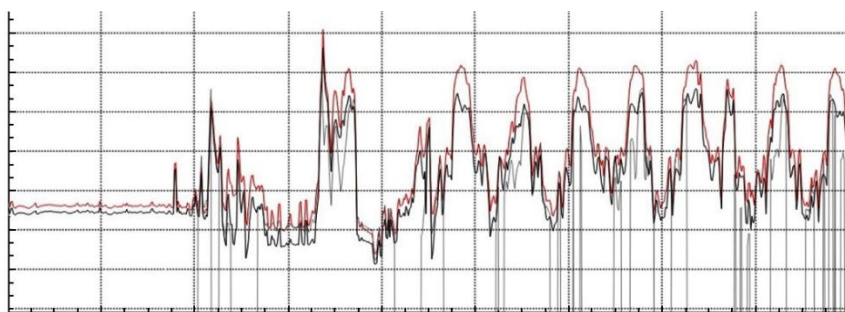


Рис. 6. Проходные характеристики источников шумоизлучения, рассчитанные по результатам измерений КГП-1: — красная — проходная характеристика, полученная по результатам измерения давления; — черная — проходная характеристика, полученная по результатам расчёта ПАМ без применения алгоритмов обработки; — серая — проходная характеристика, полученная по результатам расчёта ПАМ с применением алгоритма траекторно-пространственной фильтрации

Из рисунка можно сделать вывод, что уровни окружающих шумов при расчёте потока акустической мощности на 5–10 дБ ниже, чем при прямом измерении акустического давления с помощью канала гидрофона из состава КГП, при сохранении формы проходной характеристики. Алгоритм траекторно-пространственной фильтрации, использованный при расчёте интенсивности акустической мощности, позволил уменьшить уровни проходной характеристики в отдельные моменты времени, совпадающие с моментами времени отсутствия в выделенном контуре рабочего катера, вплоть до –40 дБ. Также наблюдается заметное уменьшение ширины пиковых значений ПАМ по оси времени на графике, построенном после применения алгоритма, по сравнению со значениями, полученными по результатам измерений с помощью датчика давления в составе КГП-1. Практическая ценность этого результата заключается в увеличении точности определения моментов времени траверса источника шумоизлучения относительно ПМ в выбранных частотных диапазонах, что, в свою очередь, повысит точность определения координат зон излучения на корпусе движущегося объекта и повлияет на результат построения их диаграммы направленности.

Исходя из данных, полученных из графика проходной характеристики суммарной акустической мощности зон излучения без применения дополнительных алгоритмов обработки, была рассчитана диаграмма направленности движущегося шумящего объекта (рис. 7), где красным изображён график для результатов измерений по каналу давления, а синим — график для результатов расчёта ПАМ. На графике видно, что средний уровень шумоизлучения по результатам расчёта ПАМ на 3–5 дБ ниже, чем при использовании данных с датчика давления. В отдельные моменты времени шумоподавление достигает уровня в 10 дБ.

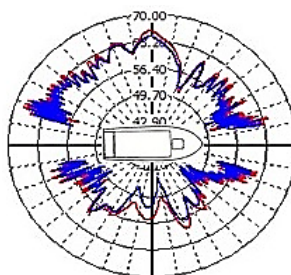


Рис. 7. Результат расчёта диаграмм направленностей зон излучения ПМО в заданной полосе частот по каналу давления (красным) и по потоку акустической мощности (синим) без применения алгоритмов обработки

График диаграммы направленности в этом же частотном диапазоне, построенный исходя из данных на графике проходной характеристики источников шумоизлучения с применением алгоритма траекторно-пространственной фильтрации, представлен на рис. 8. Алгоритм позволил не только подавить отдельные источники шумоизлучения, но и обнаружить явные направленные источники излучений, чьи уровни до применения алгоритма траекторно-пространственной фильтрации лишь на 1–2 дБ отличались от среднего уровня шумов. Также были подавлены отдельные источники шумоизлучения, что особенно видно при движении рабочего катера правым бортом относительно ПМ. После применения алгоритма видно, что основное излучение сконцентрировано в районе носа и кормы ПМО.

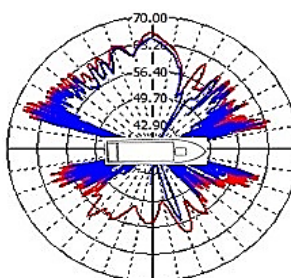


Рис. 8. Результат расчёта диаграмм направленностей зон излучения ПМО в заданной полосе частот по каналу давления (красным) и по потоку акустической мощности (синим) с применением траекторно-пространственной фильтрации

Заключение

В статье была показана перспективность векторно-фазовых методов в задачах измерения параметров первичных гидроакустических полей и определения координат зон повышенного шумоизлучения подвижных морских шумящих объектов за счёт появления новых свойств у приёмной системы с комбинированным гидроакустическим (векторным) приёмником и возможности применять новый класс алгоритмов и методов обработки сигналов. Разработанный алгоритм траекторно-пространственной фильтрации позволил эффективно выделить акустические характеристики движущегося и исследуемого источников шумоизлучения в длительном промежутке времени и подавить уровни окружающих мешающих источников шумоизлучения вплоть до значения –40 дБ. Техническим результатом, полученным от применения алгоритма траекторно-пространственной фильтрации в совокупности с методами векторно-фазовой обработки сигналов, является увеличение точности определения координат источников на корпусе исследуемого объекта в условиях зашумлённых акваторий.

Список литературы

1. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Краснописцев Н.В., Некрасов В.Н. Векторно-фазовые методы и создание перспективных акустических систем нового поколения // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. — 2014. — № 2. — С. 3–21.
2. Иванов В.С., Краснописцев Н.В., Некрасов В.Н. и др. Поиск и оценка мощности излучения источников шума с помощью одиночного комбинированного гидроакустического приёмника // Технические проблемы освоения Мирового океана. — 2015. — Т. 6. — С. 226–230.
3. Лосев Г.И. Векторно-фазовые методы измерений с непрерывным позиционированием измерительных осей векторного приёмника // Метрология в XXI веке: материалы VIII научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и специалистов, Менделеево, 06 февраля 2020 года. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2021. — С. 261–271.
4. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. — М.: Физматлит, 2007. — 480 с.
5. Лосев Г.И., Некрасов В.Н. Векторно-фазовые алгоритмы выделения источников акустического загрязнения на фоне естественных шумов акватории // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2020: сб. статей по материалам Международной научно-практической конференции, Севастополь, 14–17 сентября 2020 г. / под ред. Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук. — Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2020. — С. 333–338.

Статья поступила в редакцию: 23.06.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 23.06.2022 г.

Статья принята в работу: 25.07.2022 г.