

Посвящается светлой памяти
выдающегося гидроакустика и
замечательного человека
К.В. Авилова

УДК 681.883

© К. В. Авилов¹, Е. В. Семенов²

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва
oceanmod@yandex.ru

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА И ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В ПАССИВНОМ РЕЖИМЕ С УЧЕТОМ ОПЕРАТИВНЫХ ДАННЫХ О МОРСКОЙ СРЕДЕ

Статья поступила в редакцию 16.12.2018, после доработки 07.08.2019

Основными средствами освещения подводной обстановки продолжают оставаться гидроакустические системы, обнаруживающие и оценивающие параметры подводных источников звука. Рассмотрена естественная первичная обработка гидроакустических полей, включающая процедуру согласования со средой и представляющая собой оценку отношения правдоподобия в каждой точке области обзора. Приводится пример реализации естественной обработки на основе лучевой модели по экспериментально зарегистрированным сигналам на горизонтальной протяженной буксируемой антенне, имеющей 48 приёмников и длину около 100 м. При обработке используется вся практически доступная информация о морской среде и помеховой обстановке. Показано, что учет искажения гидроакустических сигналов при их распространении в неоднородной морской среде позволяет существенно увеличить эффективность гидроакустических систем.

Алгоритмы расчёта сигналов, помех, обнаружения и оценки дальности действия гидроакустических систем пассивного режима реализованы в численных моделях. Приведено сравнение традиционной и естественной обработки на примере расчёта для модели линейной антенны из 128 ненаправленных приёмников общей длиной 512 м. Естественная первичная обработка решает триединую задачу обнаружения, классификации и оценки координат. Такая обработка вполне реализуема современными средствами при современном уровне обеспечения гидрофизическими и геоакустическими данными.

Ключевые слова: гидроакустические системы, первичная обработка, обнаружение, моделирование.

К. В. Авилов¹, Е. В. Семенов²

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

NUMERICAL MODELS FOR DETECTING UNDERWATER SOUND SOURCES AND ASSESSING THE RANGE OF HYDROACOUSTIC MEANS IN THE PASSIVE MODE BASED ON OPERATIONAL DATA ON THE MARINE ENVIRONMENT

Received 16.12.2018, in final form 07.08.2019

Currently application of hydroacoustic systems, which detect and estimate parameters of underwater sources of sound, still remain the main method of underwater state coverage. We consider native basic processing of hydroacoustic fields, including a procedure which takes sea state into account and gives an estimate of signal likelihood ratio in each point of overview area. An example of the implementation of native processing based on ray model for the case of experimentally

Ссылка для цитирования: Авилов К.В., Семенов Е.В. Численные модели обнаружения подводных источников звука и оценки дальности действия гидроакустических средств в пассивном режиме с учетом оперативных данных о морской среде // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 4. С. 105–111.

For citation: Avilov K. V., Semenov E. V. Numerical models for detecting underwater sound sources and assessing the range of hydroacoustic means in the passive mode based on operational data on the marine environment. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 4, 105–111.

DOI: 10.7868/S2073667319040129

detected signals on horizontally towed antenna with 48 receivers and a length of 100 meters is given. During processing almost all available information on sea state and distortions is used. It is shown that the effectiveness of hydroacoustic systems may be significantly increased if the distortion of signal in heterogeneous fluid is taken into account.

Algorithms for calculation of signals and distortions, detection and estimation of the range of hydroacoustic systems in passive mode have been implemented in numerical models. A comparison with traditionally used processing method in case of linear antenna model with 128 receivers with a total length of 512 meters is performed. Native basic processing solves the problems of detection, classification and coordinates estimation. Such processing may well be implemented by modern means considering the scope of available hydrophysical and hydroacoustical data.

Key words: hydroacoustic systems, basic processing, detection, modeling.

1. Введение

Построение алгоритмов обнаружения подводных источников звука и оценка дальности их обнаружения производится на основе совокупности вычислительных моделей физических явлений, имеющих место при функционировании пассивной системы гидроакустического обнаружения: моделей приемников, модели распространения звука в морской среде и моделей источников, как искомым, так и источников помех.

2. Естественная первичная обработка гидроакустических полей

Обычно поле обнаруживаемого источника является суперпозицией полей элементарных источников различной природы. Некоторые из них – шумы обтекания корпуса и винторулевой группы – связаны с турбулентностью и случайны по своей физической природе. Другие обусловлены достаточно детерминированной работой механизмов или резонансными колебаниями корабельных конструкций, но этих механизмов и конструкций много, у них много неизвестных параметров и переменных режимов работы. В силу этого излучаемый сигнал можно считать случайным процессом. Время мы сразу будем считать дискретным. Тогда случайный процесс – это совокупность наборов случайных отсчётов в различные моменты времени такая, что для любого набора отсчётов известно распределение плотности вероятности. Само распределение плотности вероятности может быть охарактеризовано своими моментами. Простейшая теория (т.н. корреляционная теория случайных процессов [1]) использует для описания случайного процесса только первые два момента. В этом случае из принципа максимальной энтропии [2] следует, что для всех совместных выборок процесса следует принять гауссову плотность вероятности. Источник для простоты будем считать точечным, его излучаемый сигнал $s(t_k)$ – гауссов случайный процесс с нулевым средним и корреляционной матрицей $S(t_k, t_l)$. Если излучение источника стационарно (его режим не зависит от времени или мало меняется на интересующих нас интервалах времени), то корреляционная матрица зависит только от разности времён $S(t_k - t_l)$, т.е. является тёплицевой, в базисе частотного представления является диагональной с элементами $\hat{S}(\omega_k)$ – энергетическим спектром излучаемого сигнала.

Приёмную часть ГАС будем считать состоящей из произвольно расположенных K точечных приёмников давления с пространственными координатами \mathbf{x}_k^r , $k = 1..K$, регистрирующими временные ряды наблюдений $r_k(t_i)$ или, в частотном представлении, $r_k(\omega_j)$.

Сигнал от источника, находящегося в точке с координатами \mathbf{x}^s , распространяется к приёмникам ГАС в морской среде, подвергаясь амплитудным искажениям – затуханию и фазовым искажениям – затягиванию. Влияние морской среды, являющейся линейной системой, полностью описывается пространственным полем импульсных характеристик (функцией Грина) $\mathbf{U}(\mathbf{x}^r, \mathbf{x}^s, t, \tau)$:

$$r_k(\mathbf{x}_k^r, t_i) = \sum_j \mathbf{U}(\mathbf{x}_k^r, \mathbf{x}^s, t_i, \tau_j) s(\mathbf{x}^s, \tau_j). \quad (1)$$

Если свойства морской среды, конфигурацию и параметры излучателей и приёмников можно считать не зависящими от времени, то импульсные характеристики становятся тёплицевыми

$$r_k(\mathbf{x}_k^r, t_i) = \sum_j \mathbf{U}(\mathbf{x}_k^r, \mathbf{x}^s, t_i - \tau_j) s(\mathbf{x}^s, \tau_j) \quad (2)$$

и, в частотном представлении,

$$r_k(\mathbf{x}_k^r, \omega_j) = \mathbf{U}(\mathbf{x}_k^r, \mathbf{x}^s, \omega_j) s(\mathbf{x}^s, \omega_j). \quad (3)$$

Напомним, что в силу определения, в стационарном случае импульсная характеристика есть сигнал в точке приёма от точечного источника, находящегося в точке излучения, излучающего временной δ -импульс. В частотном представлении комплекснозначная функция \mathbf{U} называется передаточной функцией и, в силу теоремы взаимности, передаточные функции от приёмника к источнику и от источника к приёмнику комплексно сопряжены:

$$\mathbf{U}(\mathbf{x}^s, \mathbf{x}_k^r, \omega_j) = \mathbf{U}^*(\mathbf{x}_k^r, \mathbf{x}^s, \omega_j). \quad (4)$$

Если излучаемый сигнал случайный, то и принятые сигналы – случайные. Так как преобразование сигнала при распространении линейное, то принятые сигналы также имеют гауссово распределение плотностей вероятности выборок. Введём обозначение для набора принятых сигналов в частотном представлении в виде вектора-столбца:

$$\mathbf{r}(\omega_j) = \underset{k}{\text{col}}\{r(\mathbf{x}_k^r, \omega_j)\} \quad (5)$$

и такого же вектора-столбца передаточных функций от приёмников к источнику:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}^s, \omega_j) = \underset{k}{\text{col}}\{\mathbf{U}(\mathbf{x}_k^r, \mathbf{x}^s, \omega_j)\}. \quad (6)$$

Легко убедиться путём непосредственного усреднения по ансамблю излучаемого сигнала $\langle \rangle$, что диагональные блоки (для одной частоты) матрицы взаимных спектров выходов приёмников будет иметь вид

$$\langle \mathbf{r} \mathbf{r}^H \rangle = \mathbf{u}^*(\mathbf{x}_s, \omega_j) \hat{S}(\omega_j) \mathbf{u}^+(\mathbf{x}_s, \omega_j), \quad (7)$$

здесь $^+$ – знак транспонирования без комплексного сопряжения, а внедиагональные блоки при достаточно большом времени наблюдения можно считать нулевыми [3].

Кроме сигнала от интересующего нас источника, на приёмники системы воздействуют поля многих других присутствующих в морской среде источников звука, обуславливающих помехи наблюдению: динамические шумы поверхности моря, шумы судоходства, шумы обтекания, шумы носителя и т.п. Все эти источники не коррелированы между собой в силу различного физического происхождения, в силу чего полные матрицы взаимных спектров помехо-сигнальной обстановки получаются путём суммирования вкладов отдельных компонент. Динамические шумы поверхности моря можно представлять себе обусловленными некоррелированными источниками, распределёнными вблизи поверхности [4]. Энергетический спектр этих источников описывается феноменологической моделью обычно в зависимости от установившейся скорости ветра. Матрица взаимных спектров динамических шумов поверхности на приёмниках антенны получается путём численного суммирования вкладов небольших участков поверхности. Эти вклады имеют ту же структуру, что и взаимный спектр полезного сигнала: произведение вектора-столбца передаточных функций морской среды от источника, эквивалентного элементарному участку поверхности, к приёмникам антенны на феноменологический спектр и сопряжённый вектор передаточных функций.

Шумы судоходства разумно представить в виде двух компонент: ближнего и дальнего. Для ближнего будем считать известными расположение шумящих судов и их энергетические спектры. Каждое из них будет вносить аддитивный вклад в матрицы взаимных спектров шумов на приёмниках антенны подобные матрице взаимных спектров полезного сигнала. Дальнее судоходство можно охарактеризовать источниками, распределёнными по трассам судоходства, с известной плотностью

вдоль трасс. Подсчёт вклада во взаимные спектры шумов идейно аналогичен таковому для шума поверхности.

Обозначив $\mathbf{N}(\omega)$ матрицу взаимных спектров мешающих шумов, можно записать главный экспоненциальный член плотности вероятности сигнала из элемента пространственного разрешения, состоящего из полезного сигнала и шума в частотном представлении, в виде:

$$p(\mathbf{r}(\omega_1, \dots, \mathbf{r}(\omega_L))) \approx \exp\left(-1/2 \sum_{l=1}^L \mathbf{r}^H(\omega_l) \left(\mathbf{N}(\omega_l) + \mathbf{u}^*(\mathbf{x}_s, \omega_l) \hat{S}(\omega_l) \mathbf{u}^+(\mathbf{x}_s, \omega_l)\right)^{-1} \mathbf{r}(\omega_l)\right). \quad (8)$$

Во многих смыслах, естественным для гауссовых моделей помехо-сигнальной обстановки методом обнаружения является метод максимального правдоподобия с выбором порога по критерию Неймана—Пирсона. Для сигналов, слабых по сравнению с шумом, логарифм отношения правдоподобия $l(\mathbf{x}_s)$ имеет вид [4—6] (в сокращённой записи):

$$\begin{aligned} l(\mathbf{x}^s) &\approx \left(-\frac{1}{2} \mathbf{r}^{*+} \left((\mathbf{N} + \mathbf{u}^* \mathbf{S} \mathbf{u}^+)^{-1} - \mathbf{N}^{-1} \right) \mathbf{r}\right) \approx \left(\frac{1}{2} \mathbf{r}^{*+} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{u}^* \mathbf{S} \mathbf{u}^+ \mathbf{N}^{-1} \mathbf{r}\right) = \left(\frac{1}{2} \mathbf{S} \left| \mathbf{u}^+ \mathbf{N}^{-1} \mathbf{r} \right|^2\right) = \\ &= \sum_{\omega} \left| \mathbf{u}^+(\mathbf{x}^s, \omega) \sqrt{S(\omega)} \mathbf{N}^{-1}(\omega) \mathbf{r}(\omega) \right|^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, естественная первичная обработка гидроакустических полей, представляющая собой оценку отношения правдоподобия в каждой точке области обзора (элементе пространственного разрешения) в морской среде, заключается в следующем:

1. принятый (полосовой) сигнал нужно подвергнуть пространственно-частотному выбеливанию;
2. взвесить предполагаемой амплитудой источника, получив вектор амплитуд;
3. каждый приёмник заменить на излучатель с вычисленным выше вектором амплитуд и найти поле этого массива излучателей во всех точках области обзора (элементах пространственного разрешения) в морской среде;
4. квадрат модуля этого поля и есть логарифм отношения правдоподобия — статистика обнаружения — выход первичной обработки.

Традиционная первичная обработка (веер характеристик направленности на плоские волны [5, 6]) соответствует, очевидно, передаточной функции однородной безграничной среды с бесконечно удалённым источником. Отличие структуры фактических передаточных функций от их плосковолновой модели (пренебрежение учетом передаточной функцией неоднородной морской среды) и приводит к т.н. проблеме «потери корреляции» на антеннах больших размеров и ухудшению качества обнаружения по сравнению с потенциально достижимой при правильном использовании конструктивной пространственно-временной интерференции принятых сигналов в морской среде. Структура передаточных функций близка к плосковолновой только в ближней зоне освещённости — до первого заворота луча как для глубокого, так и для мелкого моря.

Дальность обнаружения в элементе пространственного разрешения при любой линейной обработке зависит от глубины и курсового угла и определяется при заданном уровне ложных тревог заданным уровнем вероятности правильного обнаружения, являющегося однозначной функцией отношения сигнал/шум [7—9]:

$$SNR = \frac{\sum_{\omega} \left| \mathbf{p}^+(\omega) \sqrt{S_f(\omega)} \mathbf{u}(\mathbf{x}^s, \omega) \right|^2}{\sqrt{\sum_{\omega} \left| \mathbf{p}^+(\omega) \mathbf{N}_f(\omega) \mathbf{p}(\omega) \right|^2}}, \quad (10)$$

здесь \mathbf{N}_f и S_f суть фактические матрицы взаимных спектров шума и энергетический спектр источника, $\mathbf{p}(\mathbf{x}^s, \omega)$ — вектор обработки, который может быть как вектором традиционной обработки $\mathbf{p}(\mathbf{x}^s, \omega) = \text{col}\{i \mathbf{k} \mathbf{n} d_i\}$, где \mathbf{n} — направление от 0-го приемника на источник в горизонтальной плоско-

сти, \mathbf{d}_i – вектор от нулевого приемника к i -му приемнику антенны так и вектором естественной первичной обработки $\mathbf{N}_p^{-1}(\omega)\sqrt{S_p(\omega)}\mathbf{u}(\mathbf{x}^s, \omega)$ (с предполагаемыми характеристиками шума и источника), что позволяет сравнивать эффективность различных обработок. Отметим здесь желательность возможно более точного знания хотя бы фактического энергетического спектра источника. Традиционное уравнение дальности получается из вышеприведенного соотношения приближенной заменой матричных операций на коэффициент концентрации, оцениваемый по плосковолновой обстановке в однородной среде и пренебрежением изменения поля вдоль антенны.

Отметим, что при естественной первичной обработке сразу решается триединая задача обнаружения, классификации и оценки координат, не используются никакие предварительные разложения на лучи или моды, вычисление поля можно производить как волновыми, так и лучевыми методами, для антенн сложных форм, в т. ч. корпусных и конформных. Такая обработка вполне реализуема современными средствами при современном уровне обеспечения гидрофизическими и геоакустическими данными [10–13].

3. Пример естественной первичной обработки экспериментально зарегистрированных акустических сигналов

Приведём пример расчёта на основе лучевой модели по экспериментально зарегистрированным сигналам и практически доступной информации о среде картины выхода первичной обработки, зависящей от пространственных координат, при приеме с курсового 159° горизонтальной протяженной буксируемой антенной, имеющей 48 приёмников на длине около 100 м. На рис. 1 (см. вклейку) представлена картина выхода первичной обработки при различном отношении сигнал/шум. Максимумы на картинах примерно соответствуют положению источника по дистанции и позволяют оценить его глубину.

Заметим, что порог обнаружения для разных элементов пространственного разрешения в морской среде оказывается различным, в связи с чем в качестве индикаторной величины может оказаться удобнее использовать аналог отношения сигнал/шум

$$L(\mathbf{x}_s) = \frac{l(\mathbf{x}_s) - \sum_{\omega} \mathbf{u}^+(\mathbf{x}^s, \omega) S(\omega) \mathbf{N}^{-1}(\omega) \mathbf{u}^*(\mathbf{x}^s, \omega)}{\sqrt{\sum_{\omega} [\mathbf{u}^+(\mathbf{x}^s, \omega) S(\omega) \mathbf{N}^{-1}(\omega) \mathbf{u}^*(\mathbf{x}^s, \omega)]^2}}. \quad (11)$$

Практически обнаружение необходимо осуществлять при недостатке априорных знаний о помехо-сигнальной обстановке, например, об энергетическом спектре обнаруживаемого источника или уровне шума. Однако в значительной степени эта проблема решается применением робастных методов обнаружения (см., например, [14]), приводящих к похожим алгоритмам вычислений.

Гипотеза о стационарности помехо-сигнальной ситуации на практике не выполняется, хотя бы из-за взаимного движения источника и приёмников, однако минимальное время накопления, равное сумме максимальной длины импульсной характеристики и максимального времени пробега сигнала от источника вдоль антенны, как правило, не очень велико, и нестационарность можно учитывать изменением передаточных функций обработки от такта к такту обработки.

4. Естественная первичная обработка модельных сигналов протяжённой линейной антенны

Сравним традиционную и естественную обработки на примере расчёта для модели линейной антенны из 128 ненаправленных приёмников общей длиной 512 м, эквидистантно горизонтально расположенных на глубине 120 м при глубине моря около 300 м. Ниже приведены графики зависимости от расстояния вероятности правильного обнаружения ненаправленного источника звука на фоне динамических шумов поверхности для двух случаев: сигнал в горизонтальной плоскости приходит перпендикулярно к антенне (рис. 2, а) и вдоль неё (рис. 2, б). Модель источника звука приблизительно соответствует подводной лодке типа «Улучшенный Лос-Анджелес», идущей со скоростью 8 узлов на глубине 100 м.

Шум поверхности моделировался путём численного интегрирования вкладов эквивалентных поверхностных источников. Полезный эффект естественной обработки – сохранение дальности обнару-

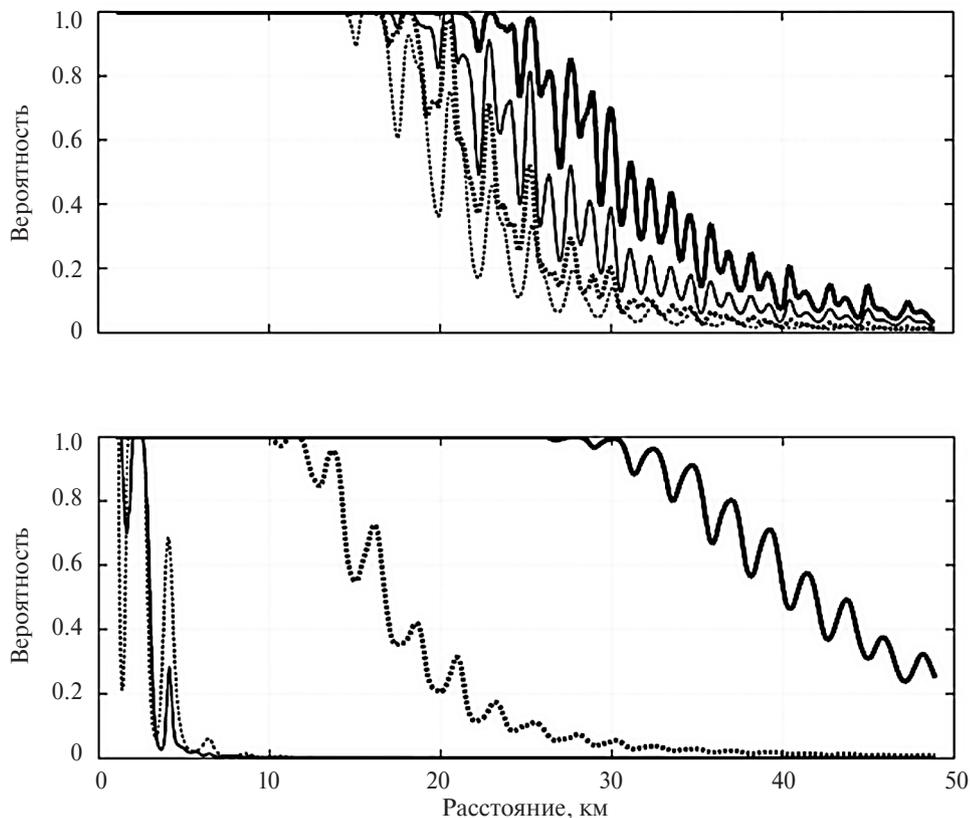


Рис. 2. Вероятность правильного обнаружения.

a – сигнал в горизонтальной плоскости приходит перпендикулярно к антенне; *б* – сигнал в горизонтальной плоскости приходит вдоль антенны.

Толстая сплошная линия – полная естественная первичная обработка, *толстая штриховая линия* – естественная обработка без выбеливания шумов, *тонкая сплошная* – выбеливание шумов и традиционная обработка, *тонкая штриховая* – традиционная обработка без выбеливания шумов.

Fig. 2. The probability of correct detection.

a – the signal in the horizontal plane comes perpendicular to the antenna; *b* – the signal in the horizontal plane comes along the antenna.

Thick solid line – full native basic processing, *thick dashed line* – native processing without noise whitening, *thin solid line* – noise whitening and traditional processing, *thin dashed line* – traditional processing without noise whitening.

ружения при приходе сигнала в горизонтальной плоскости вдоль антенны даже без выбеливания по шумам и рост дистанции обнаружения в 2 раза с выбеливанием.

5. Заключение

Итак, учет искажения гидроакустических сигналов при их распространении в неоднородной морской среде позволяет надежно предсказывать практическую дальность действия ГАС, а применение основанной на таком учете естественной первичной обработки гидроакустических полей позволит существенно увеличить эффективность функционирования ГАС как пассивного, так и активного наблюдения.

Литература

1. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 1. Случайные процессы. Москва: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976.
2. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. М.: Мир, 1974. 503 с.
3. Hodgkiss W.S, Nolte L.W. Covariance between Fourier coefficients representing the time waveforms observed from an array of sensors // J. Acoust. Soc. Am. 1976. V. 59, N 3. P. 582–590.
4. Kewley D.J., Browning D.G., Carey W.M. Low-frequency wind generated ambient noise source levels // J. Acoust. Soc. Am. V. 88, N 4. P. 1894. DOI: 10.1121/1.400212

5. Полканов К.И., Лоскутова Г.В. Пространственно-частотные и частотно-волновые методы описания и обработки гидроакустических полей. С.-Петербург: Наука, 2007. 280 с.
6. Малышкин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Т. 1. Оптимальные методы СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 400 с.
7. Бородин В.В. Качество обнаружения при отсутствии априорного знания о спектральной плотности сигнала // Вопросы судостроения. Серия «Акустика». Вып. 16. ЦНИИ «Румб», 1983.
8. Гусев В.Г. Системы пространственно-временной обработки гидроакустической информации. Л.: Судостроение, 1988.
9. Малышкин Г.С., Холостов М.В. Оптимальное обнаружение пространственно-временных гидроакустических сигналов. Ленинград: Институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов судостроительной промышленности, 1990.
10. Авилов К.В. Современные численные модели звуковых полей в океане и их приложение к решению практических задач гидроакустики // Труды VIII Международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2006. 549 с.
11. Авилов К.В. О численных оценках уровней акустических полей широкополосных источников в морской среде волновым и лучевым методами // Доклады XII школы-семинара им. акад. Л.М. Брежневских, совмещенной с XXI сессией Российского Акустического Общества: М.: ГЕОС, 2009, 486 с.
12. Авилов К.В., Волженский М.Н., Глазов Ю.Е. Необходимость учета передаточной функции морской среды при обнаружении шумовых гидроакустических сигналов // Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2008. 730 с.
13. Авилов К.В., Волженский М.Н., Глазов Ю.Е. Численные модели гидроакустических сигналов и помех и естественная первичная обработка гидроакустических полей // Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2010. 478 с.
14. Богданович В.А., Вострецов А.Г. Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов. 2-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 320 с.

References

1. Rytov S.M. Introduction to statistical radiophysics. Part 1. Random processes. *Glavnaya Redakciya Fiziko-Matematicheskoy Literaturny Izd-va "Nauka"*, 1976.
2. Boks Dzh., Dzhenkins G. Time Series Analysis, Forecast and Management. *M., Mir*, 1974. 503 p.
3. Hodgkiss W., Nolte L. Covariance between Fourier coefficients representing the time waveforms observed from an array of sensors. *J. Acoust. Soc. Am.* 1978, 59, 3, 589.
4. Kewley D.J., Browning D.G., Carey W.M. Low-frequency wind generated ambient noise source levels. *J. Acoust. Soc. Am.* 1990, 88, 4, 1894.
5. Polkanov K.I., Loskutova G.V. Spatial-frequency and frequency-wave methods for the description and processing of sonar fields. *St.-Peterburg, Nauka*, 2007. 238 p.
6. Malyshkin G.S. Optimal and adaptive methods for processing sonar signals. Т. 1. Optimal Methods. *OAO "Koncern "CNII "Elektropribor"*, 2009. 400 p.
7. Borodin V.V. Detection quality in the absence of a priori knowledge of the spectral density of the signal. *Voprosy Sudostroyeniya, Ser. "Akustika"*, vyp. 16, CNII "Rumb", 1983.
8. Gusev V.G. Space-time processing systems for hydroacoustic information. *Leningrad, Sudostroyeniye*, 1988.
9. Malyshkin G.S., Holostov M.V. Optimal detection of spatio-temporal sonar signals. *Leningrad, Institut Povysheniya Kvalifikatsii Rukovodyashchih Rabotnikov i Specialistov Sudostroitel'noj Promyshlennosti*, 1990.
10. Avilov K.V. Modern numerical models of sound fields in the ocean and their application to solving practical problems of hydroacoustics. *IMASH RAN, Moskva, Trudy VIII Mezhdunarodnoj Konferencii Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki. St.-Petersburg, Nauka*, 2006. 549 p.
11. Avilov K.V. On numerical estimates of the levels of the acoustic fields of broadband sources in the marine environment by wave and beam methods. *Doklady XII Shkoly-Seminara im. akad. L.M. Brekhovskiykh. Moskva, Geos*, 2009. 486 p.
12. Avilov K.V., Volzhenskij M.N., Glazov Yu.E. The need to take into account the transfer function of the marine environment when detecting noise hydroacoustic signals. *Trudy IX Vserossijskoj Konferencii "Prikladniye Tekhnologii Gidroakustiki i Gidrofiziki". SPb., Nauka*, 2008. 730 p.
13. Avilov K.V., Volzhenskij M.N., Glazov Yu.E. Numerical models of hydroacoustic signals and interference and natural primary processing of hydroacoustic fields. *Trudy X Vserossijskoj Konferencii "Prikladnye Tekhnologii Gidroakustiki i Gidrofiziki". St.-Petersburg, Nauka*, 2010. 478 p.
14. Bogdanovich V.A., Vostrecov A.G. The theory of sustainable detection, discrimination and signal estimation. 2-nd edition, rev. *Moskva, FIZMATLIT*, 2004. 320 p.

К статье *Авилов К.В., Семенов Е.В.* Численные модели обнаружения подводных источников звука и оценки дальности действия гидроакустических средств в пассивном режиме с учетом оперативных данных о морской среде

Avilov K. V., Semenov E. V. Numerical models for detecting underwater sound sources and assessing the range of hydroacoustic means in the passive mode based on operational data on the marine environment

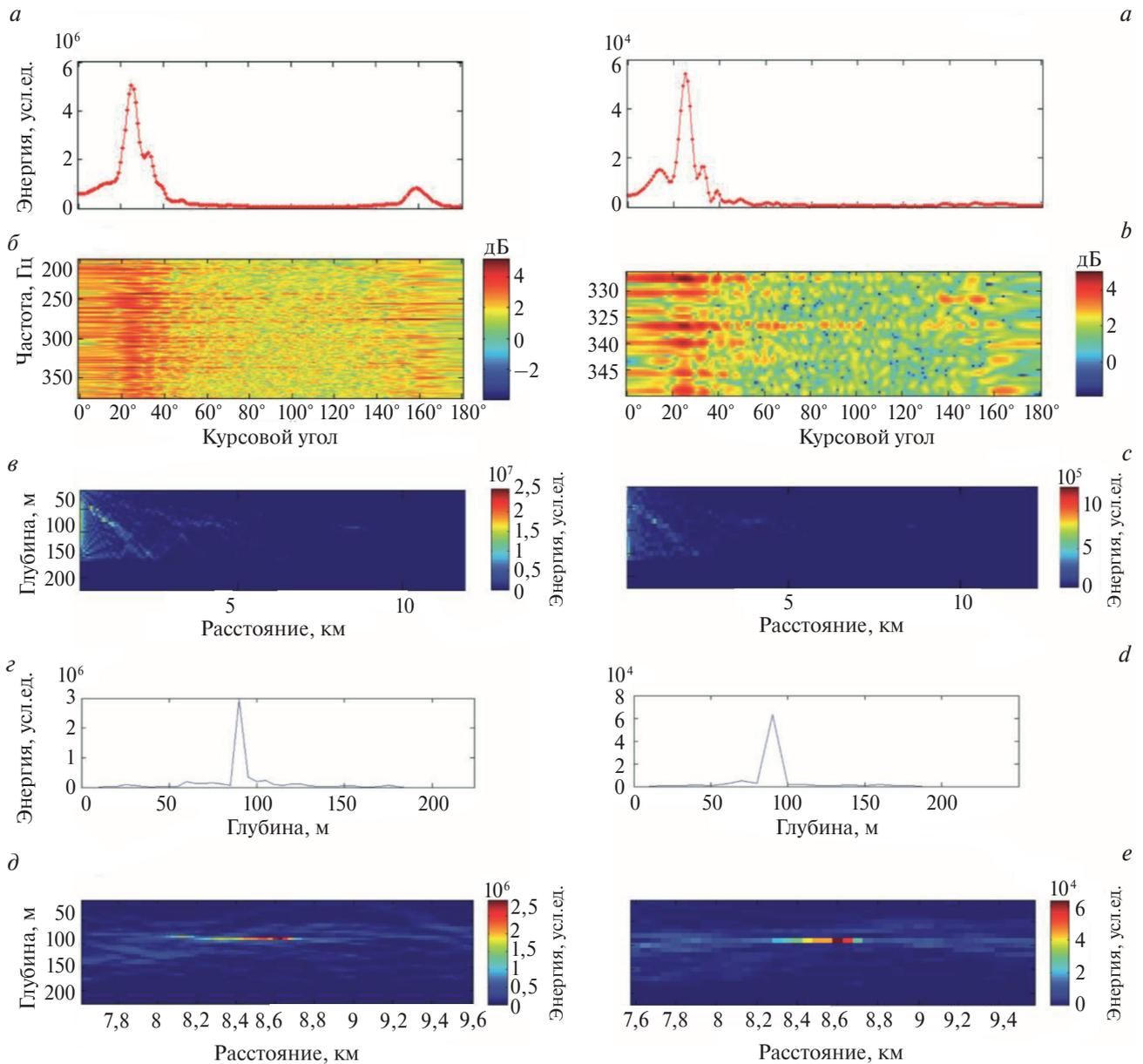


Рис. 1. Картина выхода первичной обработки, зависящая от пространственных координат при большом (левая колонка) и малом (правая колонка) отношении сигнал/шум.

a – кривая обзора в диапазоне углов 0–180 градусов при традиционной обработке, большой максимум на ней – отметка надводного буксировщика; *b* – панорамное представление выхода традиционной обработки; *c* – картина выхода естественной обработки; *d* – сечение картины выхода при заданной дистанции (8.625 км) по глубине; *e* – увеличенное изображение картины окрестности наиболее подходящего максимума.

Fig. 1. The picture of the output of the basic processing, depending on the spatial coordinates with a large (left column) and small (right column) signal-to-noise ratio.

a – viewing curve in the range of angles 0–180° with traditional processing, a large maximum on it is the mark of the surface tow; *b* – panoramic view of the output of traditional processing; *c* – image of the natural processing output, *d* – cross section of the image of the output at a given distance in depth (8.625 km); *e* – enlarged image of a local picture of the most suitable maximum.