

Оценка координат движущегося источника с использованием векторно–скалярной антенны

В. Н. Драченко, Г. Н. Кузнецов,* А. Н. Михнюк

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38

(Статья поступила 07.11.2019; Подписана в печать 08.11.2019)

Приведены и обсуждаются экспериментальные результаты обнаружения и оценки координат стационарного и движущегося по сложной траектории широкополосного источника. Эксперименты выполнены в мелком море. Согласованная фильтрация производилась с использованием лучевой модели волновода. Установлено хорошее согласие полученных экспериментально оценок и исходных данных.

PACS: 43.60.–с

УДК: 534.34; 534.231.1

Ключевые слова: векторно–скалярная антенна, движущийся широкополосный источник, оценка пеленга, дальности и глубины.

ВВЕДЕНИЕ

В целом ряде задач используются буксируемые корабельные или автономные малогабаритные приемные акустические системы. Они должны обладать максимально возможной при заданных ограничениях помехоустойчивостью и иметь возможность оценивать направление на источник, расстояние и глубину источника. Ниже выполняется исследование эффективности применения многоканальной векторно-скалярной антенны (ВСА) и алгоритма согласованной обработки, основанного на применении модели волновода в лучевом представлении. ВСА обеспечивает однозначность целеуказания с одновременным увеличением помехоустойчивости обнаружения. Согласованная с передаточной функцией волновода обработка позволяет выполнять классификацию источников на дальностях обнаружения. Ранее подобные задачи, но для скалярных антенн (СА) и полей, рассматривались в [1–3]. В [3] для решения поставленной задачи применяются не скалярные, а векторно-скалярные поля и показана реальная возможность совместного обнаружения, оценки координат и радиальной скорости источника. При решении задачи учитываются практические рекомендации и волновое представление сигналов, распространяющихся в мелководном плоско-параллельном волноводе [4, 5].

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ АНТЕНН И АЛГОРИТМОВ

Схема экспериментов. Исследования выполнены в мелководном районе глубиной около 90 м. Прием сигналов выполнялся опущенной с борта научного судна на кабеле 96-канальной вертикальной векторно-скалярной антенной цилиндрической формы.

Источник устанавливался стационарно или буксировался на заданной глубине, достигая минимального расстояния на траверзе и удаляясь по прямолинейной траектории. В конце траектории источник буксировался по окружности. Широкополосные сигналы регистрировались и обрабатывались для оценки дальности, глубины и пеленга на источник. Предварительно производился замер профиля скорости звука и анализировался наклон грунта. Принятые сигналы после формирования пространственного отклика и фурье-анализа подвергались корреляционной и кепстральной обработке, что позволило разрешить сигналы, принятые по разным лучам во временной области, и измерить разность задержек. В основе согласованной фильтрации положена минимизация невязки экспериментальных и расчетных значений временных задержек между сигналами, принятыми по разным лучам. Сравниваются оценки пеленга по скалярным, векторно-скалярным полям и по потоку мощности.

Состав ВСА. На рис. 1 приведены фотографии корпуса ВСА. В центре корпуса установлена антенна. В оголовнике располагается электронная аналогово-цифровая аппаратура. В оконечной части корпуса установлены гидрофизический блок (ГФБ) для регистрации глубины, скорости звука и температуры в воде, а также блок ориентации (БО) с магнитным компасом.

Алгоритмы обнаружения и пеленгования. Исходными данными для решения этих задач являются выборки из записей сигналов, полученных приемниками ВСА — матрица S размером $N_e \times N_t$, где N_e — число гидрофонов, N_t — количество отсчетов в выборке. Для сигналов с каждого приемного канала выполняется преобразование Фурье. В итоге получаем матрицу F размером $N_e \times N_w$, содержащую все частоты от 0 до $F_d/2$. Далее для каждой частоты f_n вычисляется вектор компенсации:

$$\varepsilon(\varphi, \chi, f_n) = \exp\left(i \frac{2\pi f_n}{c} (\mathbf{e}^T(\varphi, \chi) \cdot \mathbf{r})\right),$$

где \mathbf{r} — матрица размером $3 \times N_e$, столбцы которой соответствуют координатам приемников ВСА. Отклик

*E-mail: skbmortex@mail.ru



Рис. 1: Фотографии векторно-скалярной антенны с оболочкой. Слева — оголовник, справа — кормовая оконечность. Антенна имеет высоту 145 см, внешний диаметр 18 см

антенны, скомпенсированной в направлении (φ, χ) , вычисляется как:

$$I(\varphi, \chi) = \sum_{n=N_1}^{N_2} |\varepsilon(\varphi, \chi, f_n) \cdot \mathbf{F}_n|^2,$$

где \mathbf{F}_n — столбец номер n матрицы \mathbf{F} ; N_1 и N_2 — номера столбцов матрицы \mathbf{F} соответствующие нижней и верхней частотам рабочей полосы. На последнем этапе обработки значения максимумов отклика $I(\varphi, \chi)$ сравниваются с порогом, и принимается решение об обнаружении цели.

Для пеленгования также вычисляем преобразование Фурье для каждого приемного канала. Далее вычисляем средние спектры на выходе сфазированных вертикальных стержней:

$$G_{sn} = \frac{1}{N_2^s - N_1^s + 1} \sum_{k=N_1^s}^{N_2^s} \varepsilon_k^s(\chi_0, f_n) \cdot F_{kn},$$

где F_{kn} — элемент матрицы \mathbf{F} ; $\varepsilon_k^s(\chi_0, f_n)$ — элемент вектора $\varepsilon^s(\chi_0, f_n)$; N_1^s и N_2^s — номера первого и последнего гидрофонов s -го стержня. В итоге получим систему линейных уравнений, решение которой позволяет получить оценки спектра горизонтальных компонент градиента давления $V_X(f_n)$ и $V_Y(f_n)$. С их использованием произведем оценки пеленга по векторно-скалярным полям. Для этого разделим оценки $V_X(f_n)$ и $V_Y(f_n)$ на спектр звукового давления осевого стержня $G_{1n} = G_1(f_n)$:

$$\tilde{V}_X = \sum_{n=N_1}^{N_2} \frac{V_X(f_n)}{G_{1n}},$$

$$\tilde{V}_Y = \sum_{n=N_1}^{N_2} \frac{V_Y(f_n)}{G_{1n}},$$

$$\hat{\varphi}^{BC} = \arctan 2(\tilde{V}_Y, \tilde{V}_X),$$

где $\arctan 2(y, x)$ — функция для вычисления арктангенса, учитывающая знаки при x и y ; N_1 и N_2 — номера, соответствующие нижней и верхней частотам рабочей полосы, $\hat{\varphi}^{BC}$ — пеленг на источник. Для оценки пеленга по потоку мощности необходимо рассчитать проекции потока мощности на координатные оси:

$$U_X = \sum_{n=1}^{Nt} p(t_n) \cdot v_X(t_n),$$

$$U_Y = \sum_{n=1}^{Nt} p(t_n) \cdot v_Y(t_n)$$

и произвести оценку пеленга:

$$\hat{\varphi}^{PM} = \arctan 2(U_Y, U_X),$$

где $\arctan 2(U_Y, U_X)$ — функция для вычисления арктангенса, учитывающая знаки при переменных U_X и U_Y . В обоих случаях оценки пеленгов получаются однозначными (однонаправленными).

Алгоритм оценки дальности и глубины источника. Для оценки координат источника применяется алгоритм, использующий информацию о разности времен распространения звуковых сигналов по различным лучам. Для их оценки использовались автокорреляционная функция (АКФ) или кепстр непрерывно принимаемых реализаций.

Для оценки дальности и глубины выполнялись: а) расчеты теоретических времен распространения звука вдоль различных лучей применительно к узлам сетки дистанция-глубина и вычислялись времена прихода модельных сигналов $t_1(r, z)$, $t_2(r, z)$, ..., $t_L(r, z)$, где L — количество лучей; б) из полученных времен вычитается время распространения звука вдоль первого луча; в) формируется отклик антенны и производится обнаружение цели и оценка ее пеленга φ_T ; г) отклик компенсируется в направлении цели φ_T ; получаем $K-1$ разностей времен прихода лучей, которые обозначим $\hat{t}_2, \hat{t}_3, \dots, \hat{t}_K$. Формируется невязка измеренных и рассчитанных задержек во времена прихода сигналов вдоль различных лучей:

$$J(r, z) = \frac{1}{K} \sum_{k=2}^K \left(\min_l |\hat{t}_k - t_l(r, z)| \right)^2.$$

Значения r^* и z^* , при которых величина невязки J минимальна, считаются искомыми значениями расстояния до источника и его глубины.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КООРДИНАТ НЕПОДВИЖНОГО ПОГРУЖЕННОГО ИСТОЧНИКА

Глубина постановки ВСА 31 м. Глубина постановки излучателя-имитатора 50 м. По данным GPS расстояние между излучающим и принимающим кораблями —

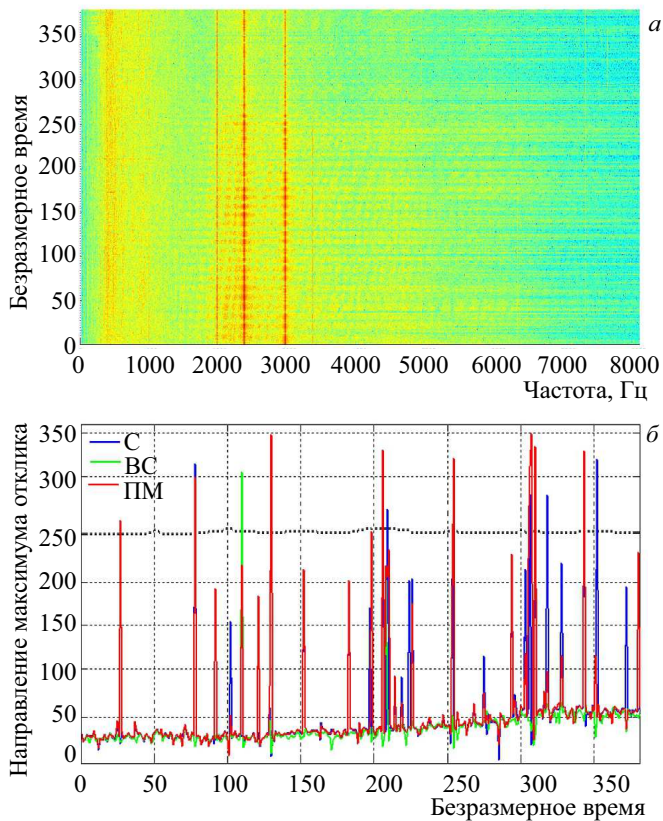


Рис. 2: Зависимости спектрограммы (а) и пеленга (б) ВСА от времени

320 м. Скорость звука не зависит от глубины и равна 1433 м/с. Излучался шумоподобный сигнал в полосе частот 800 – 2550 Гц с замешанными дискретными составляющими: 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 и 3500 Гц. На рис. 2, а приведена интерферограмма (сонограмма), полученная при обработке в диапазоне частот 20–8000 Гц (разрешение 1 Гц): суммарный спектр на выходе ВСА скомпенсирован в направлении на источник. Видно, что дискретные составляющие и интерференционная структура шумового сигнала нестабильны: на всех частотах амплитуды синхронно промодулированы с одинаковым периодом, практически совпадающим с периодом вертикальной качки корабля. При подъеме вверх ВСА ориентировалась вертикально и дает верные оценки пеленга. При опускании она принимает произвольную ориентацию и оценки пеленга становятся случайными. Данный вывод полностью подтверждается показаниями регистрирующих каналов встроенного БО.

На рис. 2, б приведены зависимости от времени пеленгов на источник, полученные при скалярной обработке (синяя кривая), векторно-скалярной обработке (зеленая кривая) и обработке по потоку мощности (красная кривая). Оценки пеленгов, включая случайные отклонения, хорошо согласуются между собой и с данными GPS, установленными на двух судах.

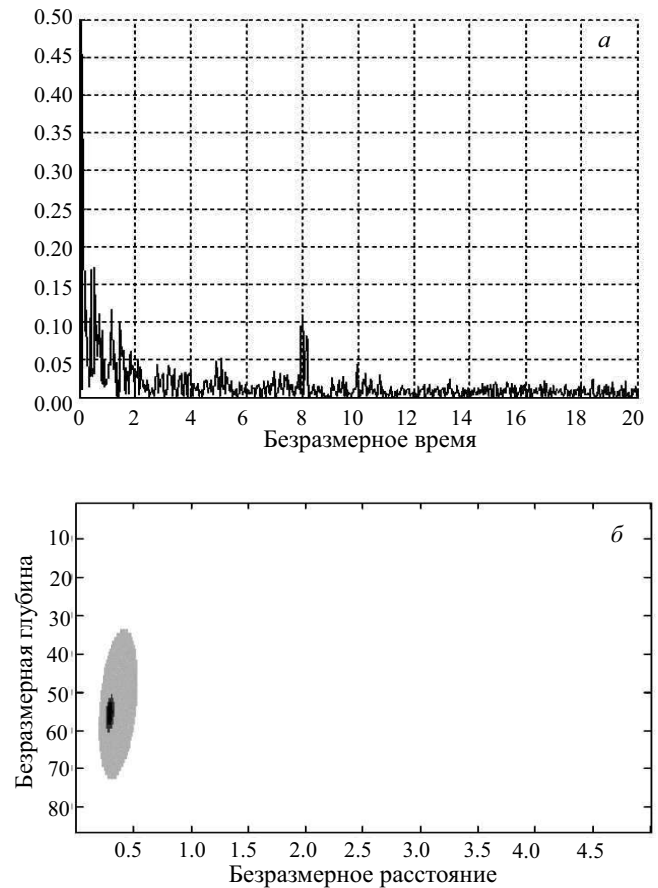


Рис. 3: Кепстр спектра (а) и оценка дальности и глубины (б)

Оценка дистанции до шумящего объекта и его глубины выполнялась в соответствии с алгоритмом, описанным выше.

На рис. 3 для одной из реализаций приведены кепстры (слева) и величина обратная квадратному корню из решающей статистики, по которой оценивается глубина и дистанция до шумящего объекта (справа). Из полученных результатов следует, что оценки дистанции до шумящего объекта (290 – 300 м) и его глубины (55 – 56 м) измеряются стабильно и близки к истинным значениям (320 и 52 м). Отличия измеренных и истинных значений объясняются отклонением антенны от вертикали, как под действием течения, так и из-за вертикальной качки судна-носителя.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КООРДИНАТ БУКСИРУЕМОГО ШУМОВОГО ИСТОЧНИКА

Эксперименты с движущимся имитатором шума проводились в том же районе со смещением во времени на несколько суток. На рис. 4, а приведена интерферограмма (сонограмма), полученная при обработке записи шума в диапазоне частот 20 – 8000 Гц (разрешение 1 Гц). Зависимости направления максимума от-

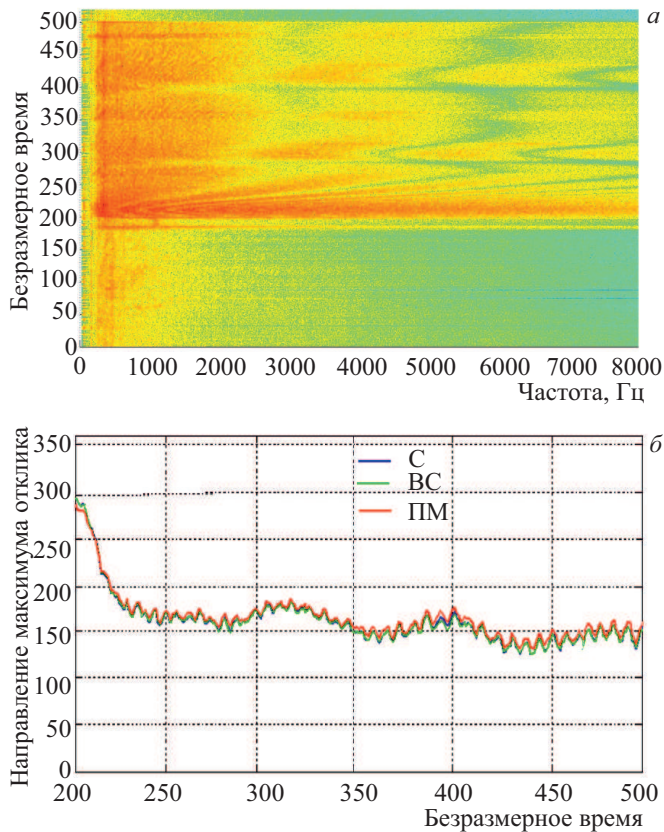


Рис. 4: (а) Зависимость интерферограмм от времени. (б) Оценки пеленга, полученные тремя методами, в том числе периодические мелкокомасштабные вариации

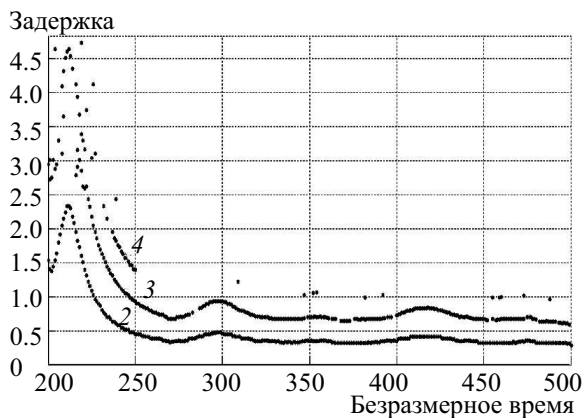


Рис. 5: Задержки между первым и последующими лучами

клика ВСА на источник (пеленга) от времени, вычисленные по скалярным, векторно-скалярным полям и по потоку мощности, приведены на рис. 4, б. Хорошо видны интерференционная структура, формирующаяся при подходе и отходе источника к приемной системе, а также идущие из воды наводки на частотах 50, 100 и 150 Гц. Отметим, что период колебаний пеленга на источник практически совпадает с периодом колебаний, зарегистрированных с использовани-

ем датчика ориентации в горизонтальной плоскости, встроенного в БО.

На рис. 5 приведены оценки задержек времен распространения между первым и последующими лучами, полученные по секундным реализациям данной записи. Видно, что практически во все моменты времени определяются задержки распространения сигнала по второму и третьему лучу относительно первого.

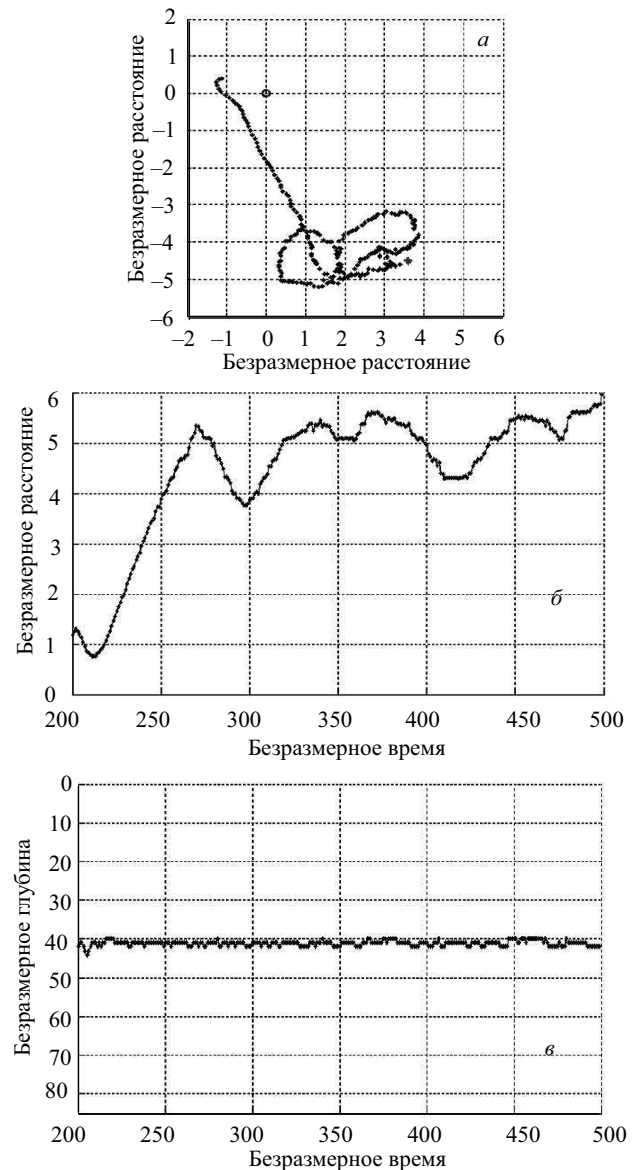


Рис. 6: Траектория движения (а) и локальная точка в координатах «дистанция-глубина» (б). Зависимость дистанции до источника от времени (в)

По полученным задержкам и теоретической модели была решена обратная задача и рассчитана невязка (рис. 6). Это позволило произвести оценку дистанции до шумящего объекта и его глубины и с учетом сглаженного пеленга (рис. 4, б) построить итоговую траекторию движения (рис. 6).

На рис. 6 слева точками изображена траектория движения, построенная при одновременной оценке пеленга и дистанции. На рис. 6 справа приведена величина обратная квадратному корню из решающей статистики, по которой оценивается глубина и дистанция. Приведенные на рис. 4, б и 6 зависимости, полученные по буксируемому источнику, хорошо согласуются между собой, но нуждаются в прямом сличении с исходными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отработана в контролируемых условиях с использованием вертикальной многоэлементной векторно-скалярной антенны технология одновременной оценки в пассивном режиме пеленга, дальности и глубины широкополосного источника — при известных и стационарных координатах расположения приемника и излучателя, характеристиках грунта и известном профиле вертикального распределения скорости звука. Экспериментально показана возможность ре-

шения указанной задачи как при стационарном расположении приемника и излучателя, так и при движущемся источнике. Установлено, что при малых вариациях условий распространения оценка дальности и глубины источника выполняется достаточно устойчиво и практически непрерывно. Оценка пеленга выполняется устойчиво в случае как скалярной, так и векторно-скалярной обработки. В случае применения векторно-скалярной обработки оценка пеленга является «динамическим инвариантом», независимым ни от глубин источников и приемников, ни от расстояния, ни от условий распространения.

Технология оценки координат по движущемуся (буксируемому) источнику отработана при отношении сигнал/помеха, превышающем 10 – 12 дБ. В этом случае оценки координат выполняются с малой дисперсией, но с возможными смещениями относительно истинных координат, которые требуется уточнять. В рамках последующих работ представляется важным также отработать технологию оценки координат источника при малом отношении сигнал/помеха.

- [1] Михнюк А. Н. // Акуст. журн. 2009. **55**, № 3. С. 401.
 [2] Drachenko V. N., Karishnev N. S., Kuznetsov G. N., Mikhnyuk A. N. // Phys. Wave Phenom. 2014. **22**, N 4. P. 287.
 [3] Кузнецов Г. Н., Михнюк А. Н., Полканов К. И., Смир-

- нов Н. М. // Гидроакустика. 2015. **24**, № 4. С. 36.
 [4] Stepanov A. N. // Acoust. Phys. 1996. **42**, N 2. P. 257.
 [5] Kuznetsov G. N., Stepanov A. N. // Acoust. Phys. 2013. **59**. N 3. P. 333.

Estimation of coordinates of a moving source using a vector–scalar antenna

V. N. Drachenko, G. N. Kuznetsov^a, A. N. Mikhnyuk

*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
 Moscow, 119991, Russia
 E-mail: ^askbmortex@mail.ru*

Experimental results of detection and estimation of the coordinates of a stationary and moving along a complex trajectory broadband source are presented and discussed. The experiments were performed in shallow sea. The matched filtration was performed using a ray waveguide model. Good agreement between the experimental estimates and the initial data was found.

PACS: 43.60.-c

Keywords: vector–scalar antenna, moving broadband source, bearing, range and depth estimation.

Received 7 November 2019.

Сведения об авторах

1. Драченко Владимир Николаевич — канд. техн. наук, зав. лаб. прикладной акустики.
2. Кузнецов Геннадий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, начальник СКБ «Морские технологии», профессор; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: skbmortex@mail.ru
3. Михнюк Александр Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник.