

УДК 681.883.024/75

© А. Д. Консон*, А. А. Волкова, 2024

АО «Концерн «Океанприбор», 197376, Чкаловский пр., д. 46., Санкт-Петербург, Россия

*wolkova.aa@yandex.ru

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА ШИРОКОПОЛОСНОГО ШУМОВОГО СИГНАЛА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ В ЗОНЕ ФРЕНЕЛЯ ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ «ВОДА-ВОЗДУХ»

Статья поступила в редакцию 24.08.2023, после доработки 29.01.2024, принята в печать 30.01.2024

Аннотация

Рассмотрены способы приема широкополосного шумового сигнала горизонтальной линейной протяженной антенной в зоне Френеля вблизи границы среды (поверхности), позволяющие одновременно с обнаружением определять направление, расстояние до источника и глубину его погружения. Исследовано явление, возникающее при нахождении источника и приемника сигнала вблизи границы среды вода-воздух, когда от источника к приемнику приходят два луча (прямой и отраженный от поверхности). Оператор компенсации задержек сигнала, приходящего на M приёмников антенны, дает фокусировку приёмной системы в точку предполагаемого расположения источника. При двухлучевом сигнале это может приводить к появлению двух точек фокусировки в пространстве по расстоянию. Показано, что в зависимости от взаимного расположения источника и приемника фокальные пятна могут быть заметно разнесены по расстоянию или практически сливаться. Для первого случая предложен метод расчета глубины погружения источника при известных расстояниях до двух фокальных пятен. Когда фокальные пятна не разделяются, предложен метод консолидированной обработки сигнала, в котором осуществляют дополнительное сканирование временных задержек по возможным запаздываниям сигнала между лучами, при этом задержка единая на всех элементах антенны. Показано, что при получении максимальной мощности сигнала введенное запаздывание будет функционально связано с глубиной погружения источника, что позволяет в предложенном методе осуществлять совместное определение направления, расстояния и глубины погружения источника. Кроме того показано, что метод консолидированной обработки позволяет увеличить мощность принимаемого сигнала в точке максимального отклика до 50 % относительно традиционного алгоритма приема сигнала горизонтальной линейной антенной в зоне Френеля. Исследование проведено методом компьютерного моделирования.

Ключевые слова: гидроакустика, шумопеленгование, зона Френеля, ближняя зона, горизонтальная антенна, консолидированная обработка, расстояние, глубина погружения

UDC 681.883.024/75

© A. D. Konson, A. A. Volkova*, 2024

JSC “Concern “Oceanpribor”, 46 Chkalovsky Prosp., St. Petersburg, 197376, Russia

*wolkova.aa@yandex.ru

BROADBAND NOISE SIGNAL SOURCE POSITIONING METHOD USING FLAT LINEAR ANTENNA IN FRESNEL ZONE NEAR ‘WATER-AIR’ BOUNDARY

Received 24.08.2023, Revised 29.01.2024, Accepted 30.01.2024

Abstract

Ways of broadband noise signal reception using flat linear extended antenna in Fresnel zone near surface boundary enabling to determine direction, range to the source and depth of its immersion simultaneously with detection are considered. The effect emerging when signal source and receiver are located near «water-air» interface and two beams arrive from source to receiver (direct beam and beam reflected from the surface) is investigated. The supervisor of compensation of delays of signal arriving to M receivers of the antenna focuses receiving system in the point of the expected positioning of the source. In case of dual-beam

Ссылка для цитирования: Консон А.Д., Волкова А.А. Метод локализации источника широкополосного шумового сигнала горизонтальной линейной антенной в зоне Френеля вблизи границы «вода-воздух» // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 1. С. 84–94. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-7

For citation: Konson A.D., Volkova A.A. Broadband Noise Signal Source Positioning Method using Flat Linear Antenna in Fresnel Zone near ‘Water-Air’ Boundary. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024, 17, 1, 84–94. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-7

signal it may result in emergence of two range focusing points in space. It is shown that focal spots may have high range spreading or practically merge depending on the relative positioning of the source and the receiver. Method of source submergence depth analysis at known ranges to two focal spots is offered for the first case. Method of consolidated signal processing which includes additional scanning of time delays in possible delays of signal between beams with uniform delay for all antenna elements is offered for the case when focal spots are not separated. It is demonstrated that when obtaining maximum signal power entered delay will be functionally connected with depth of immersion of the source that enables carrying out joint determining of direction, ranges and depths of submergence of the source in offered method. Moreover, it is demonstrated that method of consolidated processing enables to increase power of arriving signal up to 50 % in the point of maximum response as compared to conventional signal reception algorithm using flat linear antenna in Fresnel zone.

Keywords: hydroacoustics, passive listening, Fresnel zone, near-field zone, flat antenna, consolidated processing, range, depth of submergence

1. Введение

Начало теоретических исследований основ и особенностей приёма гидроакустических сигналов в зоне Френеля в целях пассивной гидролокации относится к 1970–90-м годам [1–6] и продолжается до настоящего времени [7–13]. В результате были предложены методы пассивного определения координат источника излучения по кривизне волнового фронта поля источника. Одним из первых методов пассивной гидролокации является «разностно-дальномерный» или метод «определения кривизны волнового фронта» [8]. В основе этого метода лежит предположение о том, что для определения координат центра окружности волнового фронта достаточно измерения сигнала в трех точках с определением разностей времен прихода сигнала от источника к каждому двум парам приемников. Тогда оценки искомых координат (направления и расстояния) можно получить путем расчета по известным геометрическим соотношениям.

В начале 1970-х гг. Шультхайс и др. [1–3] применили алгоритмы оптимальной обработки к задачам обнаружения сигнала источника излучения и определения его координат (направления и дальности) в зоне Френеля по методу максимального отношения правдоподобия на примере линейной M -элементной антенны без ограничений на интервал между приемниками. В результате для определения координат источника излучения одним из основных оказывается оператор компенсации задержек сигнала, приходящего на M приёмников антенны, т. е. фокусировки приёмной системы в точку предполагаемого расположения источника. [10, 11]. Такая обработка сигнала обеспечивает наилучшее отношение сигнал/помеха [14].

В большинстве практических случаев прием широкополосного сигнала осуществляется в полосе частот до единиц килогерц. Тогда, согласно соотношению, определяющему предел зоны Френеля как $r_{\max} = 2L^2 / \lambda$, где L — длина антенны, λ — длина волны, получим протяженность зоны не более порядка 10 км, если длина антенны составляет несколько десятков метров. При этом следует учесть, что практический интерес представляют условия, когда источник и приемник находятся в приповерхностном слое океана на глубинах не более 500–700 м, а глубина океана не менее 1000 м. В этом случае в ближней зоне относительно источника при любом взаимном местоположении к приемнику будут приходить в основном два луча: прямой луч и луч, отраженный от поверхности. При использовании оператора компенсации задержек сигналов, приходящих на M приёмников антенны, логично предположить появление двух точек фокусировки в пространстве — по прямому и отраженному лучам.

Цель работы — провести исследование эффектов пространственной фокусировки при приеме в ближней зоне двухлучевого широкополосного сигнала горизонтальной линейной антенной вблизи верхней границы среды. Кроме того, ставится задача исследовать возможность с помощью горизонтальной линейной протяженной антенны получения совокупно одновременной оценки пеленга, расстояния и глубины погружения источника. Для исследования принят метод компьютерного моделирования.

2. Фокусировка приёмной системы в ближнем поле

В исследовании фокусировки по направлению и расстоянию в ближнем поле используем оператор компенсации задержек сигнала, приходящего на M приёмников горизонтальной линейной дискретной эквидистантной антенны. Для этого воспользуемся выводами, полученными в работах [10, 11, 16]. Основной целью на первом этапе исследований является сравнение результатов фокусировки в безграничном пространстве (однолучевой сигнал) и вблизи границы среды (двухлучевой сигнал). Для модельного эксперимента создадим компьютерный макет, состоящий из двух модулей: модуль имитации поля сигнала в ближней зоне для однолучевого и двухлучевого сигналов (модуль I) и модуль приема и фокусировки сигнала (модуль II). Для сравнительного исследования используем единый алгоритм фокусировки в модуле II.

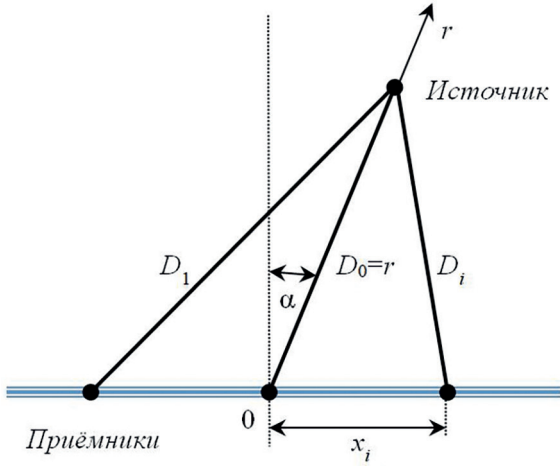


Рис. 1. Геометрическая схема алгоритма фокусировки

Fig. 1. Focusing algorithm geometry

При проведении модельного эксперимента удобно использовать полярную систему координат. Начало системы координат фиксируем в центре приемной антенны, а полярную ось располагаем перпендикулярно к антенне. Схема расположения приемников антенны и источника в полярной системе координат приведена на рис. 1.

На рис. 1 обозначено:

0 — точка начала координат полярной системы;

$[r, \alpha]$ — координаты источника по расстоянию r и азимуту α ;

x_i — координата приёмника номер i по оси, вдоль которой расположены элементы антенны;

D_i — удаленность источника от приёмника номер i .

В схеме рис. 1 для произвольной точки по расстоянию и азимуту $[r, \alpha]$, в которой предположительно может находиться источник сигнала, можно записать удаленность этой точки от каждого из элементов приёмной антенны [16]:

$$D_{rai} = \left(r^2 + x_i^2 - 2rx_i \sin \alpha \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где D_{rai} — удаленность (в горизонтальной плоскости) точки по расстоянию r и азимуту α от приёмника номер i ; x_i — координата приёмника номер i ; $[r, \alpha]$ — точка сетки по расстоянию r и азимуту α ; i — номер элемента приёмной системы.

Далее для каждой точки по расстоянию и азимуту $[r, \alpha]$ можно записать выражение для задержки по времени прихода сигнала на приёмник номер i относительно прихода сигнала на центр приёмной системы (точка 0):

$$\Delta_{rai} = \frac{r - D_{rai}}{C}, \quad (2)$$

где Δ_{rai} — задержка по времени прихода сигнала, распространяющегося из точки $[r, \alpha]$, к приёмнику номер i относительно прихода сигнала к центру приёмной системы (точка 0), которая определяет кривизну фронта волны в ближней зоне; C — скорость звука в среде.

Выражения (1) и (2) являются основными для описания поля сигнала (модуль I).

На основе описания поля сигнала источника, заданного по расстоянию и азимуту $[r, \alpha]$, алгоритм фокусировки антенны осуществляет синфазное сложение сигналов по элементам антенны, задаваясь различными гипотезами о нахождении источника в точках заданной сетки пространства, с оценкой мощности сигнала для каждой точки сетки. В алгоритме (модуль II) используем процедуры сдвига сигнала для каждого элемента антенны на рассчитанную задержку кривизны фронта волны, сложения сигналов по всем элементам антенны, квадратичного детектирования и интегрирования. Модуль II может быть реализован как во временной области (3), так и в частотной области (4):

$$P_{ra} = \sum_{t=0}^T \left| \sum_{i=1}^M S_i(t - \Delta_{rai}) \right|^2, \quad (3)$$

$$P_{ra} = \sum_{f=F_1}^{F_2} \left| \sum_{i=1}^M \Phi_i(f) \cdot \exp(-j2\pi f \Delta_{rai}) \right|^2, \quad (4)$$

где P_{ra} — мощность сигнала на выходе алгоритма в каждой точке сетки по расстоянию r и азимуту α ; $S_i(t)$ — временной процесс сигнала на входе каждого приёмника номер i ; $\Phi_i(f)$ — комплексный спектр сигнала на входе каждого приёмника номер i ; Δ_{rai} — задержка по времени между ходом сигнала от точки сетки $[r, \alpha]$ к центральному приёмнику и ходом сигнала от той же точки сетки $[r, \alpha]$ к приёмнику номер i согласно (2); $[r, \alpha] = var$ — варьируемые значения сетки по расстоянию r и азимуту α ; t — время, от нуля до длительности выборки T ; f — частота, от начального значения F_1 до конечного значения F_2 частотного диапазона; i — номер элемента приёмной системы от единицы до количества приёмников M .

Оценку координат источника по расстоянию \hat{r} и азимуту $\hat{\alpha}$ получают как ту точку сетки $[r, \alpha]$, в которой мощность сигнала принимает максимальное значение:

$$[\hat{r}, \hat{\alpha}] = \arg \{ \max \{ P_{r\alpha} \} \}. \quad (5)$$

На рис. 2 приведены примеры работы алгоритма. При моделировании алгоритма были заданы следующие параметры сигнала, антенны и обработки:

- горизонтальная линейная антенна длиной 100 м имеет 11 элементов через 10 м;
- сигнал в виде отрезка нормального белого шума в диапазоне частот от 0,5 до 8,0 кГц, частота дискретизации 20 кГц;
- размер выборки БПФ 4096 отсчетов, что соответствует длительности выборки 204 мс;
- сетка по азимуту (α) от -2° до $+2^\circ$, с дискретным шагом $0,02^\circ$, сетка по расстоянию (r) от 50 до 20000 м, с дискретным шагом 50 м.

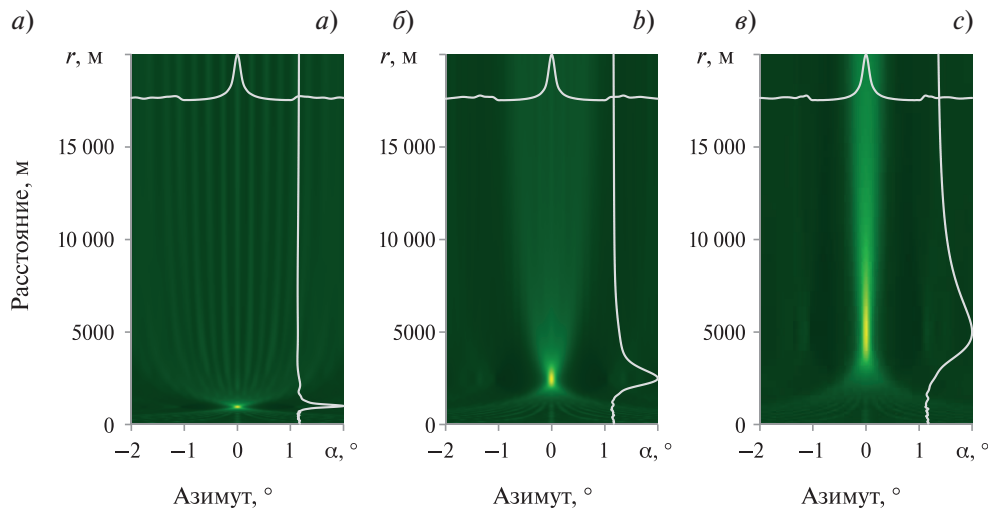


Рис. 2. Отклик алгоритма фокусировки по расстоянию (r) и азимуту (α) для трех положений источника: а — $r = 1000$ м, $\alpha = 0^\circ$; б — $r = 2500$ м, $\alpha = 0^\circ$; в — $r = 5000$ м, $\alpha = 0^\circ$

Fig. 2. Range (r) and azimuth (α) focusing algorithm response for three positions of a source: а — $r = 1000$ m, $\alpha = 0^\circ$; б — $r = 2500$ m, $\alpha = 0^\circ$; в — $r = 5000$ m, $\alpha = 0^\circ$

На графиках рис. 2 в декартовых координатах «азимут–расстояние» яркостью цвета в зелено-желтой палитре приведен отклик алгоритма фокусировки согласно (4), представляющей собой нормированное по максимуму значение мощности сигнала $P_{r\alpha}$. Минимальное значение — черный цвет, максимальное значение — желтый цвет. Поверх яркостного раstra линиями приведены сечения отклика алгоритма по координатам азимута и расстояния, проходящие через точку с максимальным значением отклика. Графики приведены для трех положений источника: а) расстояние до источника 1000 м, азимут 0° ; б) расстояние 2500 м, азимут 0° ; в) расстояние 5000 м, азимут 0° . В конкретном примере общий объем варьируемых элементов расчетной сетки составляет 8×10^4 .

На графиках рис. 2 видно, и это подтверждается численными значениями, что максимальный отклик (яркий желтый цвет) наблюдается в точке с координатами истинного положения источника. На графиках сечения по дальности можно видеть асимметрию максимума и увеличение его ширины с увеличением дальности, что соответствует теоретическим основам алгоритма фокусировки [16].

3. Фокусировка вблизи границы среды

Рассмотрим фокусировку при расположении приемной антенны вблизи границы среды вода–воздух, когда от источника к приемнику будут приходить два луча: прямой луч и луч, отраженный от поверхности.

Для моделирования двухлучевого распространения сигнала (модуль I) примем схему хода лучей в вертикальной плоскости, приведенную на рис. 3. Принятая схема, не учитывающая возможные эффекты при отражении от взволнованной поверхности, а также явления рефракции луча, является относительным приближением к реальным процессам распространения сигнала, но достаточным для исследования в принятой постановке задачи [17].

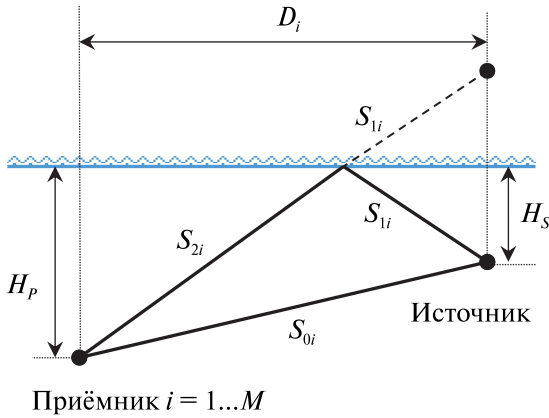


Рис. 3. Схема хода лучей для вертикальных плоскостей, проходящих через источник и приёмник номер i

Fig. 3. Beam path diagram for vertical planes passing through the source and receiver i

На рис. 3 обозначено:

D_i — удаленность источника от приёмника номер i в горизонтальной плоскости согласно схеме рис. 1;

H_S, H_P — глубина погружения источника и приёмников, соответственно;

S_{0i} — путь, пройденный прямым лучом от источника к приёмнику номер i ;

$S_{1i} + S_{2i}$ — путь, пройденный отраженным лучом.

Для схемы распространения лучей на рис. 3 пути, пройденные прямым и отраженным лучами, можно получить по теореме Пифагора:

$$\begin{cases} S_{0i} = \left(D_i^2 + (H_P - H_S)^2 \right)^{0,5} \\ S_{1i} + S_{2i} = \left(D_i^2 + (H_P + H_S)^2 \right)^{0,5} \end{cases} \quad (6)$$

Тогда запаздывание между парой лучей для приёмника номер i определится как:

$$\tau_i = \frac{S_{1i} + S_{2i} - S_{0i}}{C} = \frac{\left(D_i^2 + (H_P + H_S)^2 \right)^{0,5} - \left(D_i^2 + (H_P - H_S)^2 \right)^{0,5}}{C}. \quad (7)$$

Здесь D_i определяется из выражения (1), принятого для описания поля источника в свободном пространстве. Это очевидно, поскольку схема на рис. 3 в проекции на горизонтальную плоскость аналогична рис. 1. В результате полученное выражение (7) с использованием (1) дает полное описание поля сигнала вблизи границы среды (модуль I).

В модуле II алгоритм фокусировки антенны осуществляет синфазное сложение сигналов по элементам антенны, задаваясь различными гипотезами о нахождении источника в точках заданной сетки горизонтального пространства $[r, \alpha]$, т.е. используется традиционный алгоритм для свободного пространства, который был описан выше. Как в случае свободного пространства, используются процедуры сдвига сигнала для элемента антенны на рассчитанную задержку кривизны фронта волны по принятой гипотезе координат источника на плоскости по формуле (2), сложения сигналов по всем элементам антенны, квадратичного детектирования и интегрирования согласно (4).

На рис. 4 приведены примеры работы алгоритма фокусировки, полученные путем компьютерного моделирования, когда поле входного сигнала моделировалось как сумма двух сигналов с запаздыванием между ними на каждом приёмнике согласно выражениям (7) и (1). При моделировании были заданы параметры сигнала, антенны и обработки, использованные ранее. Шкалы графиков рис. 4 и цветовая палитра яркостного раstra аналогичны графикам на рис. 2. Графики приведены при фиксированном положении источника по горизонтали: расстояние до источника $r = 1000$ м, азимут $\alpha = 0^\circ$, для трех сочетаний глубины источника и приёмника по вертикали: а) глубина погружения источника 100 м, глубина приёмника 100 м; б) глубины погружения источника и приёмника 500 м; в) глубины погружения источника и приёмника 1000 м. При больших глубинах погружения источника и приёмника наглядно виден эффект, возникающий при фокусировке двухлучевого сигнала.

Эффект возникает при увеличении запаздывания между лучами, которое согласно (7) быстрее всего происходит при совместном увеличении глубин погружения источника и приёмника, максимальный отклик раздваивается, и начинает напоминать отклик от двух источников, находящихся на разных расстояниях. Один из максимумов соответствует наклонному расстоянию между источником и приёмником вдоль прямого луча. Другой максимум соответствует расстоянию, пройденному отраженным лучом, и его аргумент характеризует положение мнимого источника, что является ложным ответом. Таким образом, применение традиционного алгоритма фокусировки приёмной системы в ближнем поле может приводить к неоднозначному ответу по расстоянию в случае двухлучевого распространения сигнала вблизи границы среды.

С другой стороны, неоднозначный отклик по расстоянию позволяет определить глубину погружения источника. Решая систему (6) относительно неизвестных H_S и D , получим выражение для оценки глубины погружения источника \hat{H}_S :

$$\hat{H}_S = \frac{(S_1 + S_2)^2 - S_0^2}{4H_P}, \quad (8)$$

где S_0 — расстояние вдоль прямого луча (ближнее фокусное расстояние); $S_1 + S_2$ — полное расстояние вдоль луча, имеющего отражение (второе фокусное расстояние).

Для примера, приведенного на рис. 4, б, имеем оценку наклонных расстояний $S_0 = 1000$ м, $S_1 + S_2 = 1450$ м, что для заданной глубины приемника $H_P = 500$ м, согласно (8) дает оценку глубины источника $\hat{H}_S = 551$ м. Для примера на рис. 4, в имеем оценку наклонных расстояний 1000 и 2250 м, что для заданной глубины приемника 1000 м дает оценку глубины источника $\hat{H}_S = 1015$ м. Полученные оценки глубин источника близки к имитируемым глубинам, которые составляли 500 и 1000 м, соответственно.

В примере на рис. 4, а при традиционном алгоритме фокусировки наблюдаем одно фокальное пятно, что не позволяет оценить глубину погружения источника по формуле (8).

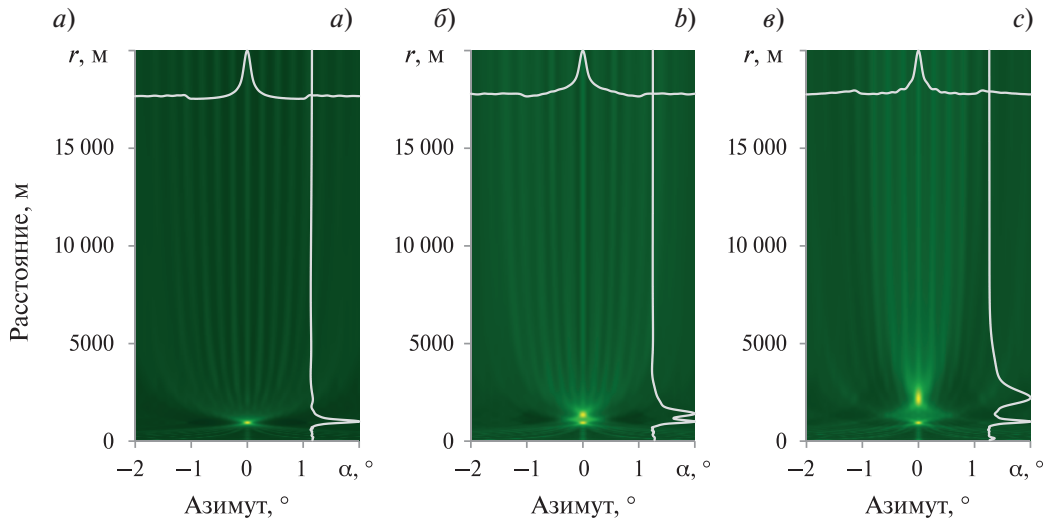


Рис. 4. Отклик алгоритма фокусировки при двухлучевом сигнале на расстоянии до источника 1000 м для трех сочетаний глубин погружения источника (H_S) и приемника (H_P): а — $H_S = 100$ м, $H_P = 100$ м; б — $H_S = 500$ м, $H_P = 500$ м; в — $H_S = 1000$ м, $H_P = 1000$ м

Fig. 4. Focusing algorithm response for dual-beam signal at a range 1000 m to the source and three combinations of depth of source submergence (H_S) and receiver (H_P): а — $H_S = 100$ m, $H_P = 100$ m; б — $H_S = 500$ m, $H_P = 500$ m; в — $H_S = 1000$ m, $H_P = 1000$ m

Таким образом, раздвоение отклика при традиционной фокусировке можно использовать для оценки глубины источника, находящегося вблизи границы среды. Однако, такое раздвоение заметно не во всех случаях, а только при достаточно большом запаздывании между лучами. При небольшом запаздывании между лучами приходится наблюдать только одно фокальное пятно. В этом случае, для оценки глубины погружения источника можно применить усовершенствованную фокусировку двухлучевого сигнала.

4. Консолидированная фокусировка двухлучевого сигнала и определение глубины погружения источника

Рассмотрим возможность консолидированной фокусировки двухлучевого широкополосного сигнала, которая согласно [15, 18] может дать приращение уровня сигнала с определением глубины погружения источника. Для этого примем следующие допущения. Во-первых, при приеме сигнала имеется пара лучей, запаздывание по времени хода между которыми связано с глубиной погружения источника при известном расстоянии до него. Во-вторых, расстояние до источника можно получить по методу фокусировки горизонтальной антенны в ближнем поле по алгоритму (5). В-третьих, основываясь на методе консолидированной обработки [18], введение на элементах антенны дополнительной компенсации времени запаздывания пары лучей при его соответствии реальному времени запаздывания даст приращение мощности сигнала. Тогда, осуществляя в традиционном алгоритме фокусировки дополнительную процедуру консолидированной обработки двухлучевого сигнала со сканированием в диапазоне времен запаздывания лучей, обусловленных глубинами погружения источника, можно определить искомую глубину погружения источника при получении максимального энергетического отклика [15].

Предлагаемый алгоритм оценивает мощность сигнала на выходе антенны для каждой точки трехмерного пространства $[r, \alpha, t]$. Для этого создаются две копии сигнала: первая образуется для каждого элемента антенны через процедуры сдвига сигнала на задержку из-за кривизны фронта волны и вторая — дополнительного сдвига первой копии сигнала на запаздывание между парой лучей. Далее следует сложение на каждом элементе антенны двух полученных копий сигналов и последующего сложения результата по всем элементам антенны, квадратичного детектирования и интегрирования. Такой алгоритм может быть реализован как во временной области (9), так и в частотной области (10):

$$P_{r\alpha\tau} = \sum_{t=0}^T \left| \sum_{i=1}^M \{S_i(t - \Delta_{rai}) + S_i(t - \Delta_{rai} - \tau)\} \right|^2, \quad (9)$$

$$P_{r\alpha\tau} = \sum_{f=F_1}^{F_2} \left| \sum_{i=1}^M \{ \Phi_i(f) \cdot \exp(-j2\pi f \Delta_{rai}) + \Phi_i(f) \cdot \exp(-j2\pi f [\Delta_{rai} + \tau]) \} \right|^2, \quad (10)$$

где $P_{r\alpha\tau}$ — мощность сигнала на выходе алгоритма в каждой точке сетки по расстоянию r , азимуту α и запаздыванию между парой лучей τ ; $[r, \alpha, \tau] = var$ — варьируемые значения сетки по расстоянию r , азимуту α и запаздыванию между парой лучей τ .

Остальные обозначения прежние.

Оценку координат источника по расстоянию \hat{r} , азимуту $\hat{\alpha}$ и запаздыванию между парой лучей $\hat{\tau}$ получают как ту точку сетки $[r, \alpha, \tau]$, в которой мощность сигнала принимает максимальное значение:

$$[\hat{r}, \hat{\alpha}, \hat{\tau}] = \arg\{\max\{P_{r\alpha\tau}\}\}. \quad (11)$$

На рис. 5 приведены примеры работы предлагаемого алгоритма в срезе «расстояние-запаздывание». При моделировании были заданы параметры сигнала, антенны и обработки, использованные ранее. В принимаемый сигнал введено запаздывание между лучами в диапазоне значений исходя из (7). Сетка по запаздываниям (τ), отображаемая по шкале абсцисс, принимала значения от 12,5 до 14,5 мс с дискретным шагом 0,05° мс. Цветовая палитра яркостного раstra аналогична графикам на рис. 2. Графики приведены при фиксированном азимуте 0° и глубине приемника 100 м для трех сочетаний глубины погружения и расстояния до источника: а) расстояние 1000 м, глубина погружения источника 100 м; б) расстояние 2500 м, глубина источника 250 м; в) расстояние 5000 м, глубина источника 500 м. Такие сочетания между расстоянием и глубиной погружения источника (при фиксированной глубине погружения приемника) приводят к близкому запаздыванию между лучами — около 13,2 мс.

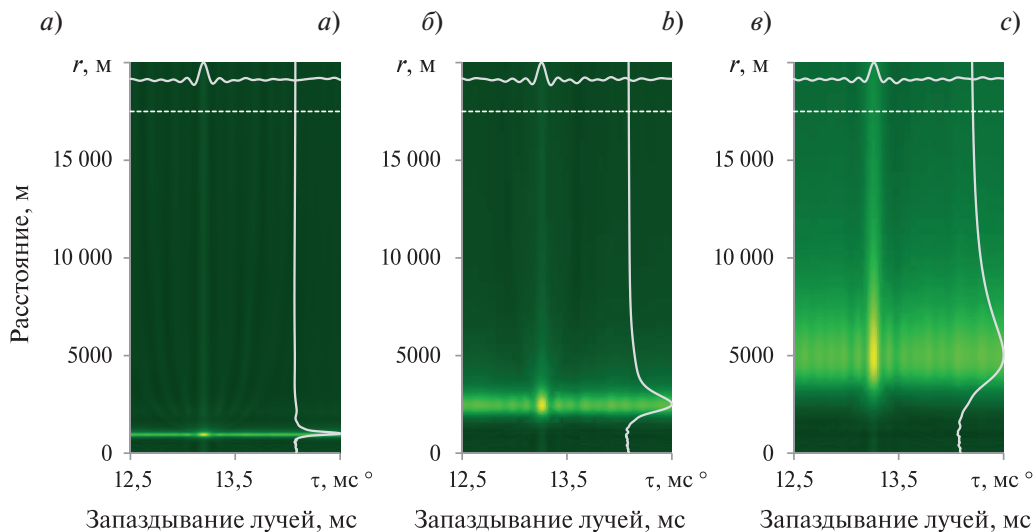


Рис. 5. Отклик алгоритма консолидированной обработки в срезе «расстояние-запаздывание» для глубины приемника 100 м для трех сочетаний глубины погружения источника (H_S) и расстояния (R): а — $R = 1000$ м, $H_S = 100$ м; б — $R = 2500$ м, $H_S = 250$ м; в — $R = 5000$ м, $H_S = 500$ м

Fig. 5. Consolidated processing algorithm response in tail ‘range-delay’ for depth of receiver 100 m and three combinations of depth of source submergence (H_S) and range (R): а — $R = 1000$ m, $H_S = 100$ m; б — $R = 2500$ m, $H_S = 250$ m; в — $R = 5000$ m, $H_S = 500$ m

На графиках рис. 5 видно, и это подтверждается численными значениями, что максимальный отклик (яркий желтый цвет) наблюдается в точке истинного положения источника по координатам расстояние и запаздывание сигнала. Можно показать, что в точке по координате азимута также наблюдается максимальный отклик.

Как показано ранее, запаздывание между лучами функционально связано с глубиной погружения источника. Из выражения (7), используя формулу приближенных вычислений [19], при допущениях $(H_p - H_s)2 \ll D^2$ и $(H_p + H_s)2 \ll D^2$, можно получить:

$$\tau_0 \cong \frac{2H_p H_s}{D_0 C}. \quad (12)$$

При этом, можно показать [19], что при глубине приемника до 100 м, глубинах источника до 500 м и расстоянии между источником и приемником не менее 1000 м, погрешность значений τ , получаемых по приближенной формуле (12), не превышает 10 % относительно точной формулы (7).

Тогда, зная глубину погружения приемника H_p и скорость звука C , после определения расстояния до источника \hat{r} и оценки запаздывания лучей $\hat{\tau}$, для расчета глубины погружения источника можно использовать упрощенную аналитическую зависимость:

$$\hat{H}_s \cong \frac{\hat{\tau} \hat{r} C}{2H_p}. \quad (13)$$

На рис. 6 приведены примеры работы предлагаемого алгоритма в координатах «расстояние — глубина погружения источника», когда значения глубины погружения источника рассчитаны согласно (13) при запаздываниях в диапазоне от 12,5 до 14,5 мс для заданных значений горизонтального расстояния 2500 м и глубины погружения приемника 100 м. При моделировании были заданы параметры сигнала, антенны и обработки, использованные ранее. В конкретном примере общий объем варьируемых элементов расчетной сетки по пространству и времени запаздывания составляет 8×10^4 , а в общем случае может составлять 4×10^6 , когда диапазон глубин погружения доходит до 500 м. Цветовая палитра яркостного раstra аналогична используемой ранее.

Графики приведены для трех глубин погружения источника: 245, 255, 265 м. При изменении глубины погружения источника максимальный отклик алгоритма согласованно меняет свое положение по глубине

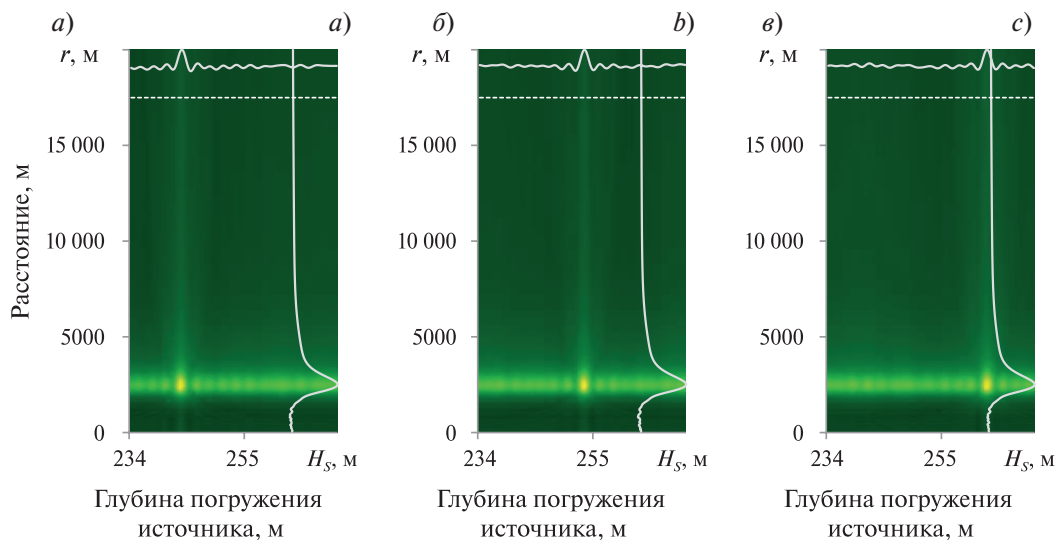


Рис. 6. Отклик алгоритма консолидированной обработки в срезе «расстояние-запаздывание» когда шкала запаздываний оцифрована в значениях глубины источника для глубины приемника 100 м и расстояния 2500 м для трех глубин погружения источника (H_s): а — $H_s = 245$ м; б — $H_s = 255$ м; в — $H_s = 265$ м

Fig. 6. Consolidated processing algorithm response in tail ‘range-delay’ when delay scale is digitized for source depth for receiver depth 100 m and range 2500 m for three depths of source submergence (H_s): а — $H_s = 245$ m; б — $H_s = 255$ m; в — $H_s = 265$ m

при фиксированном заданном положении по расстоянию. Оценка глубин погружения по предлагаемому методу дала такие результаты: 242, 253, 263 м. Видно, что существуют ошибки смещения, которые в конкретном примере составляют по глубине погружения около 3 м. Однако для ряда практических случаев их можно признать несущественными.

5. Приращение мощности сигнала при консолидированной обработке

В работе [18] для протяженной вертикальной антенны показано, что компенсация времени запаздывания между парой лучей по методу консолидированной обработки дает на выходе антенны приращение мощности сигнала на значение до 50 %, и в условиях изотропной помехи соответствующее увеличение отношения сигнал/помеха. Оценим приращение мощности сигнала в предлагаемом методе консолидированной фокусировки для горизонтальной антенны.

Для этого проведем моделирование при глубине погружения приемника 100 м для нескольких глубин погружения источника и расстояний между источником и приемником. Запаздывания между лучами в условиях эксперимента находятся в большом динамическом диапазоне: минимальное запаздывание 0,26 мс отличается от максимального 59,44 мс более чем на два порядка. Для возможности работы в таком широком диапазоне выберем диапазон сканирования по запаздываниям от 0,05 до 100 мс с шагом 0,05 мс. Заданные ранее параметры обработки сигнала (частота дискретизации 20 кГц и размер выборки БПФ 4096 точек) обеспечивают разрешение по времени 0,05 мс и длительность выборки 204 мс, что позволяет реализовать выбранный диапазон сканирования по запаздываниям.

Результаты моделирования приведены на рис. 7, где показаны сечения по запаздыванию для относительного приращения мощности сигнала $\Delta P = P_{\text{рост}}/P_{\text{ра}}$ предлагаемого алгоритма (10) консолидированной фокусировки относительно традиционного алгоритма фокусировки (4). Рисунки приведены для трех расстояний до источника: 1000, 2500, 5000 м. На всех рисунках приведены по четыре графика для глубин погружения источника: 10, 100, 250 и 500 м.

На рис. 7 видно, что запаздывание между парой лучей, заданное при консолидированной фокусировке, правильно определяется в алгоритме наличием максимумов с соответствующими аргументами по шкале запаздываний. При этом мощность отклика на выходе при консолидированной обработке в точке максимума увеличивается в 1,5 раза относительно мощности отклика традиционного алгоритма, что близко к результатам работы [18].

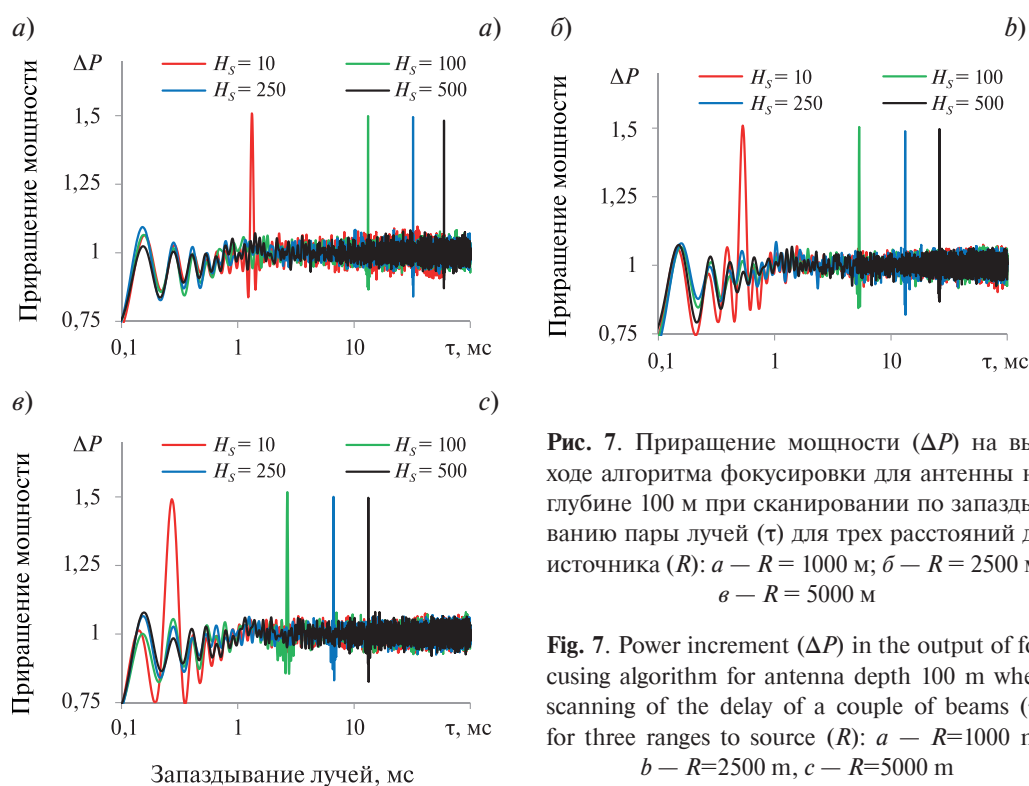


Рис. 7. Приращение мощности (ΔP) на выходе алгоритма фокусировки для антенны на глубине 100 м при сканировании по запаздыванию пары лучей (τ) для трех расстояний до источника (R): а — $R = 1000$ м; б — $R = 2500$ м; в — $R = 5000$ м

Fig. 7. Power increment (ΔP) in the output of focusing algorithm for antenna depth 100 m when scanning the delay of a couple of beams (τ) for three ranges to source (R): а — $R = 1000$ m, б — $R = 2500$ m, в — $R = 5000$ m

6. Заключение

Таким образом, исследование, проведенное методом компьютерного моделирования для широкополосного сигнала в диапазоне до 8 кГц, позволило предложить для горизонтальной линейной антенны способы приема в зоне Френеля, позволяющие совместно определять направление, расстояние до источника сигнала и глубину его погружения вблизи границы среды вода-воздух, когда от источника к приемнику приходят два луча (прямой и отраженный от поверхности).

1. Использование традиционного оператора компенсации задержек сигнала по фронту сферической волны на приёмниках антенны при двухлучевом сигнале у границы среды может приводить к появлению двух точек фокусировки в пространстве по расстоянию. В зависимости от взаимного расположения источника и приемника фокальные пятна могут быть заметно разнесены по расстоянию или в другом случае практически сливаться. Для первого случая предложен метод расчета глубины погружения источника при известных расстояниях до двух фокальных пятен.

2. Когда фокальные пятна не разделяются, предложен метод обработки сигнала, в котором осуществляют дополнительное сканирование временных задержек на всех элементах антенны в пределах величин возможного запаздывания сигнала между парами лучей. При получении максимальной мощности сигнала величина введенного запаздывания будет функционально связана с глубиной погружения источника, что позволяет осуществлять совместное определение направления, расстояния и глубины погружения источника. Кроме того показано, что дополнительное сканирование временных задержек позволяет увеличить мощность принимаемого сигнала в точке максимального отклика до 50 % относительно мощности сигнала при слитых вместе фокальных пятнах.

Литература

1. *Bangs W.J., Schultheiss P.M.* Space-time processing for optimal parameter estimation // Proceedings of NATO Advanced Study Institute on Signal Processing. University of Technology, Longhborough, U.X., Aug.-Sept. 1972.
2. *Carter G.C.* Variance bounds for passively locating an acoustic source with a symmetric line array // The Journal of the Acoustical Society of America. 1977. Vol. 62. P. 922–926. doi:10.1121/1.381623
3. *Lawrence C. Ng., Bar-Salomon Y.* Optimum multisensor, multitarget time delay estimation // NUSC Technical Report. April 1983. Newport, Rhode Island / New London. Connecticut USA. 6757 20.
4. *Hassab J., Bousher R.* Optimum estimation of time delay by a generalized correlator // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1979. Vol. 27, N 4. P. 373–380. doi:10.1109/TASSP.1979.1163269
5. *Jean-Pierre Le Cadre.* Performance analysis of wavefront curvature methods for range estimation of a moving source // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1995. Vol. 31, N 3. P. 1082–1103. doi:10.1109/7.395234
6. *Schultheiss P.M.* Passive sonar detection in the presence of Interference // The Journal of the Acoustical Society of America. 1968. Vol. 43. P. 418–425. doi:10.1121/1.1910847
7. *Гампер Л.Е.* О точности методов пассивной гидролокации с разнесенными бортовыми антеннами // Гидроакустика. 2009. Вып. 9. С. 34–42.
8. *Ki-Man Kim, In-Sic Yang, Seung-Yong Chun, Won-Tchon Oh.* Passive-range estimation using dual focused beamformers // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2002. Vol. 27, N 3. P. 638–641. doi:10.1109/JOE.2002.1040946
9. *Гампер Л.Е.* Схемотехника пассивной гидролокации // Гидроакустика. 2013. Вып. 18 (2). С. 31–42.
10. *Гампер Л.Е., Ермоленко А.С., Манов К.В.* Способ пассивного определения координат источников излучения. Патент RU № 2507531. Опубликовано 20.02.2014.
11. *Гампер Л.Е., Иванов А.М., Каришнев Н.С.* Способ пассивного определения координат движущегося источника излучения. Патент RU № 2623831. Опубликовано 29.06.2017.
12. *Гампер Л.Е.* Пассивная гидролокация источников шумоизлучения с использованием бортовых протяженных фокусирующих приемных систем. // Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» ГА-2018. СПб., 2018. С. 40–42.
13. *Колмогоров В.С.* Методы обработки гидроакустических сигналов, принимаемых в зоне Френеля приемных и излучающих систем: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.06 — Акустика. Тихоокеан. океанол. ин-т ДВО РАН. Владивосток, 2010. 270 с.
14. *Гусев В.Г.* Системы пространственно-временной обработки гидроакустической информации. Л.: Судостроение, 1988. 264 с.
15. *Консон А.Д., Волкова А.А.* Локализация горизонта нахождения широкополосного сигнала вертикально протяженной линейной антенной // Гидроакустика. 2023 Вып. 56(4). С. 19–28.
16. *Гампер Л.Е.* Методы пассивной гидролокации в ближней зоне // Информационная гидроакустика / под общ. ред. А.Д. Консона. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2023. С. 118–165.

17. Акустика океана / под ред. акад. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974. 693 с.
18. Консон А.Д., Волкова А.А. Пространственная избирательность вертикально протяженной линейной антенны в подводном звуковом канале // Гидроакустика. 2023. Вып. 54 (2). С. 80–89.
19. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1956. 608 с.

References

1. Bangs W.J., Schultheiss P.M. Space-time processing for optimal parameter estimation. *Proceedings of NATO Advanced Study Institute on Signal Processing. University of Technology, Loughborough, U.K., Aug.-Sept, 1972.*
2. Carter G.C. Variance bounds for passively locating an acoustic source with a symmetric line array. *The Journal of the Acoustical Society of America.* 1977, 62, 922–926. doi:10.1121/1.381623
3. Lawrence C. Ng., Bar-Salomon Y. Optimum multisensor, multitarget time delay estimation. *NUSC Technical Report.* April 1983. Newport, Rhode Island / New London, Connecticut USA. 6757 20.
4. Hassab J.C., Bousher R.E. Optimum estimation of time delay by a generalized correlator. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing.* 1979, 27, 4, 373–380. doi:10.1109/TASSP.1979.1163269
5. Jean-Pierre Le Cadre. Performance analysis of wavefront curvature methods for range estimation of a moving source. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* 1995, 31, 3, 1082–1103. doi:10.1109/7.395234
6. Schultheiss P.M. Passive sonar detection in the presence of interference. *The Journal of the Acoustical Society of America.* 1968, 43, 418–425. doi:10.1121/1.1910847
7. Gamper L.E. On the passive sonar localization method accuracy while using spaced ship-borne arrays. *Hydroacoustics.* Vol. 9. 2009. P. 34–42 (in Russian).
8. Ki-Man Kim, In-Sic Yang, Seung-Yong Chun, and Won-Tchon Oh. Passive-Range Estimation Using Dual Focused Beamformers. *IEEE Journal of Oceanic Engineering.* 2002, 27, 3, 638–641. doi:10.1109/JOE.2002.1040946
9. Gamper L.E. Circuit technology of passive echo ranging. *Hydroacoustics.* 2013, 18(2), 31–42 (in Russian).
10. Gamper L.E., Ermolenko A.S., Manov K.V. Method for passive determination of coordinates of radiation sources. Invention RU № 2507531. Date of publication 20.02.2014 (in Russian).
11. Gamper L.E., Ivanov A.M., Karishnev N.S. Method of passive determining coordinates of moving radiation source. Invention RU № 2623831. Date of publication 29.06.2017 (in Russian).
12. Gamper L.E. Passive sonar localization of noise sources using extended focusing receiving systems. *Proceedings of XIV All-Russian conference 'Advanced technologies of hydroacoustics and hydrophysics'* HA-2018. SPb., 2018, 40–42 (in Russian).
13. Kolmogorov V.S. Methods of processing of the hydroacoustic signals accepted in the Fresnel zone of receptions and the radiating systems: *Thesis of the doctor of engineering.* 01.04.06 — Acoustics. V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Vladivostok. 2010. 270 p. (in Russian).
14. Gusev V.G. Systems of spatio-temporal processing of hydroacoustic information. *Leningrad, Sudostroyeniye*, 1988. 264 p. (in Russian).
15. Konson A.D., Volkova A.A. Localization of the horizon of finding of the broadband source by method of the consolidated processing of the signal of vertically extended linear antenna. *Hydroacoustics.* 2023, 56(4), 19–28 (in Russian).
16. Gamper L.E. Methods of the passive hydrolocation in the near zone. In: *Information hydroacoustics* / Ed. by A.D. Konson. SPb., publ. ETU, 2023, 118–165 (in Russian).
17. Ocean acoustics / Ed. by acad. L.M. Brekhovskikh. M., Nauka, 1974. 693 p. (in Russian).
18. Konson A.D., Volkova A.A. Spatial selectivity of vertically extended linear antenna in underwater sound channel. *Hydroacoustics.* 2023, 54(2), 80–89 (in Russian).
19. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Handbook on Mathematics. M., Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1956. 608 p. (in Russian).

Об авторах

КОНСОН Александр Давидович, главный ученый секретарь, доктор технических наук,
SPIN-код: 3079-0713, e-mail: adkonson@gmail.com

ВОЛКОВА Анна Александровна, ведущий специалист, кандидат технических наук, SPIN-код: 7527-8473,
e-mail: wolkova.aa@yandex.ru