

РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА ЗВУКА. II ЧАСТЬ*

В. М. Кузькин¹, С. А. Пересёлков², С. А. Ткаченко², И. В. Казначеев²

¹ — *Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской Академии Наук;*

² — *Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 31.01.2020 г.

Аннотация. В рамках численного моделирования выполнена проверка работоспособности фазового варианта адаптивной интерферометрической обработки гидроакустической информации. Интерферометрическая обработка во многом свободна от ограничений, присущих методу согласованного поля, что позволило предложить два различных варианта (амплитудный и фазовый) адаптивных алгоритмов. Под адаптацией в рамках интерферометрического подхода понимается изменение параметров интерферометрической обработки в зависимости от условий распространения, направленное на достижение оптимального определения радиальной скорости и удаленности источника. Эти изменения, реализуемые на этапе обнаружения, позволяют определять разности волновых горизонтальных чисел и их производные по частоте для различных комбинаций мод при малых входных отношениях сигнал/помеха. Предложенный в работе фазовый вариант адаптации решает проблему идентификации малозумных источников в акваториях, где невозможно проведение акустической калибровки или отсутствуют данные о гидроакустических условиях. Данный подход к адаптации интерферометрического метода позволяет значительно расширить область применения интерферометрической обработки в задачах идентификации малозумных источников звука.

Ключевые слова: гидроакустика, звуковой волновод, адаптация, интерферометрия, голограмма, локализация источника, пеленг, частотный сдвиг, радиальная скорость, дальность до источника.

IMPLEMENTATION OF ADAPTIVE INTERFEROMETRIC METHOD OF SOUND SOURCE LOCALIZATION. PART II

V. M. Kuzkin, S. A. Pereselkov, S. A. Tkachenko, I. V. Kaznacheev

Abstract. Within the framework of numerical modeling, the phase variant of adaptive interferometric processing of hydroacoustic signals is verified. Interferometric processing is free from the limitations of matched field processing. As result the interferometric processing allowed us to offer two different variants (amplitude and phase) of adaptive algorithms. Adaptation in the framework of the interferometric approach is understood as variations of parameters of interferometric processing in depending of propagation conditions. These variations of parameters of interferometric processing are aimed to optimal determination of the radial velocity and distance of the source. These variations of parameters of interferometric processing implemented at the detection step, allow us to determine the differences of sound modes horizontal numbers and their frequency derivatives for different combinations of modes at small value of input signal/noise ratio. The proposed phase adaptation variant solves the problem of identifying low-noise sources in water regions where acoustic calibration is impossible or there is no data about hydroacoustic conditions. This approach to the

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект 19-29-06075 и проект 19-08-00941). Научно-исследовательская работа И.В. Казначеева поддержана грантом Президента РФ МК-933.2019.8.

© Кузькин В. М., Пересёлков С. А., Ткаченко С. А., Казначеев И. В., 2020

adaptation of the interferometric approach allows us to significantly expand the application of interferometric processing in the identification of low-noise sound sources.

Keywords: hydroacoustics, sound waveguide, adaptation, acoustic interferometry, acoustic holography, source localization, bearing, frequency shift, radial velocity, source range.

1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–7] предложена и апробирована интерферометрическая обработка гидроакустической информации, основанная на двукратном преобразовании Фурье когерентно накопленной спектральной интенсивности вдоль интерференционных полос. Практическое применение такой обработки относится к области локализации малозумных источников. Полученная на выходе интегрального преобразования спектральная плотность источника, которую можно назвать голограммой Фурье [8], концентрируется в пределах узкой полосы. В отличие от сигнала источника, накопление помехи вдоль локализованных полос некогерентно и помеха распределена по всей области голограммы.

Вопросы разработки адаптивных алгоритмов локализации малозумных источников рассматриваются как одна из слабо разработанных проблем и являются предметом активных исследований. Трудности подхода к ее решению обусловлены причинами, затрудняющими успешную реализацию традиционных методов обработки в реальных океанических волноводах [9]. Интерферометрическая обработка во многом свободна от ограничений, присущих методу согласованного поля, что позволило предложить два различных варианта (амплитудный и фазовый) адаптивных алгоритмов [10]. Они решают проблему идентификации малозумных источников в акваториях, где невозможно проведение акустической калибровки или отсутствуют данные о гидроакустических характеристиках.

В настоящей статье представлены результаты численного эксперимента реализации фазового варианта адаптации. Компьютерное моделирование апробации амплитудного варианта адаптации рассмотрено в работе [11].

2. ГОЛОГРАММА ФУРЬЕ

На голограмме Фурье двумерная спектральная плотность $F(\tau, \tilde{\nu})$ источника локализована на плоскости $(\tau, \tilde{\nu})$ в виде фокальных пятен, вызванных интерференцией мод разных номеров, зеркально перевернутых относительно начала координат [1]. Здесь τ и $\tilde{\nu} = 2\pi\nu$ — время и циклическая частота. Они расположены в первом и третьем квадрантах, если радиальная скорость (проекция скорости в направлении на приемник) $w < 0$, т. е. источник приближается к приемнику и во втором и четвертом квадрантах когда источник удаляется от приемника, $w > 0$. Если фокальные пятна разрешаются, то область локализации содержит $(M - 1)$ основных максимумов с координатами $(\tau_\mu, \tilde{\nu}_\mu)$, расположенными на прямой $\tilde{\nu} = \tilde{\epsilon}\tau$, где M — число мод, формирующих поле, $\mu = 1, 2, \dots, M - 1$ — номер фокального пятна. Ближайший к началу координат пик, обусловленный интерференцией соседних мод, расположен в точке $(\tau_1, \tilde{\nu}_1)$. Координаты соседнего пика, вызванного интерференцией мод номеров $(m, m + 2)$ — $(\tau_2, \tilde{\nu}_2)$. Координаты самого удаленного пика, обусловленного интерференцией первой и последней моды — $(\tau_{M-1}, \tilde{\nu}_{M-1})$. В точках с координатами $(\tau_\mu, \tilde{\nu}_\mu)$ суммируются $(M - \mu)$ основных пиков.

Положения основных максимумов фокальных пятен пропорциональны радиальной скорости w и удалению r источника от приемника [1]

$$\dot{w} = -\kappa_{w\mu}\tilde{\nu}_\mu, \quad (1)$$

$$\dot{r} + \dot{w}t_* = \kappa_{r\mu}\tau_\mu, \quad (2)$$

где

$$\kappa_{w\mu} = \left[\overline{h_{m(m+\mu)}(\omega_0)} \right]^{-1}, \quad (3)$$

$$\kappa_{r\mu} = \left[\overline{dh_{m(m+\mu)}(\omega_0)/d\omega} \right]^{-1} \quad (4)$$

— коэффициенты, определяющие пространственные и частотные масштабы изменчивости передаточной функции волновода [12]. Здесь t_* — выделенный момент времени на интервале наблюдения Δt интерференционной картины (интерферограммы) источника, $0 < t_* \leq \Delta t$; $h_{mn} = h_m - h_n$, h_m — горизонтальное волновое число m -й моды; ω_0 — средняя частота ширины $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ спектра. Компонента $\dot{w}t_*$ является неконтролируемой систематической ошибкой. Оценки параметров источника, получаемые в результате обработки данных, в отличие от истинных значений, обозначены точкой сверху. Черта сверху означает усреднение по номерам мод.

Погрешности оценок радиальной скорости и удаления источника в основном обусловлены двумя причинами. Первая причина — помеха, которая неизменно сопровождает любые измерения спектра источника в пределах полосы пропускания. Этот механизм проявления погрешностей рассмотрен в работах [1–7]. Второй источник погрешности параметров источника — неточность коэффициентов $\kappa_{w\mu}$, $\kappa_{r\mu}$ относительно реальных значений, от выбора которых зависит успех обработки.

3. ФАЗОВЫЙ ВАРИАНТ АДАПТАЦИИ

Под адаптацией интерферометрического метода локализации источника понимается возможность определения радиальной скорости и удаления источника посредством измерения связанных с ними величин или с коэффициентами (3), (4) на фоне малого входного отношения сигнал/помеха (с/п) в отсутствие знания о передаточной функции волновода. Такими величинами, как показано в [10], могут служить пеленг источника и частотный сдвиг интерференционных максимумов волнового поля для разнесенных на горизонтальное расстояние d приемников Q_1 и Q_2 (рис. 1). Вопросы измерения пеленга и частотного сдвига в условиях интенсивной помехи рассмотрены в работах [5–7].

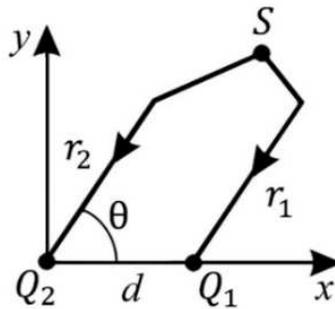


Рис. 1. Схема расположения источника S и приемников $Q_{1,2}$.

Фазовый вариант адаптации основан на фазовом представлении голограммы, чувствительной к радиальной скорости источника. Разность фаз между двумя точками наблюдения в окрестности основного максимума μ -го фокального пятна, согласно (11) [1],

$$\Delta\varphi_\mu = d \cos \theta \left[\overline{h_{m(m+\mu)}(\omega_0)} + (\tilde{v}/w) \right] \quad (5)$$

линейно зависит от частоты и в точке положения пика фокального пятна, $\tilde{v} = \tilde{v}_\mu$, равна нулю, $\Delta\varphi_\mu = 0$. Здесь θ — пеленг. Это позволяет положения максимумов фокальных пятен

$\tilde{\nu}_\mu$ определять по нулевым значениям разности фаз. Координаты τ_μ пиков фокальных пятен $\tau_\mu = \tilde{\nu}_\mu/\tilde{\epsilon}$. Дифференцируя выражение (5), получаем

$$\dot{w} = \frac{d \cos \theta}{d(\Delta\varphi_\mu)/d\tilde{\nu}}, \quad (6)$$

т. е. в этом случае можно непосредственно определить радиальную скорость, наблюдая за частотным изменением разности фаз.

Радиальную скорость и удаление можно также оценить двумя другими методами, регистрируя частотный сдвиг интерференционных максимумов волнового поля. Далее будем считать $r_1, r_2 \gg w\Delta t$.

Первый метод. За время наблюдения Δt частотный сдвиг между точками наблюдения равен

$$\Omega_{\Delta t} = -\frac{1}{2\pi} \frac{d \cos \theta}{(r_1 - w\Delta t)} \frac{\kappa_{r\mu}}{\kappa_{w\mu}} \approx \Omega_0 \left(1 + \frac{w\Delta t}{r_1} \right), \quad (7)$$

где

$$\Omega_0 = -\frac{1}{2\pi} \frac{d \cos \theta}{r_1} \frac{\kappa_{r\mu}}{\kappa_{w\mu}}, \quad (8)$$

— частотный сдвиг в начальный момент времени $t = 0$ [13]. Согласно (7) и (8), изменение частотного сдвига

$$\Delta\Omega = \Omega_0 - \Omega_{\Delta t} = -\Omega_0 \frac{w\Delta t}{r_1}, \quad (9)$$

что позволяет оценить удаление

$$\dot{r}_1 = \left| \frac{\Omega_0}{\Delta\Omega} \dot{w} \Delta t \right|, \quad (10)$$

зная радиальную скорость.

Второй метод. Частотные сдвиги за время наблюдения в точках наблюдения Q_1 и Q_2 равны соответственно

$$\Omega_1 = -\frac{1}{2\pi} \frac{w\Delta t}{r_1} \frac{\kappa_{r\mu}}{\kappa_{w\mu}}, \quad (11)$$

$$\Omega_2 = -\frac{1}{2\pi} \frac{w\Delta t}{(r_1 + d \cos \theta)} \frac{\kappa_{r\mu}}{\kappa_{w\mu}}. \quad (12)$$

В результате для разности частотных сдвигов получаем

$$\Delta\Omega_{\Delta t} = \Omega_1 - \Omega_2 \approx \Omega_1 \frac{d \cos \theta}{r_1}, \quad (13)$$

откуда удаление

$$\dot{r}_1 = \left| \frac{\Omega_1}{\Delta\Omega_{\Delta t}} d \cos \theta \right|. \quad (14)$$

Подставив (14) в (10), находим

$$|\dot{w}| = \left| \frac{\Omega_1}{\Omega_0} \frac{\Delta\Omega}{\Delta\Omega_{\Delta t}} \frac{d \cos \theta}{\Delta t} \right| \quad (15)$$

Знак радиальной скорости, как отмечалось выше, определяется расположением фокальных пятен на голограмме

Таким образом, фазовый вариант адаптации позволяет определять удаление (14) и радиальную скорость (15) через пеленг и частотные сдвиги, не прибегая к информации о коэффициентах $\kappa_{w\mu}$ и $\kappa_{r\mu}$. При этом за счет устранения неконтролируемой систематической

ошибки $\dot{w}t_*$ возрастает точность определения удаления. Условия применимости фазового варианта адаптации сводятся к требованию разрешения частотных смещений Ω_0 , $\Omega_{\Delta t}$ и Ω_1 , Ω_2 . Эта задача рассмотрена в [14]. Заметим, что с уменьшением удаления, повышения частоты и увеличения расстояния между приемниками условия применимости фазового варианта адаптации облегчаются.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Использовался модельный волновод, близкий по характеристикам экспериментальному каналу [15]. Глубина волновода $H = 53$ м, постоянная по глубине скорость звука $c(z) = 1470$ м/с, жидкое поглощающее дно: комплексный показатель преломления $n = 0.89(1 + i0.01)$, отношение плотности грунта и воды $\rho = 1.8$. Шумовой источник S на глубине $z_S = 47$ м с радиальной скоростью $w = -3$ м/с приближался к одиночным приемникам $Q_{1,2}$, расположенными на глубине $z_q = 12.5$ м. Пеленг $\theta = 0$.

Моделировались маломодовый и многомодовый режимы распространения звука. В первом случае полоса источника $\Delta f = 100 - 140$ Гц, приемники разнесены на горизонтальное расстояние $d_1 = 0.2$ км и удалены от источника на расстояния $r_1 = 3$ км и $r_2 = 3.2$ км. В точках приема поле источника формировалось тремя модами, $M = 3$. Во втором случае полоса источника $\Delta f_2 = 200 - 220$ Гц, приемники разнесены на горизонтальное расстояние $d_2 = 0.1$ км и удалены от источника на расстояния $r_1 = 2.5$ км и $r_2 = 2.6$ км. Число мод $M = 7$.

В случае маломодового режима время наблюдения $\Delta t_1 = 60$ с, при многомодовом режиме $-\Delta t_2 = 30$ с. Шумовое поле источника регистрировалось в течение $\Delta T = 3$ с, временной интервал между регистрациями $\delta T = 0.1$ с. Число временных отсчетов $J_{1,2} = \Delta t_{1,2}/(\Delta T + \delta t)$, по скалярной компоненте шумового поля предельное входное отношение $c/\pi q_{\text{lim}} = 1.5/J^2$ [2, 4]. Если входное отношение $c/\pi q \geq q_{\text{lim}}$, то значения пеленга и частотного сдвига близки реальным величинам. Влияние помехи на работоспособность алгоритма адаптации в статье не рассматривается, считая помеху равной нулю.

Частотные смещения (7), (8) и (11), (12) вычислялись корреляционным методом, что предполагает определение положения максимального пика: взаимокорреляционной функции спектров шумового источника между точками приема $Q_{1,2}$ для моментов времени $t = 0$, Δt

$$B_{12}(\delta f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} q_{Q_1}(f, t) s_{Q_2}(f + \delta f, t) df \quad (16)$$

и взаимокорреляционной функции спектров шумового источника в точках приема $Q_{1,2}$ за время наблюдения Δt

$$B_{1,2}(\delta f, \Delta t) = \int_{-\infty}^{\infty} q_{Q_{1,2}}(f, \Delta t) s_{Q_{1,2}}(f + \delta f, \Delta t) df, \quad (17)$$

т. е. $\max B_{12}(\delta f, 0) = B_{12}(\Omega_0)$, $\max B_{12}(\delta f, \Delta t) = B_{12}(\Omega_{\Delta t})$ и $\max B_{1,2}(\delta f, \Delta t) = B_{1,2}(\Omega_{1,2})$ [16]. Здесь $s_{Q_{1,2}}$ — спектр источника в точках приема $Q_{1,2}$ в момент времени t . Нормированные величины ниже обозначены сверху знаком «крышка».

Результаты моделирования маломодового режима приведены на рис. 2, 3.

На рис. 2 представлены интерферограммы и голограммы, регистрируемые приемниками $Q_{1,2}$. В точках приема наблюдается наложение двух фокальных пятен, в результате наблюдается только одно интенсивное пятно. Интерферограммы и голограммы в точках приема

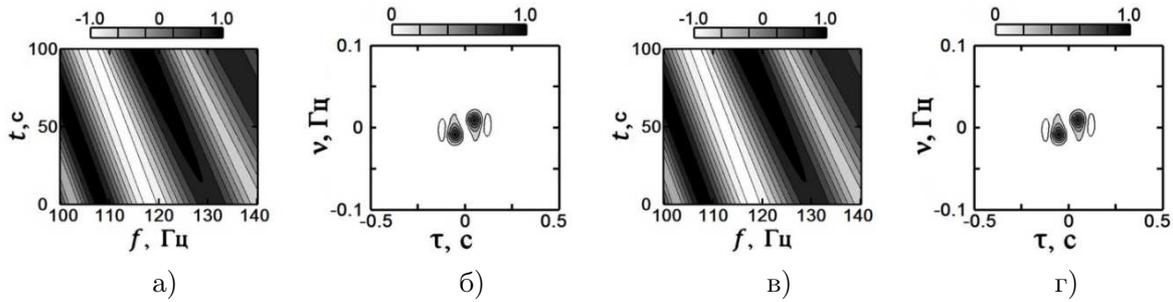


Рис. 2. Нормированные интерферограммы (а, в) и голограмма (б, г). Приемник Q_1 (а, б), приемник Q_2 (в, г). Маломодовый режим.

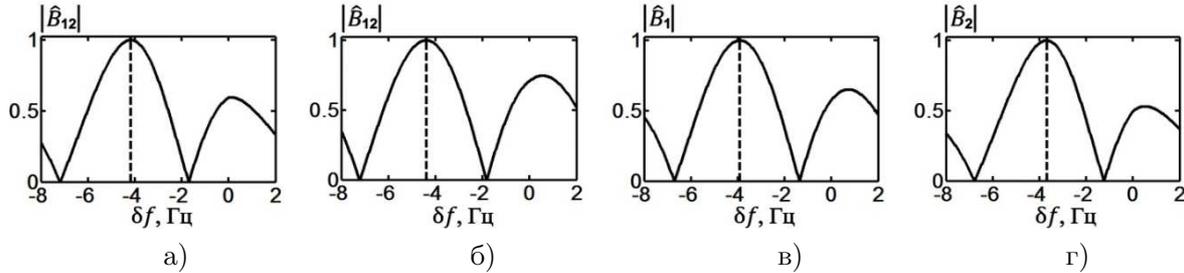


Рис. 3. Нормированные взаимокорреляционные функции спектров для частоты 200 Гц: $B_{12}(\delta f, 0)$ (а); $B_{12}(\delta f, \Delta t)$ (б); $B_1(\delta f, \Delta t)$ (в); $B_2(\delta f, \Delta t)$ (г). Вертикальным пунктиром обозначено положение основного максимума. Маломодовый режим.

различны. Расположение фокальных пятен показывает, что источник приближался к приемникам, т. е. радиальная скорость отрицательная. Рис. 3 демонстрирует поведение взаимокорреляционных функций (16), (17). Из рис. 3 (а, б) следует, что частотные смещения между точками приема для различных моментов времени равны $\Omega_0 = -4.17$ Гц, $\Omega_{\Delta t} = -4.42$ Гц. Кривые на рис. 3 (в, г) показывают, что в точках приема частотные смещения за время наблюдения составляют $\Omega_1 = -3.95$ Гц, $\Omega_2 = -3.70$ Гц. Воспользовавшись выражениями (14), (15) получаем оценки $\dot{r}_1 = 3.16$ км, $\dot{v} = -3.16$ м/с.

Результаты моделирования многомодового режима приведены на рис. 4, 5.

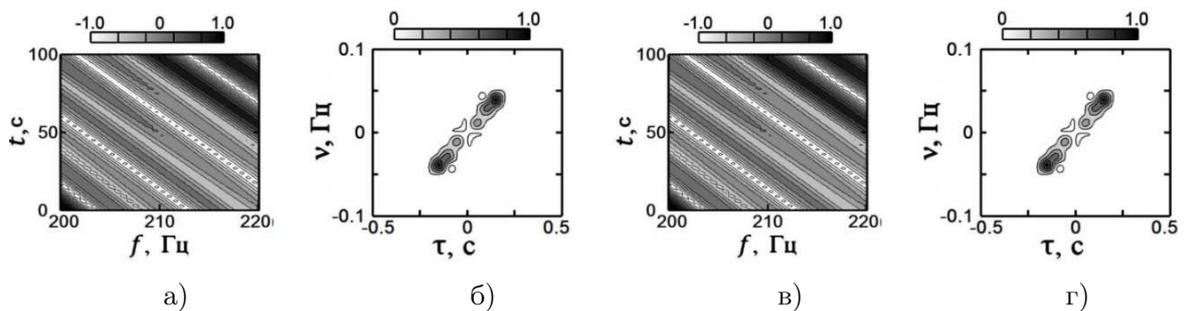


Рис. 4. Нормированные интерферограммы (а, в) и голограмма (б, г). Приемник Q_1 (а, б), приемник Q_2 (в, г). Многомодовый режим.

В силу малого расстояния между приемниками, интерферограмма и голограмма в точках приема практически идентичны. Перекрывание шести фокальных пятен приводит к формированию двух фокальных пятен, которые расплываются в полосу (рис. 4). На рис. 5 показаны взаимокорреляционные функции между токами приема в разные моменты времени (рис. 5 (а, б)) и в точках приема за время наблюдения (рис. 5 (в, г)). Обострение макси-

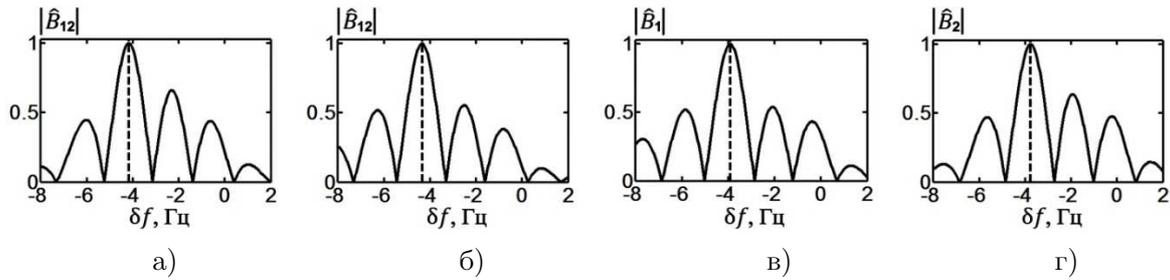


Рис. 5. Нормированные взаимокорреляционные функции спектров: $B_{12}(\delta f, 0)$ (а); $B_{12}(\delta f, \Delta t)$ (б); $B_1(\delta f, \Delta t)$ (в); $B_2(\delta f, \Delta t)$ (г). Вертикальным пунктиром обозначено положение основного максимума. Многомодовый режим.

мумов взаимокорреляционных функций по сравнению с маломодовым режимом связано с частотным масштабом изменчивости передаточной функции волновода. Из рис. 5 следует, что частотные смещения $\Omega_0 = -4.17$ Гц, $\Omega_{\Delta t} = -4.34$ Гц, $\Omega_1 = -3.92$ Гц, $\Omega_2 = -3.77$ Гц. Из (14), (15) получаем оценки $\dot{r}_1 = 2.61$ км, $\dot{\omega} = -3.55$ м/с.

Таким образом, в обоих случаях оценки удаления и радиальной скорости близки модельным значениям.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поиск адаптивных алгоритмов, позволяющих получать приемлемое решение обратной задачи в условиях априорной неопределенности о гидроакустических характеристиках акватории, в рамках интерферометрической обработки привел к выработке двух вариантов (амплитудного и фазового) адаптации. Результаты численного эксперимента реализации алгоритмов адаптации, на наш взгляд, оставляют мало сомнений в перспективности намеченного направления. Однако только со временем выяснится, насколько успешно эти варианты могут применяться на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, Г. Н. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море / Г. Н. Кузнецов, В. М. Кузькин, С. А. Пересёлков // Акуст. журн. — 2017. — Т. 63, № 4. — С. 406–418.
2. Noise source localization shallow water // G. N. Kuznetsov, V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, I. V. Kaznacheev J. Phys. Wave Phenom. — 2017. — V. 25, № 2. — P. 156–163.
3. Interferometric method for estimating the velocity of a noise sound source and the distance to it in shallow water using a vector-scalar receiver / G. N. Kuznetsov et. al. // J. Phys. Wave Phenom. — 2017. — V. 25, № 4. — P. 299–306.
4. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником / И. В. Казначеев, Г. Н. Кузнецов, В. М. Кузькин, С. А. Пересёлков // Акуст. журн. — 2018. — Т. 64, № 1. — С. 33–45.
5. Interferometric direction finding by a vector-scalar receiver / V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, G. N. Kuznetsov, I. A. Kaznacheev // Phys. Wave Phenom. — 2018. — V. 26, № 1. — P. 63–73.
6. Метод определения местоположения малозумного источника звука / В. М. Кузькин, С. А. Пересёлков, И. В. Казначеев, С. А. Ткаченко // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2018. — № 2. — С. 53–63.
7. Direction finding of a noise sound source / G. N. Kuznetsov et. al. // Phys. Wave Phenom. — 2019. — V. 27, № 3. — P. 237–241.
8. Гудмен, Дж. Введение в Фурье-оптику / Дж. Гудмен. — М. : Мир, 1970. — 364 с.

9. Сазонтов, А. Г. Согласованная пространственная обработка сигналов в подводных звуковых каналах (Обзор) / А. Г. Сазонтов, А. И. Малеханов // Акуст. журн. — 2015. — Т. 61, № 2. — С. 233–253.
10. Measurement capability of the interferometric method of sound source localization in the absence of data on the waveguide transfer function / E. S. Kaznacheeva et. al. // Phys. Wave Phenom. — 2019. — V. 27, № 1. — P. 73–78.
11. Кузькин, В. М. Реализация адаптивного интерферометрического метода локализации источника звука. I Часть / В. М. Кузькин, С. А. Пересёлков, С. А. Ткаченко // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2018. — № 2. — С. 53–63.
12. Бреховских, Л. М. Теоретические основы акустики океана / Л. М. Бреховских, Ю. П. Лысанов. — М. : Наука, 2007. — 370 с.
13. Кузькин, В. М. Пространственная интерференция нормальных волн в океанических волноводах / В. М. Кузькин, М. В. Куцов, С. А. Пересёлков // Акуст. журн. — 2014. — Т. 60, № 4. — С. 376–383.
14. Кузькин, В. М. О чувствительности мониторинга, основанного на измерении частотных смещений интерференционной структуры звукового поля / В. М. Кузькин, В. Д. Опшенгейм, С. А. Пересёлков // Акуст. журн. — 2008. — Т. 54, № 2. — С. 267–271.
15. Белов, А. И. Оценка акустических характеристик поверхностных слоев морского дна с использованием четырехкомпонентных векторно-скалярных приемников / А. И. Белов, Г. Н. Кузнецов // Акуст. журн. — 2016. — Т. 62, № 2. — С. 194–202.
16. Кузькин, В. М. Корреляционный метод измерения частотных сдвигов максимумов звукового поля, вызванных возмущениями океанической среды / В. М. Кузькин, А. А. Луньков, С. А. Пересёлков // Акуст. журн. — 2010. — Т. 56, № 5. — С. 655–661.

REFERENCES

1. Kuznetsov G. N., Kuz'kin V. M., Pereselkov S. A. Spectrograms and localization of sound source in shallow sea. [Kuznecov G.N., Kuz'kin V.M., Peresyolkov S.A. Spektrogramma i lokalizaciya istochnika zvuka v melkom more]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2017, vol. 63, no. 4, pp. 406–418.
2. Kuznetsov G. N., Kuz'kin V. M., Pereselkov S. A., Kaznacheev I. V. Noise source localization shallow water. *Phys. Wave Phenom.* 2017, vol. 25, no. 2, pp. 156–163.
3. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznacheev I.V., Grigor'ev V.A. Interferometric method for estimating the velocity of a noise sound source and the distance to it in shallow water using a vector-scalar receiver. *Phys. Wave Phenom.* 2017, vol. 25, no. 4, pp. 299–306.
4. Kaznacheev I.V., Kuznetsov G.N., Kuzkin V.M., Pereselkov S.A. Interferometric method of detection of a moving sound source by a vector-scalar receiver. [Kaznacheev I.V., Kuznecov G.N., Kuz'kin V.M., Peresyolkov S.A. Interferometricheskij metod obnaruzheniya dvizhushhegosya istochnika zvuka vektorno-skalyarnym priemnikom]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2018, vol. 64, no. 1, pp. 33–45.
5. Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kuznetsov G.N., Kaznacheev I.A. Interferometric direction finding by a vector-scalar receiver. *Phys. Wave Phenom.* 2018, vol. 26, no. 1, pp. 63–73.
6. Kuzkin V.M., Pereselkov S.A., Kaznacheev I.V., Tkachenko S.A. Method of determining the location of a low-noise sound source. [Kuz'kin V.M., Peresyolkov S.A., Kaznacheev I.V., Tkachenko S.A. Metod opredeleniya mestopolozheniya maloshumnogo istochnika zvuka]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2018, no. 2, pp. 53–63.
7. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Lyakhov G.A., Pereselkov S.A., Prosovetskiy D.Yu. Direction finding of a noise sound source. *Phys. Wave Phenom.* 2019, vol. 27, no. 3, pp. 237–241.

8. Goodman George. Introduction to Fourier optics. [Gudmen Dzh. Vvedenie v Fur'e-optiku]. Moscow: Mir. 1970, 364 p.
9. Sazontov A.G., Malekhanov A.I. Coordinated spatial signal processing in underwater sound channels (Review). [Sazontov A.G., Malekhanov A.I. Soglasovannaya prostranstvennaya obrabotka signalov v podvodnykh zvukovykh kanalakh (Obzor)]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2015, vol. 61, no. 2, pp. 233–253.
10. Kaznacheeva E.S., Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Lyakhov G.A., Pereselkov S.A. Measurement capability of the interferometric method of sound source localization in the absence of data on the waveguide transfer function. *Phys. Wave Phenom.* 2019, vol. 27, no. 1, pp. 73–78.
11. Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Tkachenko S.A. Implementation of adaptive interferometric method of localization of the sound source. I Part. [Kuz'kin V.M., Peresyolkov S.A., Tkachenko S.A. Realizaciya adaptivnogo interferometricheskogo metoda lokalizacii istochnika zvuka. I Chast']. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2018, no. 2, pp. 53–63.
12. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. Theoretical bases of ocean acoustics. [Brexovskix L.M., Lysanov Yu.P. Teoreticheskie osnovy akustiki okeana]. Moscow: Nauka, 2007, 370 p.
13. Kuzkin V.M., Kutsov M.V., Pereselkov S.A. The Spatial interference of normal waves in oceanic waveguides. [Kuz'kin V.M., Kucov M.V., Peresyolkov S.A. Prostranstvennaya interferenciya normal'nyx voln v okeanicheskix volnovodax]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2014, vol. 60, no. 4, pp. 376–383.
14. Kuz'kin V.M., Oppenheim V.D., Pereselkov S.A. On the sensitivity of monitoring based on measurement of the frequency offsets of the interference structure of a sound field. [Kuz'kin V.M., Oppengejym V.D., Peresyolkov S.A. O chuvstvitel'nosti monitoringa, osnovannogo na izmerenii chastotnyx smeshheniy interferencionnoj struktury zvukovogo polya]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2008, vol. 54, no. 2, pp. 267–271.
15. Belov A.I., Kuznetsov G.N. Estimation of acoustic characteristics of the surface layers of the seabed by using four-component vector-scalar receivers. [Belov A.I., Kuznecov G.N. Ocenka akusticheskix charakteristik poverxnostnyx sloev morskogo dna s ispol'zovaniem chetyrekhkomponentnyx vektorno-skalyarnyx priemnikov]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no. 2, pp. 194–202.
16. Kuz'kin V.M., Lunkov A.A., Pereselkov S.A. Correlation method of measurements of frequency shifts of sound field peaks, caused by perturbations of oceanic environment. [Kuz'kin V.M., Lun'kov A.A., Peresyolkov S.A. Korrelyacionnyj metod izmereniya chastotnyx sdvigoj maksimumov zvukovogo polya, vyzvannykh vozmushheniyami okeanicheskoy sredy]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2010, vol. 56, no. 5, pp. 655–661.

*Кузькин Венидикт Михайлович, доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, НЦВИ ИОФ РАН, Москва, Россия
E-mail: +7(499)503-83-84
Тел.: kumiov@yandex.ru*

*Kuz'kin Venedikt Mikhailovich, Chief researcher, Wave Research Center, GPI RAS, Moscow, Russia
E-mail: +7(499)503-83-84
Tel.: kumiov@yandex.ru*

*Пересёлков Сергей Алексеевич, доктор физ.-мат. наук, заведующий кафедрой математической физики и информационных технологий ВГУ, Воронеж, Россия
E-mail: +7(473)220-87-48
Тел.: pereselkov@yandex.ru*

*Pereselkov Sergey Alexeevich, Head of the Department of Mathematical Physics and Information Technology, Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: +7(473)220-87-48
Tel.: pereselkov@yandex.ru*

Ткаченко Сергей Александрович, аспирант кафедры математической физики и информационных технологий ВГУ, Воронеж, Россия

E-mail: +7(473)220-87-48

Тел.: sega-tk@mail.ru

Tkachenko Sergey Alexanderovich, Postgraduate Student Department of Mathematical Physics and Information Technology, Voronezh State University, Voronezh, Russia

E-mail: +7(473)220-87-48

Tel.: sega-tk@mail.ru

Казначеев Илья Викторович, инженер кафедры математической физики и информационных технологий ВГУ, Воронеж, Россия

E-mail: +7(473)220-87-48

Тел.: kaznacheev.ilya@gmail.com

Kaznacheev Ilya Viktorovich, Engineer Department of Mathematical Physics and Information Technology, Voronezh State University, Voronezh, Russia

E-mail: +7(473)220-87-48

Tel.: kaznacheev.ilya@gmail.com