

# РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА ЗВУКА. I ЧАСТЬ

В. М. Кузькин<sup>1</sup>, С. А. Пересёлков<sup>2</sup>, П. В. Рыбьянец<sup>2</sup>, С. А. Ткаченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> — *Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской Академии Наук*; <sup>2</sup> — *Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 30.08.2019 г.

**Аннотация.** Представлены результаты численного эксперимента апробации амплитудного варианта адаптации для интерферометрического метода локализации источника звука. Под адаптацией 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.

Продемонстрировано влияние перекрытия фокальных пятен на работоспособность метода адаптации. Результаты численного моделирования на малых расстояниях, когда фокальные пятна голограмм перекрываются, продемонстрировали работоспособность амплитудного варианта метода адаптации интерферометрической обработки в условиях отсутствия знаний о гидроакустических характеристиках акватории. Вполне возможно, что на больших расстояниях, где фокальные пятна разрешаются, работоспособность метода адаптации улучшится, что позволит уменьшить погрешность определения параметров источника. Данный подход позволит значительно расширить область применения интерферометрической обработки в задачах идентификации малозумных источников звука, не доступной для обычных методов обработки.

**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 I

V. M. Kuzkin, S. A. Pereselkov, P. V. Rybyanets, S. A. Tkachenko

**Abstract.** Results of numerical experiment of approbation of amplitude method of adaptation for interferometric method of sound source localization are presented. Adaptation is understood as a variation of parameters of interferometric processing depending on the propagation conditions, aimed on the achieving an optimal determination of the radial velocity and source range. These variation, implemented at the source detection, allow us to determine the differences of the wave horizontal numbers and their derivatives in frequency for different combinations of modes at small input signal–noise ratios.

The influence of focal spot overlapping on the efficiency of the adaptation method is demonstrated. The results of numerical simulation at short distances, when the focal spots of holograms overlapping, demonstrated the efficiency of the amplitude method of adaptation of interferometric processing at the absence of knowledge about the hydroacoustic characteristics of the environment propagation. It is possible that at large ranges, where focal spots are resolved, the efficiency of the adaptation method will improve. That reduces the error in

determining of source parameters. This approach will expand significantly the efficiency of interferometric processing in the identification of low-noise sound sources, which is not available for traditional methods of processing.

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

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Поиск информативных технологий обработки гидроакустической информации, обладающих высокой помехоустойчивостью и малой чувствительностью к пространственно-временным вариациям параметров океанической среды, привел к созданию интерферометрической обработки [1–7]. Локализация малозумных широкополосных источников звука — одно из наиболее интересных и многообещающих применений такой обработки. Она основана на когерентном накоплении спектральной интенсивности вдоль локализованных полос интерференционной картины (интерферограммы), формируемых шумовым источником, которая далее подвергается двукратному преобразованию Фурье. На выходе интегрального преобразования спектральная плотность концентрируется в узкой полосе в форме фокальных пятен. В отличие от шумового сигнала, накопление помехи вдоль полос интерферограммы не когерентно и помеха распределена по всей области двумерного интегрального преобразования.

Результат двукратного преобразования Фурье интерферограммы можно назвать голограммой Фурье [8], поскольку оно осуществляет запись и восстановление волнового фронта. Восстановление изображения достигается фильтрацией на голограмме двумерной спектральной плотности источника с последующим применением к ней двумерного обратного преобразования Фурье. Такая очистка сигнала источника от помехи не требует знания о характере сигнала, помехи и передаточной функции среды распространения. Высокая помехоустойчивость обработки объясняется когерентным накоплением шумового поля вдоль интерференционных полос и локализацией спектральной интенсивности на голограмме. Слабая чувствительность обработки к изменениям характеристик среды обусловлена тем, что решение обратной задачи зависит от разности волновых чисел и их производных по частоте, а не от собственных значений волновых чисел и их производных.

Между тем, чтобы интерферометрическая обработка стала применима везде, она должна быть адаптирована к изменяющимся условиям распространения волнового поля источника и работоспособна в условиях, не требующих знания о передаточной функции волновода. В работе [9] представлены два варианта (амплитудный и фазовый) метода адаптации, которые решают проблему идентификации малозумного источника в акваториях, в которых невозможно проведение акустической калибровки и отсутствует априорная информация о гидроакустических характеристиках. Разрабатывая адаптивные методы локализации источников, важно понимать, что любой подход имеет определенные ограничения, которые кроются в природе самих явлений. Только со временем выяснится, насколько успешно методы адаптации могут применяться на практике.

В настоящей статье представлены результаты численного моделирования амплитудного варианта адаптации интерферометрической обработки. Продемонстрировано влияние перекрытия фокальных пятен на работоспособность метода адаптации.

## 2. ГОЛОГРАММА

На голограмме Фурье двумерная спектральная плотность  $F(\tau, \tilde{\nu})$  поля источника локализована на плоскости  $(\tau, \tilde{\nu})$  в виде фокальных пятен, вызванных интерференцией мод разных номеров, зеркально перевернутых относительно начала координат [1–7]. Здесь  $\tau$  и  $\tilde{\nu} = 2\pi\nu$  — время и циклическая частота. Они расположены в первом и третьем квадрантах, если ра-

диальная скорость (проекция скорости в направлении на приемник)  $w < 0$ , т. е. источник приближается к приемнику и во втором и четвертом квадрантах ( $w > 0$ ), когда источник удаляется от приемника. Область локализации содержит  $(M - 1)$  основных максимумов с координатами  $(\tau_\mu, \tilde{\nu}_\mu)$ , расположенными на прямой  $\tilde{\nu} = \tilde{\varepsilon}\tau$ , где  $M$  — число мод, формирующих поле,  $\mu = 1, 2, \dots, M - 1$  — номер фокального пятна. Ближайший к началу координат пик обусловлен интерференцией соседних мод и расположен в точке  $(\tau_1, \tilde{\nu}_1)$ . Координаты соседнего пика, вызванного интерференцией мод номеров  $(m, m + 2) - (\tau_2, \tilde{\nu}_2)$ . Наконец, координаты самого удаленного пика, обусловленного интерференцией первой и последней моды —  $(\tau_{M-1}, \tilde{\nu}_{M-1})$ . В точках с координатами  $(\tau_\mu, \tilde{\mu}_\mu)$  суммируются  $(M - \mu)$  основных пиков.

Положения основных максимумов фокальных пятен пропорциональны радиальной скорости  $w$  и удалению  $r$  источника от приемника

$$\dot{w} = -2\pi\kappa_{w\mu}\nu_\mu, \tag{1}$$

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

где

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

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

— коэффициенты, определяющие пространственные и частотные масштабы изменчивости передаточной функции волновода [10]. Здесь  $t_*$  — выделенный момент времени на интервале наблюдения  $\Delta t$  интерферограммы,  $0 < t_* \leq \Delta t$ ;  $h_{mn} = h_m - h_n$ ,  $h_m$  — горизонтальное волновое число  $m$ -й моды;  $\omega_0$  — средняя частота ширины  $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$  спектра источника. 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.

Два соседних фокальных пятна по критерию Рэлея [8] разрешимы, если их положения максимумов расходятся более чем на полуширину пятна, что сводится к неравенствам

$$\Delta\omega r \left| \frac{\overline{dh_{m(m+\mu)}(\omega_0)}}{d\omega} - \frac{\overline{dh_{m(m+\mu+1)}(\omega_0)}}{d\omega} \right| \geq 2\pi, \tag{5}$$

$$\Delta t |w| \left| \overline{h_{m(m+\mu)}(\omega_0)} - \overline{h_{m(m+\mu+1)}(\omega_0)} \right| \geq 2\pi. \tag{6}$$

Увеличение расстояния, ширины полосы, радиальной скорости, времени наблюдения и средней частоты спектра влечет повышение разрешающей способности интерферометрической обработки. Последнее связано с тем, что при возрастании частоты групповые скорости мод асимптотически стремятся к постоянному значению, не зависящему от номера моды [10]. Если условия (5), (6) не соблюдаются, то соседние фокальные пятна накладываются друг на друга, их максимумы расплываются, и погрешности определения радиальной скорости и удаленности источника возрастают.

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 [1–4]. Второй, наиболее важный источник погрешности параметров источника — неточность модельных коэффициентов (3), (4) относительно реальных значений. Именно от выбора их величин и зависит в основном успех интерферометрической обработки.

### 3. АМПЛИТУДНЫЙ ВАРИАНТ АДАПТАЦИИ

Под адаптацией интерферометрического метода локализации источника понимается возможность определения коэффициентов (3), (4) посредством измерения связанных с ними величин на фоне малого входного отношения сигнал/помеха (с/п) в отсутствие знания о передаточной функции волновода. В работе [9] предложены два варианта адаптации (амплитудный и фазовый), реализуемые на основе измерений пеленга [5–7] и частотного сдвига интерференционного максимума волнового поля [11, 12] между двумя приемниками  $Q_1$  и  $Q_2$ , разнесенными на горизонтальное расстояние  $d$  (рис. 1).

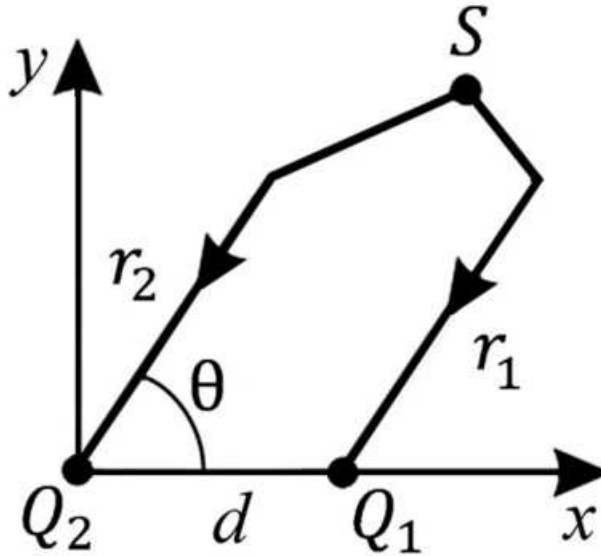


Рис. 1. Схема расположения источника  $S$  и приемников  $Q_{1,2}$ .

Амплитудный вариант основан на представлении модулей голограмм приемников, чувствительных к удалению источника. Разность расстояний источника до приемников, полагая  $r_1, r_2 \gg d$ , равна  $\Delta r = d \cos \theta$ , где  $\theta$  – пеленг. Тогда из (2), (4) получаем

$$d \cos \theta = \kappa_{r\mu} \Delta \tau_{\mu}, \quad (7)$$

где  $\Delta \tau_{\mu} = \tau_{\mu 1} - \tau_{\mu 2}$  – разность координат основного максимума  $\mu$ -го фокального пятна в точках наблюдения. Соотношение (6) позволяет определить  $\kappa_{r\mu}$  по измеренным величинам  $\theta$  и  $\Delta \tau_{\mu}$ , и тем самым оценить расстояния  $r_1$  и  $r_2$ . Частотный сдвиг интерференционного максимума между точками наблюдения равен [13]

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

откуда, используя (2), (7), получаем

$$\kappa_{w\mu} = \frac{d \cos \theta}{2\pi \Omega \tau_{\mu 1}}. \quad (9)$$

Таким образом, уравнения (7), (9) дают возможность определять  $\kappa_{r\mu}$  и  $\kappa_{w\mu}$ , если величины  $\theta$ ,  $\Delta \tau_{\mu}$ ,  $\Omega$  и  $\tau_{\mu 1}$  известны. Вариант применим, если  $|\Omega| \leq \Delta f$  и  $|\Delta \tau_{\mu}| \Delta f \geq 1$ . Применимость подхода облегчается с увеличением номера фокального пятна и ширины спектра.

#### 4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Использовался модельный волновод, близкий по характеристикам экспериментальному каналу [14]. 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  $\theta = 0$ . Время наблюдения  $\Delta t = 100$  с. Шумовое поле источника регистрировалось в течение  $\Delta T = 5$  с, временной интервал между регистрациями  $\delta T = 0.1$  с. Число временных точек отсчета  $J \cong 19$ , так что по скалярной компоненте поля предельное входное отношение  $c/p$   $q_{lim} \cong 4.15 \times 10^{-3}$  [2, 4]. Влияние помехи на работоспособность алгоритма адаптации в статье не рассматривалось, так как вопросы измерения пеленга и частотного сдвига при малом входном отношении  $c/p$  рассмотрены в работах [5–7]: если входное отношение  $c/p$   $q \geq q_{lim}$ , то значения пеленга и частотного сдвига близки реальным величинам.

Моделировались маломодовый и многомодовый режимы распространения звука. В первом случае полоса источника  $\Delta f_1 = 100 - 140$  Гц, приемники разнесены на горизонтальное расстояние  $d_1 = 1$  км и в начальный момент времени удалены от источника на расстояния  $r_1 = 3$  км и  $r_2 = 4$  км. Горизонтальные волновые числа мод и их производные по частоте на средней частоте спектра  $f_1 = 120$  Гц приведены в табл. 1. Во втором случае полоса источника  $\Delta f_2 = 200 - 220$  Гц, приемники разнесены на горизонтальное расстояние  $d = 0.5$  км и в начальный момент времени удалены от источника на расстояния  $r_1 = 2.5$  км и  $r_2 = 3$  км. Горизонтальные волновые числа мод и их производные по частоте на средней частоте спектра  $f_2 = 210$  Гц приведены в табл. 2. В обоих случаях, согласно (5), как следует из табл. 1, 2, соседние фокальные пятна не разрешаются. Для регистрации частотного сдвига между точками приема применялся корреляционный метод [12]. Нормированные величины ниже обозначены сверху знаком “крышка”.

Таблица 1. Горизонтальные волновые числа  $h_m$  и их производные на частоте  $f_1 = 120$  Гц.

Номера мод, $m$	1	2	3
$h_m, \text{м}^{-1}$	0.4265	0.4168	0.3997
$dh_m/d\omega,$ с/М	$6.840 \times 10^{-4}$	$6.967 \times 10^{-4}$	$7.217 \times 10^{-4}$

Таблица 2. Горизонтальные волновые числа  $h_m$  и их производные на частоте  $f_2 = 210$  Гц.

Номера мод, $m$	1	2	3	4	5	6	7
$h_m, \text{м}^{-1}$	0.8552	0.8499	0.8408	0.8279	0.8107	0.7892	0.7631
$dh_m/d\omega,$ с/М	$6.815 \times 10^{-4}$	$6.852 \times 10^{-4}$	$6.918 \times 10^{-4}$	$7.016 \times 10^{-4}$	$7.152 \times 10^{-4}$	$7.330 \times 10^{-4}$	$7.543 \times 10^{-4}$

Результаты моделирования маломодового режима приведены на рис. 2–4. 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 пятно. Координаты пика фокального пятна  $\tau_1 = 5.24 \times 10^{-2}$  с,  $\nu_1 = 6.47 \times 10^{-3}$  Гц.

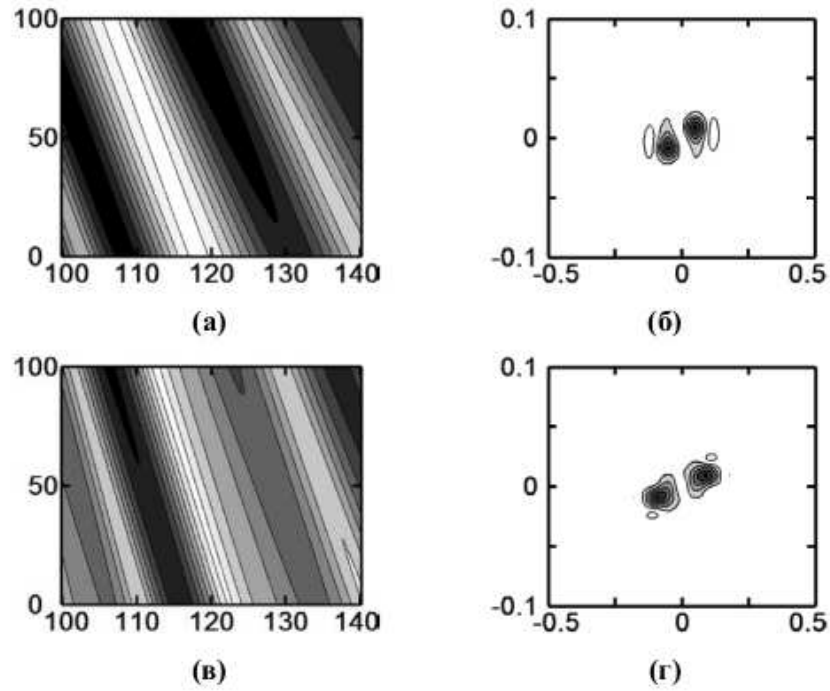


Рис. 2. Нормированные интерферограммы (а, в) и голограмма (б, г). Приемник  $Q_1$  (а, б), приемник  $Q_2$  (в, г). Маломодовый режим.

Рисунок 3 демонстрирует разрезы фокального пятна модулей голограмм  $F(\tau)$  вдоль оси времени  $\tau$ . Кривые рис. 3 показывают, что разность координат основного максимума фокального пятна в точках наблюдения  $\Delta\tau_1 = 1.55 \times 10^{-2}$  с. Согласно (7) получаем  $\kappa_{r1} = 6.46 \times 10^4$  м/с, так что в соответствии (2) начальное удаление приемника  $Q_1$  от источника  $S$  оценивается как  $\dot{r}_1 = 3.38$  км. Для начального момента времени на рис. 4 приведен модуль пространственной взаимокорреляционной функции спектров шумового источника в точках приема  $Q_{1,2}$

$$B(\delta f) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{Q_1}(f)u_{Q_2}(f + \delta f) df. \quad (10)$$

За оценку частотного сдвига  $\Omega$  между приемниками принимается положение максимального пика (10), т. е.  $\max B(\delta f) = B(\Omega)$  [12]. Из рис. 4 следует, что  $\Omega = -37.02$  Гц. Тогда, используя (9), находим  $\kappa_{w1} = 82.11$  м. Воспользовавшись выражением (1), для радиальной скорости, получаем оценку  $\dot{w} = -3.34$  м/с. Максимальная систематическая ошибка в определении дальности равна  $\max |\dot{w}t_*| = 0.33$  км.

Результаты моделирования многомодового режима приведены на рис. 5–7. Перекрывание шести фокальных пятен приводит к формированию двух выраженных фокальных пятен (рис. 5). Координаты максимального пика (второе фокальное пятно) голограммы приемника  $Q_1$  равны  $\tau_2 = 1.74 \times 10^{-1}$  с,  $\nu_2 = 4.12 \times 10^{-2}$  Гц (рис. 5б). Из рис. 6, на котором показаны разрезы фокальных пятен голограмм  $F(\tau)$  вдоль оси времени  $\tau$ , следует, что разность координат основного максимума второго фокального пятна  $\Delta\tau_2 = 4.17 \times 10^{-2}$  с. В этом случае, согласно (7),  $\kappa_{r2} = 1.20 \times 10^4$  м/с, и, используя (2), получаем оценку начального удаления приемника  $Q_1$  от источника  $\dot{r}_1 = 2.09$  км. На рис. 7 приведена нормированная зависимость модуля (10), откуда следует значение частотного сдвига  $\Omega = -39.67$  Гц. Согласно (9) и (1) находим  $\kappa_{w2} = 11.53$  м и  $\dot{w} = -2.98$  м/с. Максимальная систематическая ошибка  $\max |\dot{w}t_*| = 0.30$  км.

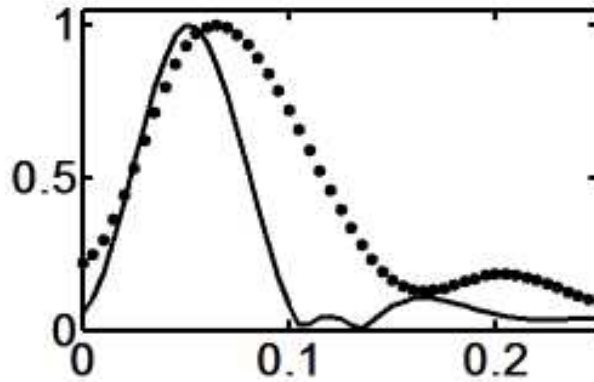


Рис. 3. Нормированный разрез фокального пятна вдоль оси времени  $\tau$ . Сплошная линия – приемник  $Q_1$ , пунктирная линия – приемник  $Q_2$ . Маломодовый режим.

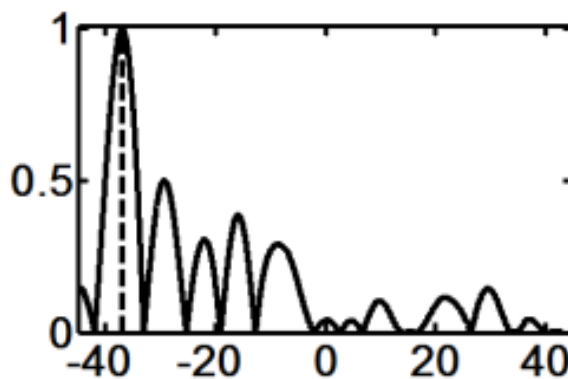


Рис. 4. Нормированная пространственная взаимокорреляционная функция спектров. Вертикальный пунктир – положение основного максимума. Маломодовый режим.

Таким образом, даже на малых расстояниях, когда перекрываются фокальные пятна, амплитудный вариант адаптации интерферометрической обработки позволяет в отсутствии информации о передаточной функции среды получать оценки радиальной скорости и удаления близкие реальным значениям. Погрешность определения удаления источника сравнима с неконтролируемой систематической ошибкой. С увеличением частоты погрешность оценки радиальной скорости уменьшается.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы разработки адаптивных алгоритмов локализации малошумных источников остаются одной из слабо разработанных проблем. Трудности подхода к ее решению вытекают из ограниченности применяемых методов обработки гидроакустической информации, в частности, методов согласованного поля. Применительно к развиваемому авторами методу интерферометрической обработки, свободной от многих недостатков методов обработки гидроакустических сигналов, согласованных со средой распространения, были недавно предложены два варианта (амплитудный и фазовый) адаптивного алгоритма. Он оптимальным образом приспособлен к работе в условиях пространственно-временной изменчивости характеристик среды распространения. Результаты численного моделирования на малых расстояниях, когда фокальные пятна голограмм перекрываются, продемонстрировали работоспособность амплитудного варианта метода адаптации интерферометрической обработки в условиях отсутствия

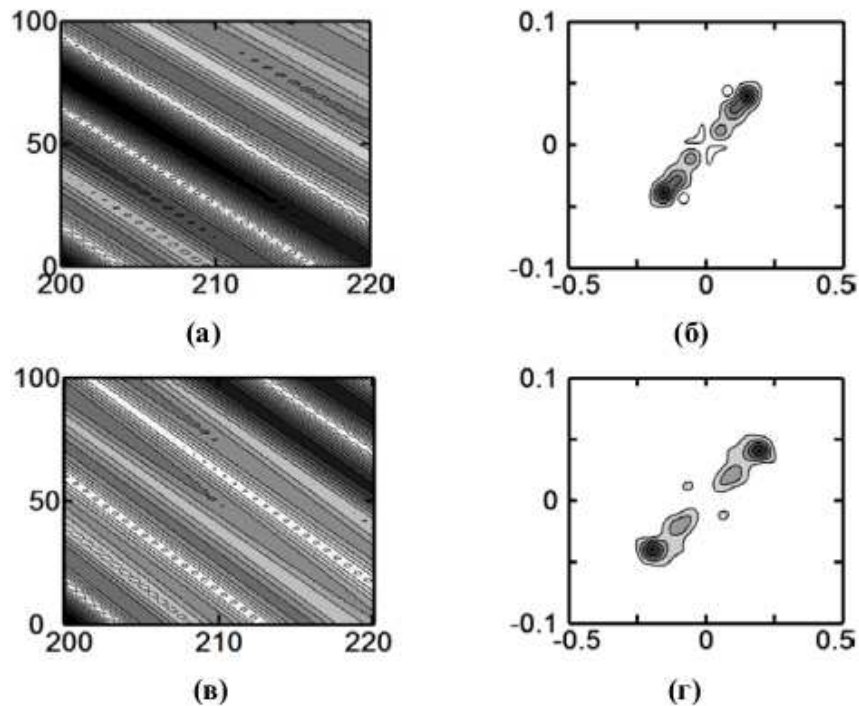


Рис. 5. Нормированные интерферограммы (а, в) и голограмма (б, г). Приемник  $Q_1$  (а, б), приемник  $Q_2$  (в, г). Многомодовый режим.

знаний о гидроакустических характеристиках акватории. Вполне возможно, что на больших расстояниях, где фокальные пятна разрешаются, работоспособность метода адаптации улучшится, что позволит уменьшить погрешность определения параметров источника. Это позволит значительно расширить область применения интерферометрической обработки в задачах идентификации малозумных источников звука, не доступной для обычных методов обработки.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект 19-08-00941, проект 19-29-06075) и Программы президиума РАН № 5 “Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов”.

## 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,



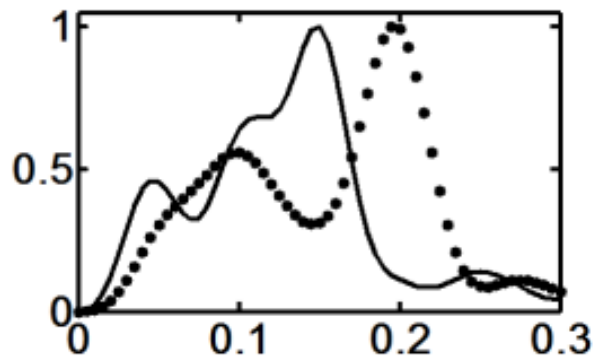


Рис. 6. Нормированный разрез фокальных пятен вдоль оси времени  $\tau$ . Сплошная линия —  $Q_1$ , пунктирная линия —  $Q_2$ . Многомодовый режим.

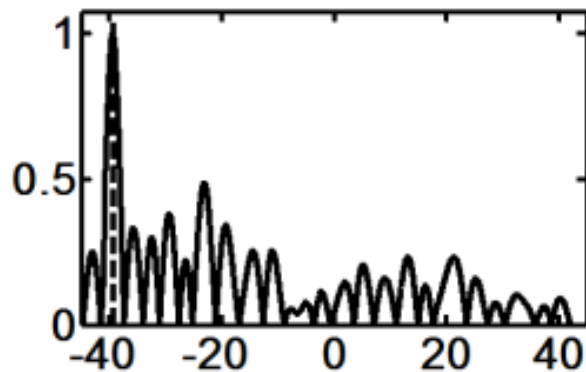


Рис. 7. Нормированная пространственная взаимокорреляционная функция спектров. Вертикальный пунктир — положение основного максимума. Многомодовый режим.

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. Строук, Дж. Введение в когерентную оптику и голографию / Дж. Строук. — М. : Мир, 1967. — 348 с.

9. 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.

10. Бреховских, Л. М. Теоретические основы акустики океана / Л. М. Бреховских, Ю. П. Лысанов. — М. : Наука, 2007. — 370 с.

11. Кузькин, В. М. Методы регистрации частотных смещений интерференционной структуры звукового поля в океанических волноводах / В. М. Кузькин, С. А. Пересёлков // Акуст. журн. — 2010. — Т. 56, № 4. — С. 505–515.

12. 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.

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. 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.

## 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. *J. 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. *J. 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. Georg W. Stroke. Introduction to coherent optics and holography. [Strouk Dzh. Vvedenie v kogerentnuyu optiku i golografiyu]. Moscow: Mir, 1967, 348 p.
9. 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.
10. 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.
11. Kuzkin V. M., Volkov S. A. methods of registration of frequency displacements of the interference structure of the sound field in ocean waveguides. [Kuz'kin V.M., Peresyolkov S.A. Metody registracii chastotnyx smeshhenij interferencionnoj struktury zvukovogo polya v okeanicheskix volnovodax]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2010, vol. 56, no. 4, pp. 505–515.
12. Kuzkin V.M., Lunkov A.A., Volkov S.A. Correlation method for measuring frequency shifts of sound field maxima caused by disturbances of the oceanic environment. [Kuz'kin V.M., Lun'kov A.A., Peresyolkov S.A. Korrelyacionnyj metod izmereniya chastotnyx sdvigoj maksimumov zvukovogo polya, vyzvannyx vozmushheniyami okeanicheskoy sredy]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2010, vol. 56, no. 5, pp. 655–661.
13. Kuzkin M.V., Kutsov S.A. 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. 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., Kuznetsov G.N. Оценка акустических характеристик поверхностных слоев морского дна с использованием четырехкомпонентных векторно-скалярных приемников]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no. 2, pp. 194–202.

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

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

Пересёлков Сергей Алексеевич, доктор физ.-мат. наук, заведующий кафедрой математической физики и информационных технологий ВГУ, Воронеж, Россия  
E-mail: pereselkov@yandex.ru

Pereselkov Sergey Alexeevich, Head of the Department of Mathematical Physics and Information Technology, Voronezh State University, Voronezh, Russia  
E-mail: pereselkov@yandex.ru

Ткаченко Сергей Александрович, аспирант кафедры математической физики и информационных технологий ВГУ, Воронеж, Россия  
E-mail: sega-tk@mail.ru  
Тел.: +7(473)220-87-48

Tkachenko Sergey Alexanderovich, Postgraduate Student Department of Mathematical Physics and Information Technology, Voronezh State University, Voronezh, Russia  
E-mail: sega-tk@mail.ru  
Tel.: +7(473)220-87-48

Рыбьянец Павел Викторович, аспирант кафедры математической физики и информационных технологий ВГУ, Воронеж, Россия  
E-mail: pavel-rybjanec@rambler.ru  
Тел.: +7(473)220-87-48

Rybyanets Pavel Viktorovich, Postgraduate Student Department of Mathematical Physics and Information Technology, Voronezh State University, Voronezh, Russia  
E-mail: pavel-rybjanec@rambler.ru  
Tel.: +7(473)220-87-48