

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННЫ*

В. М. Кузькин¹, Ю. В. Матвиенко², С. А. Пересёлков³, Е. С. Казначеева³

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

² – *Институт проблем морских технологий ДВО Российской Академии Наук;*

³ – *Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 12.02.2020 г.

Аннотация. Рассмотрена интерферометрическая обработка гидроакустической информации с применением вертикальной линейной антенны. В основе обработки лежит временное когерентное накопление спектральной интенсивности вдоль локализованных полос, которая далее подвергается двукратному преобразованию Фурье. На выходе интегрального преобразования спектральная плотность (голограмма), локализуется в узкой полосе в форме фокальных пятен, обусловленных интерференцией мод различных номеров, обеспечивая высокую помехоустойчивость. В работе получено выражение для двумерной спектральной плотности голограммы на выходе антенны, формируемой движущимся источником. Проанализировано распределения спектральной плотности, определяющие коэффициент усиления и помехоустойчивость обработки. Получено выражение для входного отношения с/п на элементе антенны, когда обеспечивается устойчивое обнаружение и оценки пеленга, радиальной скорости (проекция скорости в направлении на антенну), удаления и глубины источника близки реальным. Материал проиллюстрирован числовыми расчетами для низкочастотной области шумового источника, позволяющими достаточно ясно представить эффективность интерферометрической обработки при работе с вертикальной линейной антенной. Результаты, представленные в статье, позволят значительно расширить область применения интерферометрической обработки.

Ключевые слова: интерферометрическая обработка, вертикальная антенна, интерферограмма, голограмма, шумовой источник, коэффициент усиления, помехоустойчивость, предельное удаление, численное моделирование.

INTERFEROMETRIC PROCESSING BY USING A VERTICAL LINEAR ANTENNA

V. M. Kuz'kin, Yu. V. Matvienko, S. A. Pereselkov, E. S. Kaznacheeva

Abstract. Interferometric processing of hydroacoustic information by using a vertical linear antenna is considered. The processing is based on a temporary coherent accumulation of spectral intensity along localized bands, which is processed by two-fold Fourier transform. At the output of the integral transformation, the spectral density (hologram) is localized in a narrow band in the form of focal spots caused by interference of modes with different numbers, providing high noise immunity. The expression is obtained for the 2D spectral density of a hologram formed by a moving source at the output of an antenna. The spectral density distributions that determine the gain coefficient and noise immunity of signal processing are analyzed. The expression for the input s/p ratio on the antenna element is obtained, when stable detection and estimating of bearing, radial velocity, distance and depth of the source are close to the true. The paper contains results of numerical simulation for the low-frequency band of the noise source, which allow us to clearly represent the efficiency of interferometric processing

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект 19-29-06075 и проект 19-08-00941). Научно-исследовательская работа Е.С. Казначеевой поддержана грантом РФФИ (проект 19-38-90326).

© Кузькин В. М., Матвиенко Ю. В., Пересёлков С. А., Казначеева Е. С., 2020

by using of vertical linear antenna. The results presented in the article will significantly expand the scope of interferometric processing.

Keywords: interferometric processing, vertical antenna, acoustic holography, голограмма, noise source, gain coefficient, noise immunity, numerical simulation.

1. ВВЕДЕНИЕ

Важная особенность океанических волноводов состоит в том, что им присуща самоорганизация интерференционной картины (интерферограммы) широкополосного источника звука в координатах частота-время (расстояние), обусловленная волноводной дисперсией и многомодовым характером распространения [1]. Такие интерференционные поля устойчивы к малым возмущениям условий распространения и отражают глобальные структурные особенности в конфигурации полей [2]. Основываясь на закономерностях частотно-временного распределения частотных смещений интерференционных максимумов волнового поля, разработана перспективная и многообещающая информационная технология обработки гидроакустической информации, которая открывает качественно иной взгляд на проблему локализации малозумных источников [3, 4]. В отличие от известных методов обработки, согласованных со средой распространения (matched-field processing) [5, 6], интерферометрическая обработка допускает возможность адаптации, т. е. определение координат источника при малом отношении сигнал/помеха (с/п) в отсутствие знаний о характеристиках среды распространения [7-9]. В основе обработки лежит временное когерентное накопление спектральной интенсивности вдоль локализованных полос, которая далее подвергается двукратному преобразованию Фурье. На выходе интегрального преобразования спектральная плотность, которую условно назовем голограммой, локализуется в узкой полосе в форме фокальных пятен, обусловленных интерференцией мод различных номеров, обеспечивая высокую помехоустойчивость.

В настоящее время бóльшая часть основных положений теории, практических вопросов и потенциальных возможностей интерферометрической обработки с применением одиночных приемников достаточно проработаны, что позволило радикально решить проблему локализации малозумных источников звука. Для реализации многих применений интерферометрической обработки в гидроакустике требуется, однако, разработка ее основ с применением протяженных антенн.

Данному вопросу посвящена настоящая статья, в которой, опираясь на физико-математические принципы интерферометрической обработки, получены новые результаты с использованием вертикальной линейной антенны. Главный из них - оценка коэффициента усиления. Другой результат - выражение для входного отношения с/п на элементе антенны, когда обеспечивается устойчивое обнаружение и оценки пеленга, радиальной скорости (проекция скорости в направлении на антенну), удаления и глубины источника близки реальным. Приведены результаты численного эксперимента.

2. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ

Волновод полагается горизонтально-однородным. Межэлементное расстояние равно d , число элементов вертикальной антенны – B , горизонтальное расстояние от антенны до источника S – r . Поля с каждого элемента суммируются, на выходе антенны формируется интерферограмма, к которой применяется двукратное преобразование Фурье.

Поле на выходе b -го элемента, $b = \overline{1, B}$, запишем в виде суммы мод [10]

$$p_b(\omega, r) = \sum_m \psi_m(z_b) A_m(\omega, r) \exp[ih_m(\omega)r], \quad (1)$$

где $\psi_m(z)$, $A_m(\omega, r)$ и $h_m(\omega)$ – собственная функция, амплитуда и горизонтальное волновое

число m -й моды; z_b — глубина b -го элемента; $\omega = 2\pi f$ — частота. Цилиндрическое расхождение поля, модальное затухание и глубина источника z_s формально учитываются амплитудой мод. В (1) медленным изменением собственной функции от частоты пренебрегается. На выходе антенны поле источника

$$p_{an}(\omega, r) = \sum_b p_b(\omega, r) = \sum_b \sum_m \psi_m(z_b) A_m(\omega, r) \exp[ih_m(\omega)r]. \quad (2)$$

Интерферограмма $P_{an}(\omega, r) = |p_{an}(\omega, r)|^2$, согласно (1), (2), равна

$$P_{an}(\omega, r) = \sum_b \sum_a \sum_m \sum_n P_{mn}^{(ab)}(\omega, r), \quad (3)$$

где

$$P_{mn}^{(ab)}(\omega, r) = \psi_m(z_b) \psi_n^*(z_a) A_m(\omega, r) A_n^*(\omega, r) \exp[ih_{mn}(\omega)r]. \quad (4)$$

Здесь $h_{mn}(\omega) = h_m(\omega) - h_n(\omega)$. Рассмотрим случай движущегося источника с радиальной скоростью w . Считаем, что расстояние r соответствует начальному моменту времени $t_0 = 0$. Далее в интерферограмме (3) от переменной расстояния r перейдем к временной переменной t и применим к ней двукратное преобразование Фурье. На выходе интегрального преобразования двумерная спектральная плотность, голограмма, определяется выражением

$$F_{an}(\tilde{\nu}, \tau) = \int_0^{\Delta t} \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} P_{an}(\omega, t) \exp[i(\tilde{\nu} - \omega\tau)] dt d\omega = \sum_b \sum_a \sum_m \sum_n F_{mn}^{(ba)}(\tilde{\nu}, \tau), \quad (5)$$

где $\tilde{\nu} = 2\pi\nu$ и τ — частота и время голограммы, Δt и $\Delta\omega$ — время наблюдения и ширина спектра, ω_0 — средняя частота спектра. Используя подход при получении голограммы одиночного приемника [3], получаем

$$F_{mn}^{(ba)}(\tilde{\nu}, \tau) = A_m(\omega_0, r) A_n^*(\omega_0, r) \psi_m(z_b) \psi_n^*(z_a) w \Delta\omega \Delta t \times \\ \times \exp \left[i \left(\frac{\tilde{\nu} \Delta t}{2} - \tau \omega_0 \right) \right] \exp \left\{ i \left[(m - n) \alpha \left(\frac{\Delta t}{2} w + r \right) + r(\tilde{\nu}/w) \right] \right\} \times \\ \times \frac{\sin \left\{ \left[(r + wt_*) (m - n) \frac{d\alpha}{d\omega} - \tau \right] \frac{\Delta\omega}{2} \right\}}{\left[(r + wt_*) (m - n) \frac{d\alpha}{d\omega} - \tau \right] \frac{\Delta\omega}{2}} \frac{\sin \left\{ [w(m - n)\alpha + \tilde{\nu}] \frac{\Delta t}{2} \right\}}{[w(m - n)\alpha + \tilde{\nu}] \frac{\Delta t}{2}}. \quad (6)$$

Здесь $\alpha = dh_l/dl = h_{l+1}(\omega_0) - h_l(\omega_0)$, l — номер моды, в окрестности которой моды синфазны, t_* — выделенный момент времени на интервале наблюдения Δt , $0 < t_* < \Delta t$. Введение величины α полезно при интерпретации голограммы. В действительности, $\alpha(m - n) = h_{mn}(\omega_0)$, $(d\alpha/d\omega)(m - n) = (dh_{mn}(\omega_0)/d\omega)$. Если положить $B = 1$, то соотношение (6) переходит в выражение для одиночного приемника.

Как и в случае одиночного приемника, спектральная плотность голограммы антенны локализована в форме фокальных пятен, зеркально перевернутых относительно начала координат. Эта особенность обусловлена симметрией функции (6) относительно перестановки номеров интерферирующих мод: $F_{mn}^{(ba)}(\tilde{\nu}, \tau) = F_{nm}^{(ba)}(-\tilde{\nu}, -\tau)$. Фокальные пятна расположены в первом и третьем квадрантах, если радиальная скорость $w < 0$, 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 $(\tau_\mu, \tilde{\nu}_\mu)$, где M — число мод, формирующих поле, $\mu = \overline{1, M - 1}$ — 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

$(m, m + 2), -(\tau_2, \tilde{\nu}_2)$. Координаты самого удаленного пика от начала координат, 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.

При выполнении условия $r \gg |w|t_*$, как следует из (6), для радиальной скорости и удаления источника находим

$$\dot{w} = -\kappa_{w\mu}\tilde{\nu}_\mu, \quad \dot{r} = \kappa_{r\mu}\tau_\mu, \quad (7)$$

где

$$\kappa_{w\mu} = \left[\overline{h_{m(m+\mu)}(\omega_0)} \right]^{-1}, \quad \kappa_{r\mu} = \left[\overline{dh_{m(m+\mu)}(\omega_0)/d\omega} \right]^{-1} \quad (8)$$

— коэффициенты, определяющие пространственные и частотные масштабы изменчивости передаточной функции волновода [10]. Оценки параметров источника, получаемые в результате измерений, в отличие от их истинных значений, обозначены точкой сверху. Черта сверху означает усреднение по номерам мод. Адаптивные методы интерферометрической обработки, позволяющие оценивать удаление источника и радиальную скорость в отсутствие информации о передаточной функции, т. е. без знания коэффициентов (8), рассмотрены в [7–9].

Координаты основных максимумов $(\tau_\mu, \tilde{\nu}_\mu)$ расположены на прямой $\tilde{\nu} = \tilde{\varepsilon}\tau$ с угловым коэффициентом

$$\tilde{\varepsilon} = -\frac{wh_{mn}(\omega_0)}{r(dh_{mn}(\omega_0)/d\omega)}, \quad (9)$$

и занимают полосу между значениями $\tau = \pm 2\pi/\Delta\omega$ и $\tilde{\nu} = \pm 2\pi/\Delta t$. Вне этих полос спектральная плотность голограммы практически подавлена.

По отношению к одиночному приемнику результативность интерферометрической обработки будем характеризовать коэффициентом усиления

$$\chi = |G_{an}|/|G_r|, \quad (10)$$

где

$$G_{an,r} = \iint_U |F_{an,r}(\tau, \tilde{\nu})| d\tau d\tilde{\nu}. \quad (11)$$

Здесь и далее индекс “ r ” относится к одиночному приемнику антенны, U — область локализации спектральной плотности. Из (6), (10) следует ожидать $\chi \cong B^2$. Равенство выполняется тогда, когда значения собственных функций мод элементов антенны на различных глубинах равны между собой, $\psi_m(z_b) = \psi_m(z_a)$, $z_b \neq z_a$. Пеленгование источника осуществляется на основе алгоритма, как это предложено по отношению к одиночному векторно-скалярному приемнику [11].

3. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ОБРАБОТКИ

Помехоустойчивость интерферометрической обработки с применением одиночного приемника предложено характеризовать предельным (минимальным) входным отношением с/п $q_{\text{lim}}^{(r)}$, когда для значений с/п на входе $q \geq q_{\text{lim}}^{(r)}$ обеспечивается устойчивое обнаружение и оценки пеленга, радиальной скорости, удаления и глубины близки реальным [3]. В случае изотропной помехи для скалярной компоненты поля (давления) шумового источника $q_{\text{lim}}^{(r)} \approx 1.5/J^2$, где $J^2 = \Delta t/(T + \delta t)$ — число временных интервалов (отсчетов), на которых реализуются когерентные накопления спектральных максимумов волнового поля вдоль интерференционных полос [4]. Здесь T — длительность шумовой реализации, δt — интервал между отсчетами. Несмотря на то, что оценка $q_{\text{lim}}^{(r)}$ была установлена на основании ряда физических соображений, а не выведена из каких либо более общих принципов, она найдена правильно и позволила построить теорию помехоустойчивости интерферометрической обработки применительно к одиночному приемнику. Обобщим полученную оценку на вертикальную линейную антенну.

Предположим, что шумовой сигнал и помеха статистически не связанные случайные процессы, на входе элементов антенны помеха стационарна и не коррелирована. Для выполнения второго условия достаточно потребовать выполнения неравенства $d \geq \lambda/2$, где λ — длина волны. Тогда, как нетрудно сообразить, предельное входное отношение с/п на элементе антенны оценивается как

$$q_{\text{lim}}^{(an)} = Bq_{\text{lim}}^{(r)}/\chi \cong q_{\text{lim}}^{(r)}/B, \quad (12)$$

так что выигрыш в помехоустойчивости оценивается как $\gamma = q_{\text{lim}}^{(r)}/q_{\text{lim}}^{(an)} \cong B$. В этом случае для входного значения с/п q на элементе антенны допустимые удаления r шумового источника, когда сохраняется работоспособность обработки, согласно [7], оцениваются как

$$r \leq r_{\text{lim}} \cong \frac{1}{5\sqrt{1.5}} \sqrt{\frac{q\chi}{B}} \frac{\Delta t}{|dh_{1M}(\omega_0)/d\omega|}, \quad (13)$$

так что с увеличением времени наблюдения Δt и средней частоты ω_0 предельная дальность шумового источника возрастает. Последнее связано с тем, что при возрастании частоты групповые скорости мод асимптотически стремятся к постоянному значению, не зависящему от номера моды [10]. Характерной чертой соотношения (13) является то обстоятельство, что в него входят параметры передаточной функции волновода и поэтому значение предельного удаления r_{lim} различно в зависимости от выбора акватории. Заметим, что в соотношении (13) входное отношение $q \geq q_{\text{lim}}^{(r)}$.

Если вначале на каждом b -м приемнике выполнить интерферометрическую обработку и далее на выходе антенны суммировать спектральные плотности голограмм, то, очевидно, выигрыша в помехоустойчивости по отношению к одиночному приемнику не будет.

4. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

При численном моделировании волновод полагался горизонтально-однородным, глубина $H = 70$ м. Распределение скорости звука по глубине приведено на рис. 1. Параметры поглощающего жидкого однородного дна: отношение плотности грунта и воды $\rho = 1.8$, комплексный показатель преломления $n = 0.85(1 + i0.02)$.

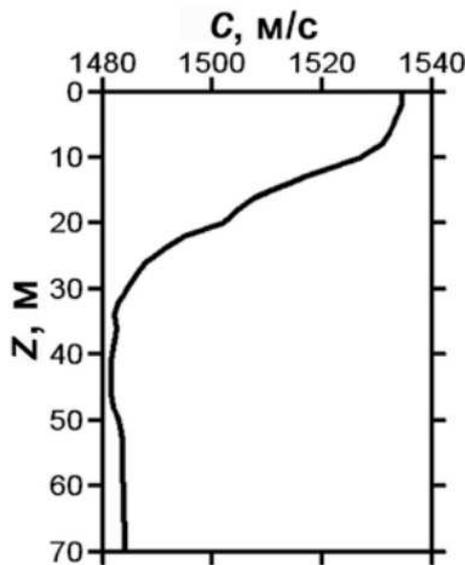


Рис. 1. Профиль скорости звука.

Таблица 1. Горизонтальные волновые числа h_m и их производные $dh_m/d\omega$ на частоте $f_0 = 110$ Гц.

Номера мод, m	1	2	3	4
$h_m, \text{м}^{-1}$	0.4241	0.4165	0.4059	0.3918
$dh_m/d\omega,$ $10^{-4}/\text{м}\cdot\text{Гц}$	6.8078	6.8526	6.9497	7.1352

Таблица 2. Предельные удаления шумового источника в зависимости от отношения c/n .

Отношение $c/n, q$	Одиночный приемник	Вертикальная линейная антенна, число элементов $B = 10$
	Предельное удаление шумового источника $r_{\text{lim}}, \text{км}$	
1	149.6	473.2
10^{-1}	47.3	149.6
10^{-2}	15.0	47.3
10^{-3}	4.7	15.0
10^{-4}	1.5	4.7

Шумовой источник, расположенный на глубине $z_s = 50$ м, со скоростью $w = 3$ м/с удалялся от антенны. В момент времени $t = 0$ удаление источника от антенны $r = 10$ км. Ширина полосы $\Delta f = 100 - 120$ Гц. Межэлементное расстояние $d = 3.5$ м. Число элементов $B = 20$, они расположены на глубинах $z_b = 3.5 + 3.5(b - 1)$ м, где $b = \overline{1, 20}$, т. е. антенна перекрывала ширину волновода. Время накопления $\Delta t = 30$ с, длительность случайной реализации $T = 2$ с, временной интервал между отсчетами $\delta t = 0.5$ с. Горизонтальные волновые числа мод и их производные по частоте приведены в табл. 1. Результаты моделирования представлены на рис. 2–5 и в табл. 2.

На рис. 2 представлены интерферограммы и голограммы трех элементов антенны. Конфигурация областей распределения спектральной плотности различна, несмотря на когерентное

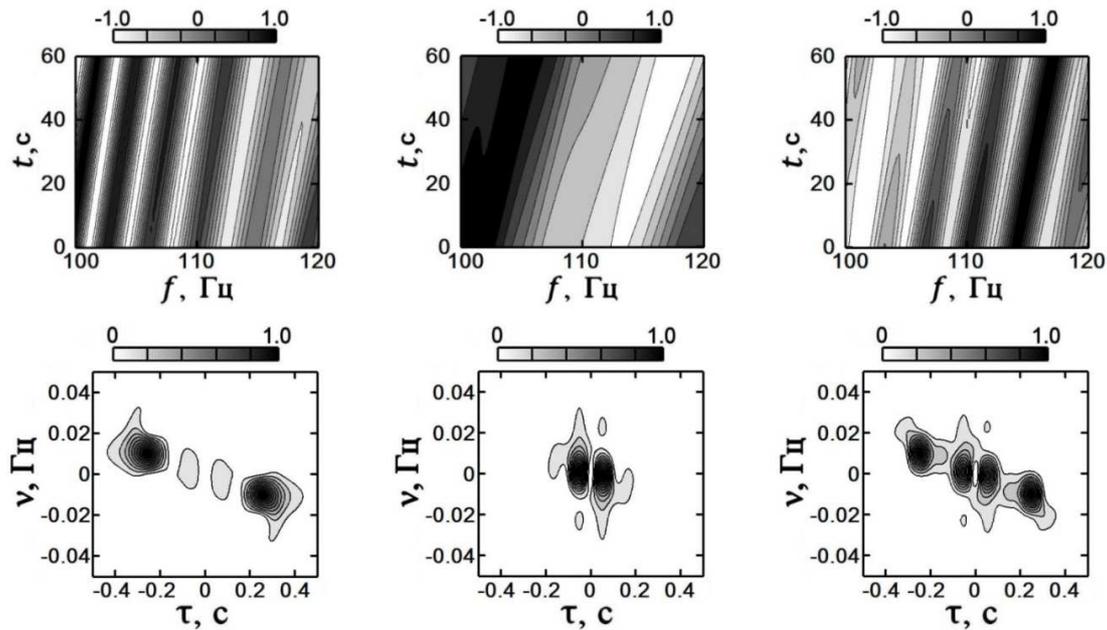


Рис. 2. Нормированные интерферограммы (а, в, д) и голограммы (б, г, е) элементов антенны, расположенных на глубинах $z_b = 10.5, 38.5, 59.5$ м соответственно.

сложение полей на элементах антенны. При этом положения максимумов фокальных пятен сохраняются. Указанное различие объясняется различным значением собственных функций на глубинах расположения элементов. С целью повышения контрастности и информативности на интерферограммах и спектрограммах вырезаны средние значения. Здесь и ниже данная операция при моделировании всегда выполнялась.

Наиболее ярко это различие иллюстрирует рис. 3, где приведены зависимости двух нормированных спектральных максимумов $\left| \widehat{F}_b^{(1,2)} \right| = F_b^{(1,2)} / F_{\max}^{(1,2)}$ от глубины элемента антенны. Численные расчеты отмечены точками. Как видно, распределение максимумов фокальных пятен имеет осциллирующий характер, обусловленный различным характером коэффициентов возбуждения мод на горизонтах приема. Характер изменения осцилляций при изменении положения фокального пятна связан с интерференцией различных номеров мод, обуславливающих расположение локализованных областей. Первое фокальное пятно формируется интерференцией пар мод: (1, 2), (2, 3), (3, 4); тогда как второе фокальное пятно - интерференцией пар мод: (1, 3), (2, 4). Отношение нормированных коэффициентов $\beta = F_{\max}^{(1)} / F_{\max}^{(2)} = 1.3$.

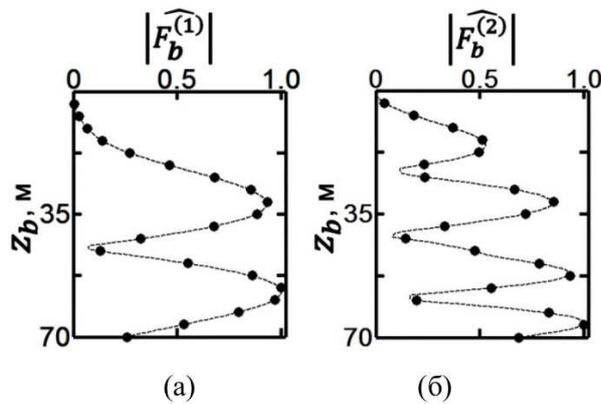


Рис. 3. Зависимости нормированных спектральных максимумов голограмм элементов антенны от их глубины: (а) первый максимум, $\left| \widehat{F}_b^{(1)} \right|$; (б) второй максимум, $\left| \widehat{F}_b^{(2)} \right|$.

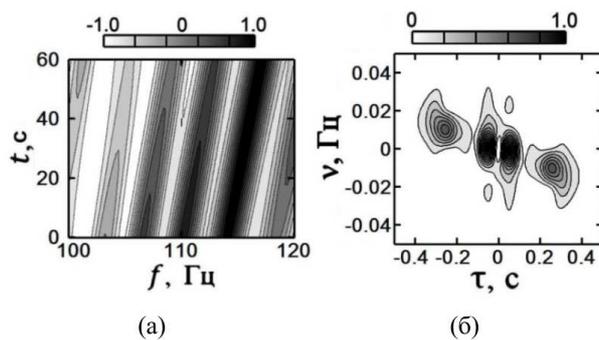


Рис. 4. Нормированная интерферограмма (а) и голограмма (б) антенны.

Рис. 4 демонстрирует поведение нормированной интерферограммы и голограммы антенны. Преобладающим является пик первого фокального пятна. Положения максимумов фокальных пятен антенны и элементов антенны совпадают.

На рис. 5 показаны, полученные численным моделированием (точки) зависимость нормированного коэффициента усиления $\hat{\chi} = \chi(b) / \chi_{\max}$ (10) от числа элементов b . Расчетные

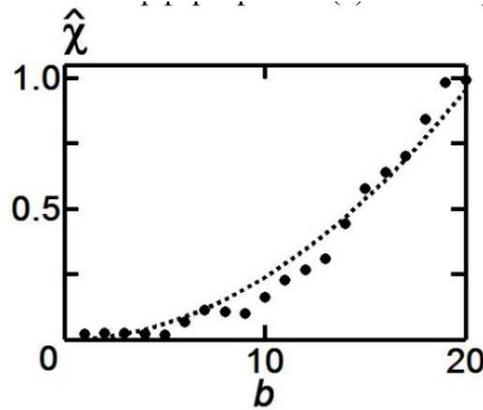


Рис. 5. Зависимость нормированного коэффициента усиления $\hat{\chi}$ от числа b элементов антенны. Точки — расчетные значения, пунктир — квадратичная зависимость.

значения удовлетворительно ложатся на оценочную квадратичную зависимость $\hat{\chi} = b^2/\chi_{\max}$ (пунктир). Значение коэффициента $\chi_{\max} = 390$, выбранное из условия нормировки расчетных значений, близко к прогнозируемой оценке $B^2 = 400$.

В табл. 2 приведены значения предельных дальностей шумового источника с использованием одиночного приемника и вертикальной линейной антенны в зависимости от входного отношения c/p q , рассчитанные по формуле (13). Время наблюдения $\Delta t = 30$ с, величина $|dh_{1M}(\omega_0)/d\omega| = 3.274 \cdot 10^{-5}$ с/м (см. табл. 1), параметр $\chi/B = B$. Число элементов антенны $B = 10$. При таком числе элементов межэлементное расстояние $d = 7$ м. Это примерно соответствует половине длине волны λ на частоте $f_0 = 110$ Гц, поэтому помеху на входе элементов антенны можно считать некоррелированной.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивное внедрение в течение последних нескольких лет интерферометрической обработки в гидроакустику уже позволило получить ряд новых результатов с использованием одиночных приемников, заставив пересмотреть сложившиеся ранее классические методы обработки (matched-field processing), короче говоря, все те направления, где играет роль интерференция волн. Эти соображения, а также, конечно, в большой степени важность физических и прикладных задач, которые можно решить с использованием антенн, стимулировало рассмотрение интерферометрической обработки с применением вертикальной линейной антенны. Получен ряд полезных выражений, описывающих распределение спектральной плотности, определяющих коэффициент усиления и помехоустойчивость, что позволит значительно расширить область применения интерферометрической обработки. Материал проиллюстрирован числовыми расчетами для низкочастотной области шумового источника, позволяющими достаточно ясно представить эффективность интерферометрической обработки при работе с вертикальной линейной антенной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чупров, С. Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане / С. Д. Чупров // Акустика океана. Современное состояние. — 1982. — С. 71–82.
2. Kuz'kin, V. M. Method for measung the frequency shifts of interference maxima in monitoring of dispersion media: theory, implementation, and prospects / V. M. Kuz'kin, G. A. Lyakhov, S. A. Pereselkov // Phys. Wave Phenom. — 2010. — V. 18, № 3. — P. 196–222.
3. 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.

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. Baggeroer, A. B. An overview of matched field methods in ocean acoustics / A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, P. N. Mikhalevsky // IEEE. J. Oceanic Eng. — 1993. — V. 18, № 4. — P. 401–423.

6. 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.

7. 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.

8. Реализация адаптивного интерферометрического метода локализации источника звука. I часть / В. М. Кузькин, С. А. Пересёлков, П. В. Рыбьянец, С. А. Ткаченко // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2019. — № 4. — С. 19–29.

9. Реализация адаптивного интерферометрического метода локализации источника звука. II часть / В. М. Кузькин, С. А. Пересёлков, С. А. Ткаченко, И. В. Казначеев // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2020. — № 1. — С. 14–23.

10. Бреховских, Л. М. Теоретические основы акустики океана / Л. М. Бреховских, Ю. П. Лысанов. — Л. : Гидрометеиздат, 1982. — 264 с.

11. Direction finding of a noise sound source / G. N. Kuznetsov et. al. // Phys. Wave Phenom. — 2019. — V. 27, № 3. — P. 237–241.

REFERENCES

1. Chuprov S.D. Interference Structure of Sound in a Layered Ocean. [Chuprov S.D. Interferencionnaya struktura zvukovogo polya v sloistom okeane]. *Akustika okeana. Sovremennoe sostoyanie — Ocean Acoustics. Current State*, 1982, pp. 71–82.

2. Kuz'kin V.M., Lyakhov G.A., Pereselkov S.A. Method for measung the frequency shifts of interference maxima in monitoring of dispersion media: theory, implementation, and prospects. *Phys. Wave Phenom*, 2010, vol. 18, no. 3, pp. 196–222.

3. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. Spectrogram and Localization of a Sound Source in Shallow Water. [Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. Spektrogramma i lokalizaciya istochnika zvuka v melkom more]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2017, vol. 63, no. 4, pp. 406–418.

4. Kaznacheev I.V., Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. An Interferometric Method for Detecting a Moving Sound Source with a Vector-Scalar Receiver. [Kaznacheev I.V., Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. Interferometricheskij metod obnaruzheniya dvizhushhegosya istochnika zvuka vektorno-skalyarnym priemnikom]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2018, vol. 64, no. 1, pp. 33–45.

5. Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Mikhalevsky P.N. An overview of matched field methods in ocean acoustics. *IEEE. J. Oceanic Eng.*, 1993, vol. 18, no. 4, pp. 401–423.

6. 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 podvodnyx zvukovykh kanalax (Obzor)]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2015, vol. 61, no. 2, pp. 233–253.

7. 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.

8. Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Rybyanets P.V., Tkachenko S.A. Implementation of adaptive interferometric method of localization of the sound source. I part. [Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Rybyanets P.V., Tkachenko S.A. Realizaciya adaptivnogo interferometrcheskogo metoda lokalizacii istochnika zvuka. I chast']. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2019, no. 4, pp. 19–29.

9. Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznacheev I.V., Tkachenko S.A. Implementation of adaptive interferometric method of localization of the sound source. II part. [Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznacheev I.V., Tkachenko S.A. Realizaciya adaptivnogo interferometrcheskogo metoda lokalizacii istochnika zvuka. II chast']. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2020, no. 1, pp. 14–23.

10. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. Theoretical bases of ocean acoustics. [Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. Teoreticheskie osnovy akustiki okeana]. Moscow: Nauka, 2007, 370 p.

11. 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.

*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*

*Матвиенко Юрий Викторович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт проблем морских технологий ДО РАН, Владивосток, Россия
E-mail: ymat@marine.febras.ru
Тел.: +7(423)243-24-16*

*Matvienko Yuri Viktorovich, Institute of Marine Technology Problems of Far Eastern Department of RAS, Vladivostok, Russia
E-mail: ymat@marine.febras.ru
Tel.: +7(423)243-24-16*

*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*

*Казначеев Елена Сергеевна, аспирант кафедры математической физики и информационных технологий ВГУ, Воронеж, Россия
E-mail: el.kaznacheeva@gmail.com*

*Kaznacheeva Elena Sergeevna, Postgraduate Student, Department of Mathematical Physics and Information Technology, Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: el.kaznacheeva@gmail.com*