

DOI: 10.17725/rensit.2022.14.065

Обнаружение шумового сигнала в океаническом волноводе горизонтальной антенной

¹Кузькин В.М., ²Пересёлков С.А., ³Матвиенко Ю.В., ²Ткаченко С.А.,
²Просовецкий Д.Ю.

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, <http://www.gpi.ru/>
Москва 119991, Российская Федерация

²Воронежский государственный университет, <http://www.vsu.ru/>
Воронеж 394006, Российская Федерация

³Институт проблем морских технологий ДВО РАН, <http://www.febras.ru/>
Владивосток 690091, Российская Федерация

E-mail: kumiov@yandex.ru, pereselkov@yandex.ru, ymat@marine.febras.ru, tkachenko.edu@yandex.ru, dmitry.prosovetskii@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.03.2022, рецензирована 21.03.2022, принята 25.03.2022

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

Аннотация: Описана интерферометрическая обработка гидроакустической информации с применением горизонтальной линейной антенны. На основе критерия Неймана–Пирсона рассмотрено обнаружение сигнала шумового источника. Получены выражения для вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги в зависимости от отношения сигнал/помеха и числа элементов антенны. Выполнены численные расчеты. Приведены кривые обнаружения шумового сигнала. Оценена эффективность обнаружения сигнала с использованием антенны по отношению к одиночному приемнику.

Ключевые слова: дисперсия, интерферометрия, шумовой источник, критерий Неймана–Пирсона, характеристики обнаружения, горизонтальная антенна, моделирование

УДК 004.052.34

Благодарности: Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-29-06075. Научно-исследовательская работа Д.Ю. Просовецкого поддержана грантом Президента РФ: (МК-6144.2021.4). Научно-исследовательская работа С.А. Ткаченко поддержана грантом Президента РФ: (МК-4846.2022.4).

Для цитирования: Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Матвиенко Ю.В., Ткаченко С.А., Просовецкий Д.Ю. Обнаружение шумового сигнала в океаническом волноводе горизонтальной антенной. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2022, 14(1)65-72. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.065.

Noise signal detection by horizontal antenna in ocean waveguide

Venedikt M. Kuz'kin

Prokhorov Institute of General Physics of RAS, <http://www.gpi.ru/>
Moscow 119991, Russian Federation

E-mail: kumiov@yandex.ru

Sergey A. Pereselkov, Sergey A. Tkachenko, Dmitry Yu. Prosovetskii

Voronezh State University, <http://www.vsu.ru/>
Voronezh 394006, Russian Federation

E-mail: pereselkov@yandex.ru, tkachenko.edu@yandex.ru, dmitry.prosovetskii@yandex.ru

Yury V. Matvienko

Institute for Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of RAS, <http://www.febras.ru/>
Vladivostok 690091, Russian Federation

E-mail: ymat@marine.febras.ru

Received 14 March, 2022, peer-reviewed 21 March, 2022, accepted 25 March, 2022

Abstract: Interferometric processing of hydroacoustic information by using a horizontal linear antenna is described. The detection of a noise source signal is considered by using the Neumann-Pearson criterion. The expressions for the probability of correct detection and false alarm are obtained as dependence on the signal/noise (s/n) ratio and the number of antenna elements. Numerical calculations are performed. The curves of the probability of noise signal detection are given. The efficiency of signal detection by using an antenna in relation to a single receiver is estimated.

Keywords: dispersion, interferometry, noise source, Neumann-Pearson criterion, detection characteristics, horizontal antenna, modeling

UDC 004.052.34

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 19-29-06075. Research work of D.Yu. Prosovetskii was supported by a grant from the President of the Russian Federation: (МК-6144.2021.4). Research work by S.A. Tkachenko was supported by a grant from the President of the Russian Federation: (МК-4846.2022.4).

For citation: Venedikt M. Kuz'kin, Sergey A. Pereselkov, Yury V. Matvienko, Sergey A. Tkachenko, Dmirty Yu. Prosovetskii. Noise signal detection by horizontal antenna in oceanic waveguide. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2022, 14(1)65-72. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.065.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (66)
2. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА (67)
3. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ОБРАБОТКИ (68)
4. ОБНАРУЖЕНИЕ ШУМОВОГО СИГНАЛА ПО КРИТЕРИЮ НЕЙМАНА-ПИРСОНА (69)
 - 4.1. КРИВЫЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИ ПРИЕМЕ НА ОДИНОЧНЫЙ ПРИЕМНИК (69)
 - 4.2. КРИВЫЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИ ПРИЕМЕ НА АНТЕННУ (69)
5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (70)
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (71)

ЛИТЕРАТУРА (72)

1. ВВЕДЕНИЕ

В океанических волноводах волноводная дисперсия и многомодовое распространение обуславливают специфический метод локализации широкополосных источников звука в океанических волноводах, основанный на устойчивых структурных особенностях формируемой им интерферограммы [1,2]. Под интерферограммой понимается квадрат модуля принимаемого сигнала в переменных частота-расстояние (время). С использованием понятия волноводного инварианта [1] первые шаги в этом направлении предприняты в работах [3-8], где предложены частные решения обратной задачи. Однако они не эффективны в условиях малого отношения сигнал/помеха (с/п).

Устойчивая к вариациям параметров океанической среды интерферометрическая обработка для решения комплексной задачи локализации малошумных широкополосных источников (обнаружение, пеленгование, определение радиальной скорости (проекции скорости по направлению к приемнику), удаления, глубины и разрешения нескольких источников) предложена и апробирована в работах [9-14]. Обработка реализует многократное квазикогерентное накопление спектральной плотности волнового поля вдоль локализованных полос интерферограммы в переменных частота-время. За время наблюдения Δt в полосе излучения $\Delta\omega$ источника накапливаются J независимых реализаций длительностью t_s с временным интервалом δt_s между ними

$$J = \frac{\Delta t}{t_s + \delta t_s}. \quad (1)$$

Реализации независимы, если $\delta t_s > 2\pi/\Delta\omega$. Формируется интерферограмма в переменных частота-время, которая подвергается двумерному преобразованию Фурье в переменных время-частота. Преобразованную интегральную спектральную плотность назовем голограммой. На голограмме спектральная плотность концентрируется в узкой полосе в форме фокальных пятен, обусловленных

интерференцией мод различных номеров. В отличие от шумового сигнала, накопление помехи некогерентно и помеха распределена по всей области голограммы, что обуславливает высокую помехоустойчивость обработки. Определение радиальной скорости и удаления источника от приемника принимается на основе информации о координатах максимумов фокальных пятен [10,11,14]. Вопросы определения глубины, пеленга и разрешения источников рассмотрены в [9,12,13]. Для одиночного приемника обнаружение шумового сигнала на основе критерия Неймана-Пирсона с применением интерферометрической обработки разобрано в [15].

В настоящее время большое значение придается использованию малогабаритных подводных аппаратов для выполнения работ по охране морских акваторий [16]. Эффективная работа этих аппаратов по обнаружению слабых сигналов предполагает использование малогабаритных антенн.

Цель данной работы – построение теории обнаружения шумового сигнала с использованием приемной горизонтальной линейной антенны. Приведены результаты численного моделирования для малогабаритных антенн.

2. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Интерферометрическая обработка с использованием горизонтальной линейной антенны рассмотрена в [17].

Схема расположения источника S и горизонтальной линейной антенны приведена на **Рис. 1**. Число элементов Q_b эквидистантной антенны равно B , $b = \overline{1, B}$, межэлементное расстояние – d . Элементы антенны расположены на глубине z_q . Опорным элементом антенны выбирается первый элемент Q_1 . Апертура $L = (B - 1)d$ много меньше расстояния до источника, $L \ll r_b$. В этом случае $r_b = r_1 - (b - 1)d \sin \theta$, где θ – угол, дополнительный к пеленгу. Источник на фиксированной глубине z_s движется с постоянной скоростью v . Спектр сигнала сосредоточен в полосе $-(\Delta\omega/2) + \omega_0 \leq \omega \leq \omega_0 + (\Delta\omega/2)$, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

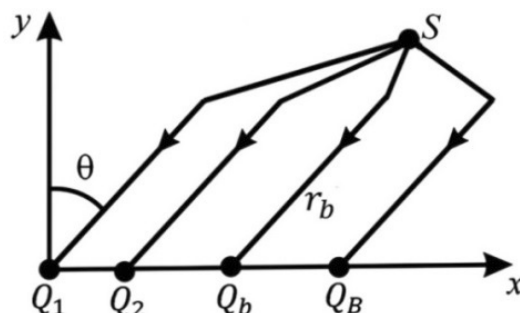


Рис. 1. Геометрия задачи (вид сверху): r_b – горизонтальное расстояние элемента Q_b до источника S , θ – угол направления на источник.

Поля с элементов антенны суммируются. При суммировании компенсируется разность расстояний от источника до различных элементов антенны в направлении угла θ . Поэтому поле b -го элемента умножается на $\exp[ib_*(\omega_0)(b - 1)d \sin \theta_*]$. Здесь $b_*(\omega_0)$ – выделенная вещественная часть горизонтального волнового числа (постоянная распространения) на средней частоте ω_0 спектра источника, θ_* – угол компенсации. Поле на выходе b -го элемента антенны в виде суммы мод дискретного спектра имеет вид [18]

$$p_b(\omega, r_1, z_{s,q}, \theta, \theta_*) = \sum_m A_m(\omega, r_1, z_{s,q}, \theta, \theta_*) \times \exp\{i[h_m(\omega)r_1 - 2(b-1)(h_m(\omega)\eta - h_*(\omega_0)\eta_*)]\}, \quad (2)$$

$\eta = d \sin \theta / 2$, $\eta_* = d \sin \theta_* / 2$, A_m и b_m – амплитуда и постоянная распространения m -моды. Цилиндрическое расхождение поля, модальное затухание, глубины источника z_s и элементов z_b антенны формально учитываются амплитудной зависимостью мод. Далее аргументы глубины источника и приемника у принимаемого сигнала опускаются.

На выходе антенны поле

$$p_{an}(\omega, r_1, \theta, \theta_*) = \sum_b p_b(\omega, r_b, \theta, \theta_*). \quad (3)$$

В интерферограмме $P_{an}(\omega, r_1, \theta, \theta_*) = |p_{an}(\omega, r_1, \theta, \theta_*)|^2$ от переменной расстояния перейдем к временной переменной и применим двумерное преобразование Фурье

$$F_{an}(\tilde{v}, \tau, \theta, \theta_*) = \int_0^{\Delta t} \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} P_{an}(\omega, t, \theta, \theta_*) \exp[i(\tilde{v}t - \omega\tau)] dt d\omega, \quad (4)$$

где $\tilde{\nu} = 2\pi\nu$ и τ – круговая частота и время голограммы, Δt – время наблюдения. В момент времени $t_0 = 0$ начальное расстояние $r_1 = r_0$.

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

$$\chi = |G_{an}(B, \theta, \theta_*)| / |G_r|, \tag{5}$$

и характеристикой направленности

$$D(B, \theta, \theta_*) = G_{an}(B, \theta, \theta_*) / \max G_{an}. \tag{6}$$

Здесь

$$G_{an}(B, \theta, \theta_*) = \iint_U |F_{an}(\tau, \tilde{\nu}, \theta, \theta_*)| d\tau d\tilde{\nu}, \tag{7}$$

$$G_r = \iint_U |F_r(\tau, \tilde{\nu})| d\tau d\tilde{\nu}. \tag{8}$$

Индекс «*n*» здесь и далее относится к одиночному приемнику, U – область локализации спектральной плотности голограммы (на Рис. 2*b,d* она выделена пунктиром).

Увеличение числа элементов B антенны обостряет главные максимумы характеристики направленности антенны, не изменяя их

положения, и приводит к возрастанию вторичных максимумов. С ростом угла компенсации θ_* ширина главного максимума характеристики направленности возрастает. Наибольшая ширина имеет место при угле $\theta_* = 90^\circ$. Максимальный коэффициент усиления, примерно равный B^2 , имеет место в направлении угла компенсации.

3. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ОБРАБОТКИ

Помехоустойчивость обработки удобно характеризовать предельным входным отношением с/п q_{lim} , когда обеспечивается устойчивое обнаружение и оценки параметров источника близки к реальным значениям. В случае одиночного приемника и изотропной помехи для скалярной компоненты поля значение $q_{lim}^{(r)} \approx 1.5 / J^2$.

Положим, что шумовой сигнал и помеха статистически не связанные случайные процессы и на входе элементов антенны помеха не коррелирована. Второе условие выполняется, если $d \geq \lambda/2$, где λ – длина волны. Тогда

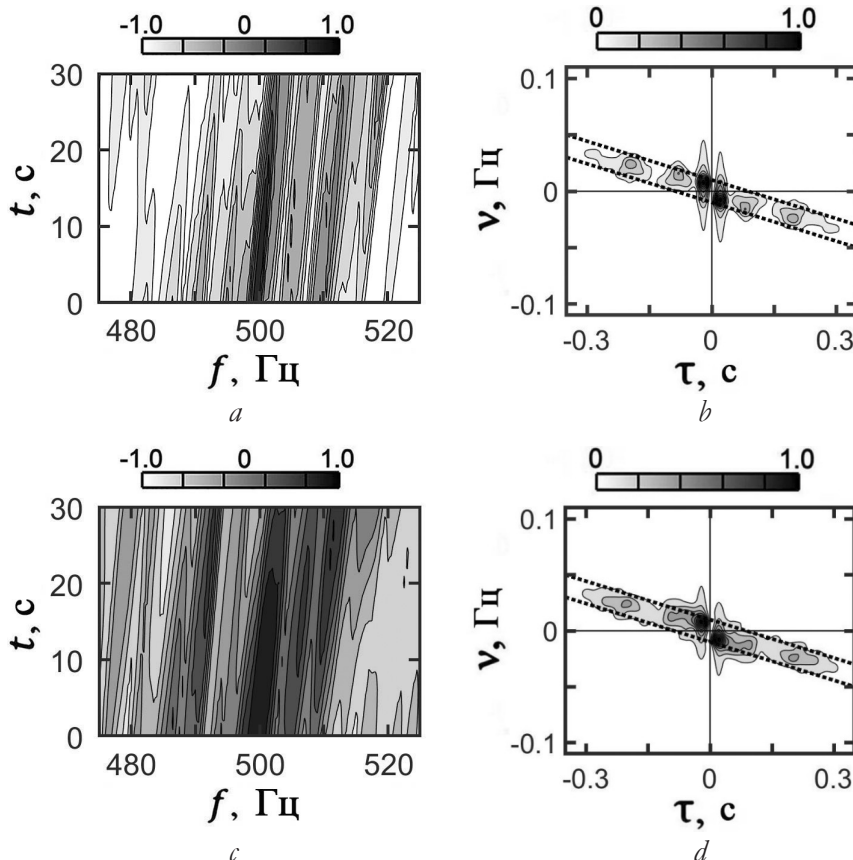


Рис. 2. Нормированные интерферограммы (а,с) и модули голограмм (b,d) одиночного приемника (а,b) и семиэлементной антенны (с,d) в отсутствие помехи.

предельное входное отношение с/п на элементе антенны оценивается как

$$q_{\text{lim}}^{(an)} = \alpha q_{\text{lim}}^{(r)}, \quad (9)$$

где $\alpha = B/\chi$. Максимальное значение $\chi_{\text{max}} \approx B^2$, так что $\alpha_{\text{min}} \approx 1/B$. С учетом вышесказанного $\min q_{\text{lim}}^{(an)} \approx q_{\text{lim}}^{(r)}/B$. Входные отношения с/п на единичном элементе антенны ограничены неравенством $q_0 \geq q_{\text{lim}}^{(an)}$.

4. ОБНАРУЖЕНИЕ ШУМОВОГО СИГНАЛА ПО КРИТЕРИЮ НЕЙМАНА-ПИРСОНА

Критерий Неймана-Пирсона максимизирует вероятность правильного обнаружения p_1 при заданной вероятности ложной тревоги p_2 . При рассмотрении задачи обнаружения шумового сигнала (давления) ограничимся областью входных отношений с/п $q_0 \geq q_{\text{lim}}$.

4.1. Кривые обнаружения при приеме на одиночный приемник [15]. Вероятность ложной тревоги $p_2^{(r)}$, как вероятность превышения помехой порового уровня g_r , равна

$$p_2^{(r)} = 1 - 0.5 [\Phi(k_n^{(r)} - 0.5) + \Phi(k_n^{(r)} + 0.5)], \quad (10)$$

где безразмерный параметр $k_n^{(r)} = g_r / 2M_n^{(r)}$, $M_n^{(r)}$ – математическое ожидание помехи на выходе обработки, $\Phi(x)$ – интеграл ошибок

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt. \quad (11)$$

По заданной вероятности ложной тревоги $p_2^{(r)}$ однозначно определяется параметр $k_n^{(r)}$. С уменьшением вероятности ложной тревоги, согласно (10), (11), значение $k_n^{(r)}$ возрастает. Максимальное значение параметра $k_n^{(r)}$ оценивается как $\max k_n^{(r)} \approx 4$.

Вероятность правильного обнаружения

$$p_1^{(r)} = 1 - 0.5 [\Phi(\eta_1^{(r)}) + \Phi(\eta_2^{(r)})], \quad (12)$$

где

$$\eta_1^{(r)} = \frac{2k_n^{(r)} - 1 - q_r}{2(1 + q_r)}, \quad \eta_2^{(r)} = \frac{2k_n^{(r)} + 1 + q_r}{2(1 + q_r)}, \quad (13)$$

$q_r = J\gamma_r q_0$ – отношение с/п на выходе обработки. Здесь $\gamma_r = S_n^{(r)} / S_s^{(r)}$ – коэффициент сжатия, $S_{s,n}^{(r)}$ – площадь распределения спектральной плотности сигнала и помехи на голограмме.

Вероятность правильного обнаружения $p_1^{(r)}$ однозначно определяется параметром $k_n^{(r)}$ и отношением с/п q_r . Таким образом, можно рассчитать кривые обнаружения шумового сигнала. Они представляют собой зависимость вероятности правильного обнаружения от выходного (или входного) отношения с/п при фиксированной вероятности ложной тревоги.

4.2. Кривые обнаружения при приеме на антенну. Выражения для вероятностей ложной тревоги $p_2^{(r)}$ (10) и правильного обнаружения $p_1^{(r)}$ (12) сохраняются и для антенны с тем лишь отличием, что изменяются значения аргументов, которые их характеризуют. При фиксированной вероятности ложной тревоги, $p_2^{(an)} = p_2^{(r)} = p_2$, безразмерный параметр k_n сохраняется, $k_n^{(r)} = k_n^{(an)} = k_n$. По сравнению с одиночным приемником математическое ожидание помехи на выходе обработки возрастает в B раз, $M_n^{(an)} = B M_n^{(r)}$. Это приводит к увеличению порового уровня также в B раз, $g_{an} = B g_r$. С учетом этих замечаний вероятность правильного обнаружения равна

$$p_1^{(an)} = 1 - 0.5 [\Phi(\eta_1^{(an)}) + \Phi(\eta_2^{(an)})], \quad (14)$$

где

$$\eta_1^{(an)} = \frac{2k_n - 1 - q_{an}}{2(1 + q_{an})}, \quad \eta_2^{(an)} = \frac{2k_n + 1 + q_{an}}{2(1 + q_{an})}. \quad (15)$$

Здесь $q_{an} = (J\gamma_{an}(B/\alpha)q_0)$ – отношение с/п на выходе обработки, где $\gamma_{an}(B)$ – коэффициент сжатия. Он определяется аналогично одиночному приемнику и не зависит от угла наблюдения θ , значения $\gamma_{an} = \gamma_r = \gamma$ [17]. По сравнению с одиночным приемником выходное отношение с/п повышается примерно в B раз.

Степень различия в вероятностях правильного обнаружения между одиночным приемником и антенной в зависимости от входного отношения с/п и числа элементов антенны при заданной вероятности ложной тревоги будем характеризовать отношением

$$\beta(q_0, B) = p_q^{(an)}(q_0, B) / p_1^{(r)}(q_0). \quad (16)$$

Параметр $\beta(q_0, B)$ (16) для краткости назовем коэффициентом эффективности. При рассмотрении коэффициента эффективности $\beta(q_0, B)$ область входных отношений с/п q_0 ограничена областью значений $q_0 \geq q_{\text{lim}}^{(r)}$.

5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Горизонтально-однородный волновод глубиной $H = 70$ м, постоянная по глубине скорость звука $c = 1480$ м/с. Диапазон частот $\Delta f = 480\text{-}520$ Гц. Средняя частота спектра $f_0 = 500$ Гц. Параметры поглощающего жидкого однородного дна: отношение плотности грунта и воды $\rho = 1.8$, комплексный показатель преломления $n = 0.84(1 + j0.04)$.

Число элементов антенны $V = 3, 7, 11$. Межэлементное расстояние $d = 1.5$ м. Оно примерно соответствует половине длине волны на частоте $f_0 = 500$ Гц. Элементы горизонтальной антенны расположены на глубине $z_b = 50$ м. Углы: $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Выделенная постоянная распространения равна постоянной распространения первой моды, $h_s(f_0) = h_1(f_0) = 2.1182 \text{ м}^{-1}$. Согласно численным расчетам коэффициенты усиления антенны χ не зависят от угла наблюдения θ и равны: 8.7 ($V = 3$), 47.9 ($V = 7$), 119.3 ($V = 11$). Они близки к теоретической оценке $\chi = V^2$.

Шумовой источник расположен на глубине $z_s = 20$ м и с радиальной скоростью $w = 2$ м/с удалялся от антенны. В начальный момент времени $t_0 = 0$ источник удален от опорного элемента Q_1 антенны на расстояние $r_0 = 10$ км. Время накопления $\Delta t = 30$ с, длительность шумовой реализации $t_s = 2$ с, временной интервал $\delta t_s = 0.5$ с, число реализаций $J = 12$. Предельные входные отношения c/p : при использовании одиночного приемника $q_{\text{lim}}^{(r)} \approx 10^{-2} (-20 \text{ dB})$. При использовании антенны: а) $V = 3$, $q_{\text{lim}}^{(an)} \approx 3.4 \cdot 10^{-3} (-24, 7 \text{ dB})$; б) $V = 7$, $q_{\text{lim}}^{(an)} \approx 1.5 \cdot 10^{-3} (-28, 2 \text{ dB})$; в) $V = 11$, $q_{\text{lim}}^{(an)} \approx 9.2 \cdot 10^{-4} (-30, 4 \text{ dB})$. Вероятности ложной тревоги $p_2 = 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$.

Иллюстративный материал изображен на **Рис. 2-5**. **Рис. 2** демонстрирует нормированные интерферограммы и модули голограмм в отсутствие помехи для одиночного приемника семи элементной антенны. С целью повышения контрастности на интерферограммах отфильтрованы постоянные составляющие (фон) для мод номеров $m = n$. Если постоянные составляющие не вычитать из интерферограмм до применения преобразования Фурье, то на голограммах в области начала координат появится пик большой интенсивности. Область локализации спектральной плотности на голограммах (**Рис. 2b,d**) выделена пунктиром. Из

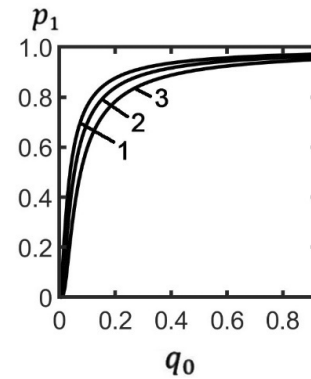


Рис. 3. Зависимость вероятности правильного обнаружения p_1 от входного отношения c/p q_0 для различных значений вероятностей ложной тревоги p_2 : кривая 1 – $p_2 = 0.1$, кривая 2 – $p_2 = 0.01$, кривая 3 – $p_2 = 0.001$. Одиночный приемник.

Рис. 2b,d следует, что геометрия расположения спектральной плотности одиночного приемника и антенны вне зависимости от угла наблюдения близки между собой. Данный результат не зависит от числа элементов антенны. Согласно **Рис. 2b,d** коэффициент сжатия оценивается как $\gamma = 6$.

На **Рис. 3** представлены кривые обнаружения шумового сигнала для одиночного приемника. С уменьшением вероятности ложной тревоги вероятность правильного обнаружения уменьшается. По результатам вычислений параметр $k_n = 1.42$ ($p_2 = 0.1$), $k_n = 2.14$ ($p_2 = 0.01$), $k_n = 2.72$ ($p_2 = 0.001$).

Кривые обнаружения шумового сигнала с применением антенны приведены на **Рис. 4**. По данным численного моделирования они не зависят от угла наблюдения θ . **Рис. 4a,b,c** показывают, как возрастают вероятности правильного обнаружения p_1 с увеличением числа элементов антенны V . Например, для вероятности ложной тревоги $p_2 = 0.001$ вероятность правильного обнаружения $p_1 = 0.8$ достигается для входных отношений c/p $q_0 = 0.044$ при $V = 3$, $q_0 = 0.019$ при $V = 7$, $q_0 = 0.012$ при $V = 11$.

На **Рис. 5** показаны зависимости коэффициента эффективности $\beta(q_0)$ при различных значениях вероятностей ложной тревоги p_2 и числа элементов антенны V . Различие в вероятностях правильного обнаружения между одиночным приемником и антенной сосредоточено преимущественно в области

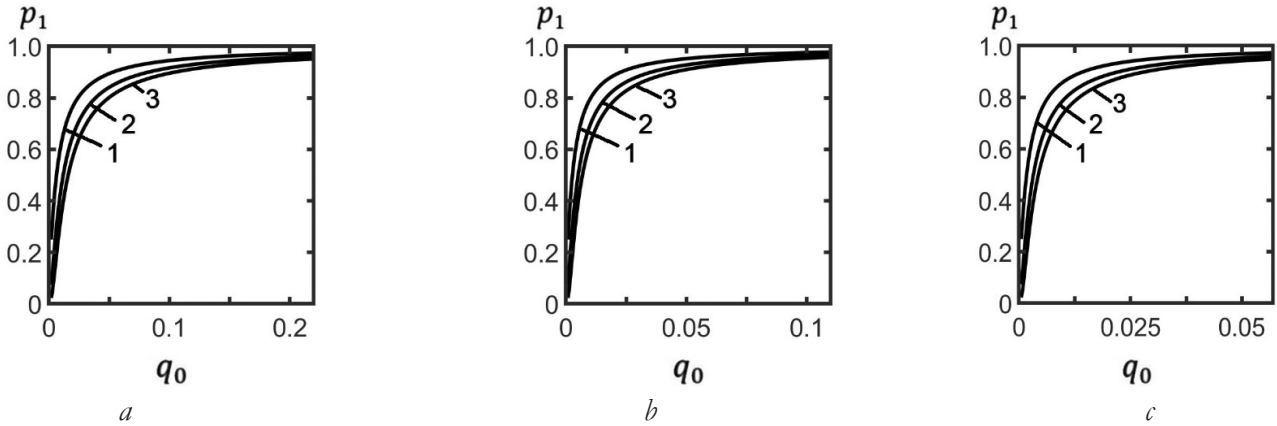


Рис. 4. Зависимость вероятности правильного обнаружения p_1 от входного отношения c/n q_0 для различных значений вероятностей ложной тревоги p_2 и числа элементов антенны V . Кривая 1 – $p_2 = 0.1$, кривая 2 – $p_2 = 0.01$, кривая 3 – $p_2 = 0.001$. $V = 3$ (a), $V = 7$ (b), $V = 11$ (c).

малых отношений c/n q_0 и с повышением числа элементов V различие увеличивается. С возрастанием значений q_0 это различие уменьшается и асимптотически стремится к нулю.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема обнаружения слабого сигнала в присутствии интенсивной помехи остро стоит в гидроакустике. Трудности подхода к ее решению вытекают из ограниченности разработанных помехоустойчивых обработок гидроакустических сигналов. В настоящее время интерферометрическая обработка, в отличие от других известных методов обработки, позволяет с большей помехоустойчивостью обнаруживать и оценивать параметры источника при малых отношениях c/n . Это обусловлено двумя моментами.

Во-первых, обработка реализует многократное квазикогерентное накопление спектральной плотности волнового поля вдоль локализованных полос интерферограммы в переменных частота-время. Во-вторых, на выходе интегрального преобразования спектральная плотность сигнала концентрируется в малой области. Линейные размеры этой области обратно пропорциональны времени наблюдения, ширине полосы и уменьшаются с увеличением радиальной скоростью источника. Чем меньше область концентрации сигнала, тем выше помехоустойчивость обработки.

На основе интерферометрической обработке рассмотрено обнаружение шумового источника по критерию Неймана-Пирсона с применением горизонтальной линейной антенны. Получены аналитические зависимости кривых обнаружения в зависимости от входного отношения c/n

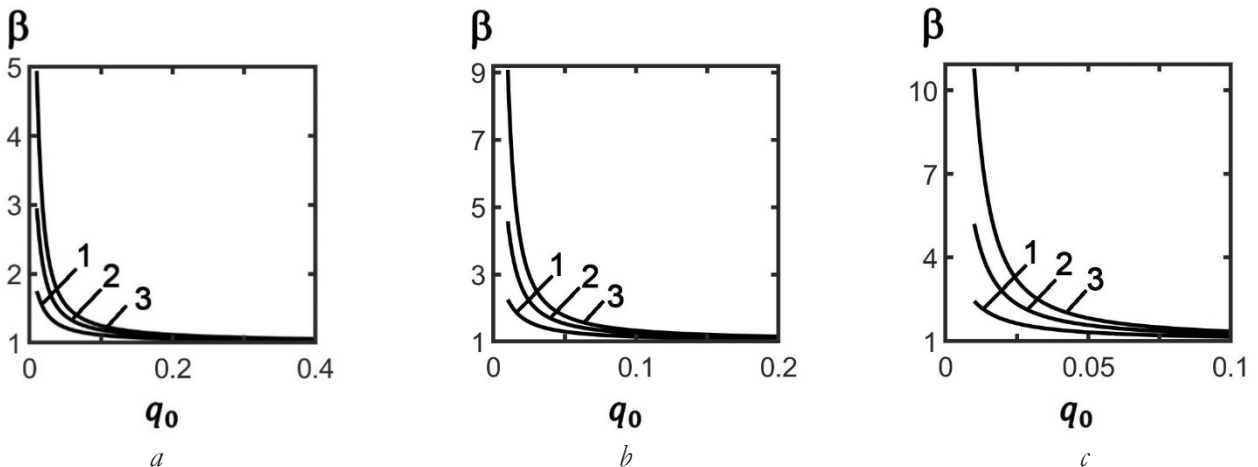


Рис. 5. Зависимость коэффициента эффективности β от входного отношения c/n q_0 для различных значений вероятностей ложной тревоги p_2 и числа элементов антенны V . Кривая 1 – $p_2 = 0.1$, кривая 2 – $p_2 = 0.01$, кривая 3 – $p_2 = 0.001$. $V = 3$ (a), $V = 7$ (b), $V = 11$ (c).

и числа элементов антенны. Выполнены численные расчеты. Оценена эффективность обнаружения малошумного сигнала антенной по сравнению с одиночным приемником.

ЛИТЕРАТУРА

- Weston DE, Stevens KJ. Interference of wide band sound in shallow water. *J. Sound. Vib.*, 1972, 21(1):57-64.
- Чупров СД. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане. *Акустика океана. Современное состояние*. М., Наука, 1982, с. 71-82.
- Kuperman WA, D'Spain GL. Ocean acoustic interference phenomena and signal processing. *AIP Conf. Proc. ed. by W.A. Kuperman and G.L. D'Spain*. 2002, N.Y., Melville.
- Thode AM. Source ranging with minimal environmental information using a virtual receiver and waveguide invariant theory. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000, 108(4):1582-1594.
- Quijanoa JE, Zurk LM, Rouseff D. Demonstration of the invariance principle for active sonar. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, 123(3):1329-1337.
- Tao H, Krolik JL. Waveguide invariant focusing for broadband beam forming in an oceanic waveguide. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, 123(3):1338-1346.
- Cocrell KL, Smidt H. Robust passive range estimation using the waveguide invariant. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010, 127(5):2780-2789.
- Rouseff D, Zurk LM. Striation based beam forming for estimating the waveguide invariant with passive sonar. *J. Acoust. Soc. Am. Express Lett.*, 2011, 130(2):76-81.
- Беседина ТН, Кузнецов ГН, Кузькин ВМ, Пересёлков СА. Определение глубины источника звука в мелком море на фоне интенсивного шума. *Акуст. журн.*, 2015, 61(6):718-728.
- Кузнецов ГН, Кузькин ВМ, Пересёлков СА. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море. *Акуст. журн.*, 2017, 63(4):406-418.
- Казначеев ИВ, Кузнецов ГН, Кузькин ВМ, Пересёлков СА. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником. *Акуст. журн.*, 2018, 64(1):33-45.
- Kuz'kin VM, Pereselkov SA, Kuznetsov GN, Kaznacheev IA. Interferometric direction finding by a vector-scalar receiver. *Phys. Wave Phenom.*, 2018, 26(1):63-73.
- Kuz'kin VM, Kuznetsov GN, Pereselkov SA, Grigor'ev VA. Resolving power of the interferometric method of source localization. *Phys. Wave Phenom.*, 2018, 26(2):150-159.
- Пересёлков СА, Кузькин ВМ, Кузнецов ГН, Просовецкий ДЮ, Ткаченко СА. Интерференционный метод оценки координат движущегося шумового источника в мелком море с использованием высокочастотных сигналов. *Акуст. журн.*, 2020, 66(4):437-445.
- Kuz'kin VM, Lyakhov GA, Pereselkov SA, Matvienko YuV, Tkachenko SA. Noise-source detection in an oceanic waveguide using interferometric processing. *Phys. Wave Phenom.*, 2020, 28(1):68-74.
- Caiti A, Munafo A, Vettori G. A geographical information system (gis)-based simulation tool to assess civilian harbor protection levels. *IEEE J. of Oceanic Engineering*, 2012, 37(1):85-102.
- Kaznacheev IV, Kuz'kin VM, Kutsov MV, Lyakhov GA, Pereselkov SA. Interferometry in acoustic-data processing using extended antennas. Space-time analogy. *Phys. Wave Phenom.*, 2020, 28(4):326-332.
- Бреховских ЛМ, Лысанов ЮП. *Теоретические основы акустики океана*. Л., Гидрометеиздат, 1982, 264 с.

Кузькин Венедикт Михайлович

д.ф.-м.н.

ИОФ им. А.М. Прохорова РАН

38, ул. Вавилова, Москва 119991, Россия

E-mail: kumiov@yandex.ru

Пересёлков Сергей Алексеевич

д.ф.-м.н.

Воронежский государственный университет

1, Университетская пл., Воронеж 394006, Россия

E-mail: pereselkov@yandex.ru

Матвиенко Юрий Викторович

д.ф.-м.н.

ИПМТ ДВО РАН

5а, ул. Суханова, Владивосток 690091, Россия

E-mail: ymat@marine.febras.ru

Ткаченко Сергей Александрович

аспирант

Воронежский государственный университет

1, Университетская пл., Воронеж 394006, Россия

E-mail: sega-th@mail.ru.

Просовецкий Дмитрий Юрьевич

к.ф.-м.н.

Воронежский государственный университет

1, Университетская пл., Воронеж 394006, Россия

E-mail: prosovetsky@mail.ru.