

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.169

Голографическая обработка гидроакустической информации с применением линейных антенн

¹Кузькин В.М., ²Пересёлков С.А., ³Матвиенко Ю.В., ⁴Грачев В.И., ²Ткаченко С.А., ²Стадная Н.П.

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

⁴Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>
Москва 125009, Российская Федерация

E-mail: kumiov@yandex.ru, pereselkov@yandex.ru; ymat@marine.febras.ru, grachev@cplire.ru, sega-th@mail.ru, stadnaya.edu@yandex.ru

Поступила 25.05.2023, рецензирована 31.05.2023, принята 07.06.2023

Аннотация: Рассмотрено формирование интерферограммы и голограммы движущегося подводного шумового источника с использованием линейных антенн. Выведена связь спектральной плотности голограммы с апертурой и угловой зависимостью принимаемого поля. Оценен коэффициент усиления антенны. Обсужден вопрос о предельном входном отношении сигнал/помеха, при котором сохраняется работоспособность голографической обработки. Получено аналитическое выражение, устанавливающее связь между отношениями сигнал/помеха на выходе и входе антенны. Сформулированы условия, при которых интерферограмма источника не искажается.

Ключевые слова: мелководная акватория, интерферограмма, голограмма, шумовой источник, линейная антенна, отношение сигнал/помеха, параметры антенны

УДК 004.052.34

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/>. Численные расчеты параметров антенны С.А. Ткаченко проведены при поддержке гранта Президента РФ МК-4846.2022.4.

Для цитирования: Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Матвиенко Ю.В., Грачев В.И., Ткаченко С.А., Стадная Н.П. Голографическая обработка гидроакустической информации с применением линейных антенн. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(2):169-178. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.169.

Holographic processing of hydroacoustic information using linear antennas

Venedikt M. Kuz'kin

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

E-mail: kumiov@yandex.ru

Sergey A. Pereselkov, Sergey A. Tkachenko, Nadezhda P. Stadnaya

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

E-mail: pereselkov@yandex.ru; sega-th@mail.ru, stadnaya.edu@yandex.ru

Yuri V. Matvienko

Institute for Marine Technology Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, <http://www.febras.ru/>

Vladivostok 690091, Russian Federation

E-mail: ymat@marine.febras.ru

Vladimir I. Grachev

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>

Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: grachev@cplire.ru

Received May 25, 2023, peer-reviewed May 31, 2023, accepted June 07, 2023

Abstract: The formation of an interferogram and a hologram of a moving underwater noise source using linear antennas is considered. The relationship between the spectral density of the hologram and the aperture and the angular dependence of the received field is derived. Antenna gain has been estimated. The issue of the limiting signal-to-noise ratio at which the holographic processing remains operational is discussed. An analytical expression is obtained that establishes a relationship between the signal/noise ratios at the output and input of the antenna. Conditions are formulated under which the interferogram of the source is not distorted.

Keywords: shallow water area, interferogram, hologram, noise source, linear antenna, signal-to-noise ratio, antenna parameters

UDC 004.052.34

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/>. Numerical calculations of antenna parameters S.A. Tkachenko were supported by the grant of the Russian Federation President MK-4846.2022.4.

For citation: Venedikt M. Kuz'kin, Sergey A. Pereselkov, Yuri V. Matvienko, Vladimir I. Grachev, Sergey A. Tkachenko, Nadezhda P. Stadnaya. Holographic processing of hydroacoustic information using linear antennas. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(2):169-178e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.169.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (170)
 2. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕНН (171)
 - 2.1. ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ АНТЕННА (171)
 - 2.2. ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ АНТЕННА (172)
 3. ПАРАМЕТРЫ АНТЕНН (173)
 - 3.1. КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРАВЛЕННОСТИ (173)
 - 3.2. ПРЕДЕЛЬНОЕ ВХОДНОЕ ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ПОМЕХА (173)
 - 3.3. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ (173)
 4. КРИТЕРИИ ФОРМИРОВАНИЯ НЕИСКАЖЕННОЙ ИНТЕРФЕРОГРАММЫ (175)
 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (176)
- ЛИТЕРАТУРА (177)

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из актуальных направлений подводных исследований является освещение подводной обстановки, обеспечивающее обнаружение и локализацию (разрешение, определение пеленга, радиальной скорости, удаленности и глубины) движущихся подводных малозумных источников

звука с использованием малогабаритных антенн. Решение этой проблемы на основе голографической обработки, построенной на устойчивых структурных особенностях интерференционной картины (интерферограммы), формируемой шумовым источником, рассмотрено в работах [1–3]. Под интерферограммой понимаются энергетические характеристики принимаемого векторно-скалярного поля в переменных частота-время.

Голографическая обработка реализует квазикогерентное накопление спектральной плотности шумового источника вдоль локализованных полос интерферограммы в переменных частота-время. За время наблюдения Δt в полосе Δf накапливаются J независимых реализаций длительностью t_1 и с временным интервалом t_2 между ними

$$J = \frac{\Delta t}{t_1 + t_2}. \quad (1)$$

Реализации независимы, если $t_2 > 1/\Delta f$. Накопление помехи некогерентно. Формируется интерферограмма в переменных частота-время, к которой применяется

двумерное преобразование Фурье. На выходе интегрального преобразования (голограммы) спектральная плотность концентрируется в узкой полосе в форме фокальных пятен, вызванных интерференцией мод различных номеров. Спектральная плотность помехи распределена по всей области. Такая обработка обладает высокой помехоустойчивостью. По расположению спектральных плотностей голограмм и некоторых априорных данных о канале распространения решаются задачи обнаружения, пеленгования, определения радиальной скорости, удаленности и разрешения источников.

Голографическая обработка сегодня – весьма активная область исследований, в которой получено много интересных результатов, представляющих теоретический и практический интерес. Во-первых, разработан метод восстановления интерферограммы невозмущенного поля на стационарной трассе, когда интенсивные внутренние волны вызывают горизонтальную рефракцию и взаимодействие мод акустического поля [4-7]. Во-вторых, предложен помехоустойчивый метод обнаружения и локализации движущихся малозумных источников, устойчивый по отношению к гидродинамической изменчивости океанической среды [8]. В-третьих, созданы адаптивные алгоритмы определения параметров источника, не требующие знаний о характеристиках среды распространения [9,10]. Далее, в-четвертых, реализован метод разрешения нескольких источников различной интенсивности в условиях, когда их интерферограммы перекрываются по частоте и времени, и маскируются помехой [11]. Наконец, в-пятых, разработан метод выделения мод акустического поля и определения их параметров [12-14]. Немалую роль в прогрессе развития голографической интерферометрии в мелководных акваториях сыграли работы [15-18].

Цель данной статьи, во-первых, описать голографическую обработку с применением линейных антенн и рассмотреть их характеристики, определяющие результативность работы. Во-вторых, выявить условия приема,

при которых не искажается интерферограмма источника в отсутствие помехи.

2. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕНН

Пусть число элементов Q_b приемной антенны равно B , $b = \overline{1, B}$, межэлементное расстояние – d . Принимаемый спектр шумового источника, движущегося с радиальной скоростью w на глубине z_0 , сосредоточен в частотном диапазоне $f_1 \leq f \leq f_2$, где $f_{1,2} = f_0 \pm (\Delta f/2)$, Δf и f_0 – ширина полосы и средняя частота спектра. Поля с каждого элемента антенны суммируются, и на выходе формируется интерферограмма, к которой применяется двумерное преобразование Фурье. Обработку рассмотрим на примере скалярной компоненты поля, т.е. спектра звукового давления $p(f, t)$.

2.1. ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ АНТЕННА

Схема расположения источника S и горизонтальной линейной антенны приведена на **Рис. 1**. Элементы антенны находятся на глубине z_0 . Опорным элементом антенны выбран 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.

При суммировании полей с элементов антенны компенсируется разность расстояний от источника до различных ее элементов в направлении угла θ . Поэтому поле Q_b элемента умножается на экспоненциальный множитель $\exp[ih_*(f_0)(b - 1)d \sin \theta]$. Здесь $h_*(f_0)$ – выделенная вещественная часть горизонтального волнового

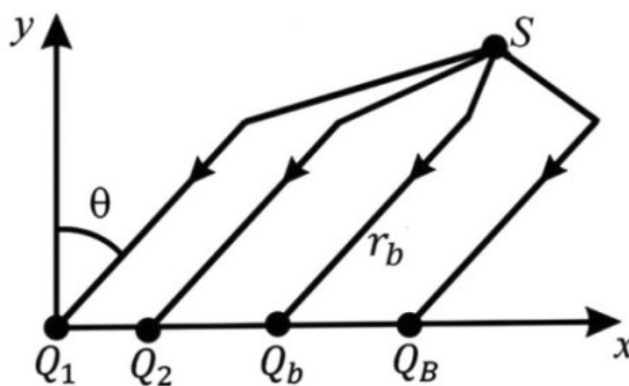


Рис. 1. Геометрия задачи (вид в горизонтальной плоскости): r_b – горизонтальное расстояние элемента Q_b до источника S , θ – угол направления на источник.

числа (постоянная распространения) на средней частоте f_0 спектра источника, θ_* – угол компенсации. Поле на выходе Q_b элемента антенны представим в форме суммы мод [19]

$$p_b(f, r_b) = \sum_m A_m(f, r_b) \exp\left\{i\left[h_m(f)r_1 - 2(b-1)(h_m(f) - h_*(f_0)_*)\right]\right\}, \quad (2)$$

где $\eta = d\sin\theta/2$, $\eta_* = d\sin\theta_*/2$. (3)

Здесь A_m и h_m – амплитуда и постоянная распространения m -моды. Цилиндрическое расхождение поля, модальное затухание, глубины источника z_s и элементов антенны z_b учитываются в амплитуде мод. На выходе антенны поле $p_{an}(f, r_1)$, пренебрегая зависимостью амплитуды от расстояния, $A_m(f, r_1) \approx A_m(f, r_b)$, запишем как

$$p_{an}(f, r_1) = \sum_m A_m(f, r_1) I_m \exp\left\{i\left[h_m(f)r_1 - (B-1)(h_m(f)\eta - h_*(f_0)\eta_*)\right]\right\}, \quad (4)$$

где $I_m(f) = \frac{\sin[B(h_m(f)\eta - h_*(f_0)\eta_*)]}{\sin(h_m(f)\eta - h_*(f_0)\eta_*)}$. (5)

Интерферограмма антенны $P_{an}(f, r_1) = |p_{an}(f, r_1)|^2$, согласно (4), равна

$$P_{an}(f, r_1) = \sum_m \sum_n P_{an}^{(mn)}(f, r_1), \quad (6)$$

$$P_{an}^{(mn)}(f, r_1) = A_m(f, r_1) A_n^*(f, r_1) I_{mn}(f) \times \exp\left[ih_{mn}(f)(r_1 - (B-1)\eta)\right], \quad (7)$$

где $I_{mn}(f) = I_m(f) I_n^*(f)$. (8)

Здесь $h_{mn}(f) = h_m(f) - h_n(f)$. Пусть в начальный момент времени $t_0 = 0$ расстояние $r_1 = r_0$. В интерферограмме (6) от переменной расстояния r_1 перейдем к временной переменной t , $r_1 = r_0 + vt$ и применим к ней двумерное преобразование Фурье.

На выходе интегрального преобразования (голограммы) спектральная плотность выражается через интерферограмму как

$$F_{an}(v, \tau) = 2\pi \int_0^{\Delta t} \int_{f_1}^{\Delta f_2} P_{an}(f, t) \exp[i2\pi(vt - \tau t)] dt df = \sum_m \sum_n F_{an}^{(mn)}(v, \tau), \quad (9)$$

где v и τ – частота и время голограммы; Δt – время наблюдения. Используя подход при вычислении

голограммы одиночного приемника [1], для парциальных голограмм антенны получаем

$$F_{an}^{(mn)}(v, \tau) = 2\pi A_m(f_0, r_0) A_n^*(f_0, r_0) I_{mn}(f_0) \Delta f \Delta t \times \exp\left[i2\pi\left(\frac{v\Delta t}{2} - \tau f_0\right)\right] \times \exp\left\{i\left[h_{mn}(f_0)\left(\frac{w\Delta t}{2} + r - (B-1)\eta\right)\right]\right\} \times \sin\left\{\pi\left[(r_0 - (B-1)\eta + wt_*)\frac{1}{2\pi} \frac{dh_{mn}(f_0)}{df} - \tau\right] \Delta f\right\} \times \frac{\sin\left\{[wh_{mn}(f_0) + 2\pi v] \frac{\Delta t}{2}\right\}}{[wh_{mn}(f_0) + 2\pi v] \frac{\Delta t}{2}}. \quad (10)$$

Здесь t_* – выделенный момент времени на интервале наблюдения Δt , $0 < t_* < \Delta t$. Если положить $B = 1$, то $I_{mn}(f_0) = 1$ и формула (10) переходит в соответствующую формулу для одиночного приемника [1]. Множитель $I_{mn}(f_0)$ (8) определяет распределение спектральной плотности голограммы антенны по отношению к одиночному приемнику. Зависимости $I_{mn}(f_0)$ от угла θ при угле компенсации $\theta_* = 0$ рассмотрены в [20].

2.2. ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ АНТЕННА

Поле на выходе b -го элемента на горизонтальном удалении r от источника шума запишем в виде суммы мод как [19]

$$p_b(f, r, z_b) = \sum_m \psi_m(z_b) A_m(f, r) \exp[ih_m(f)r], \quad (11)$$

где $\psi_m(z)$ – собственная функция m -й моды. В (11) медленным изменением собственной функции от частоты пренебрегается. На выходе антенны поле источника принимает вид

$$p_{an}(f, r) = \sum_b p_b(f, r) = \sum_m E_m A_m(f, r) \exp[ih_m(f)r], \quad (12)$$

где $E_m = \sum_b \psi_m(z_b)$. (13)

Интерферограмма антенны, согласно (12), равна

$$P_{an}(f, r) = \sum_m \sum_n P_{mn}(f, r), \quad (14)$$

$$P_{mn}(f, r) = E_m E_n^* A_m(f, r) A_n^*(f, r) \exp[ih_{mn}(f)r]. \quad (15)$$

Пусть начальному моменту времени $t_0 = 0$ соответствует расстояние r_0 . В интерферограмме (14) от переменной расстояния r перейдем

к временной переменной t и применим к ней двумерное преобразование Фурье (9). В результате для парциальных голограмм антенны получаем

$$F_{an}^{(mn)}(\nu, \tau) = 2\pi A_m(f_0, r_0) A_n^*(f_0, r_0) E_m E_n^* \Delta f \Delta t \times \exp\left[i2\pi\left(\frac{\nu \Delta t}{2} - \tau f_0\right)\right] \exp\left[ih_{mn}(f_0)\left(\frac{w \Delta t}{2} + r_0\right)\right] \times \frac{\sin\left\{\pi\left[(r_0 + wt_*)\frac{1}{2\pi} \frac{dh_{mn}(f_0)}{df} - \tau\right] \Delta f\right\}}{\pi\left[(r_0 + wt_*)\frac{1}{2\pi} \frac{dh_{mn}(f_0)}{df} - \tau\right] \Delta f} \times \frac{\sin\left\{[wh_{mn}(f_0) + 2\pi\nu]\frac{\Delta t}{2}\right\}}{[wh_{mn}(f_0) + 2\pi\nu]\frac{\Delta t}{2}}. \quad (16)$$

Если положить $B = 1$, то соотношение (16) переходит в выражение для одиночного приемника [1]. Спектральная плотность парциальных голограмм антенны $F_{an}^{(mn)}$ по отношению к одиночному приемнику отличается весовым множителем $E_m E_n^*$. По этой причине области локализации спектральной плотности для антенны и одиночного приемника близки по форме.

3. ПАРАМЕТРЫ АНТЕНН

3.1. Коэффициент усиления и характеристика направленности

Результативность голографической обработки с использованием приемных антенн характеризует коэффициент усиления

$$\chi = G_{an}/G_r \quad (17)$$

и характеристика направленности (горизонтальная антенна)

$$D = G_{an}/\max G_{an}, \quad (18)$$

где

$$G_{an,r} = \iint |F_{an,r}(\tau, \nu)|^2 d\tau d\nu. \quad (19)$$

Индекс "r" относится к одиночному приемнику. В направлении угла компенсации коэффициент усиления горизонтальной антенны достигает максимального значения $\chi_{\max} \cong B^2$. Коэффициент усиления χ вертикальной антенны $\chi \approx B^2$. Таким образом, коэффициенты усиления горизонтальной и вертикальной антенн сопоставимы между собой. Результаты численного моделирования по рассмотрению коэффициента усиления и характеристики

направленности линейных антенн обсуждались в работах [20,21].

3.2. ПРЕДЕЛЬНОЕ ВХОДНОЕ ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ПОМЕХА

Голографическая обработка имеет определенные ограничения, которые кроются в природе интерференционных явлений и наличии помехи. Ограничение, связанное с помехой, удобно характеризовать предельным (минимальным) входным отношением сигнал/помеха (с/п) q_{\lim} , когда для входных значений с/п $q_0 > q_{\lim}$ обеспечивается устойчивое обнаружение и оценки пеленга, радиальной скорости, удаления и глубины близки реальным. В случае изотропной помехи и одиночного приемника для скалярной компоненты поля шумового источника $q_{\lim}^{(r)} \approx 1.5J^2$ [2]. Оценка установлена на основании ряда физических соображений и проверена на результатах численных и натурных экспериментов. При использовании комбинационных составляющих векторно-скалярного поля значение $q_{\lim}^{(r)}$ уменьшается в 2-5 раз [2,3]. Обобщим оценку предельного входного отношения с/п одиночного приемника на линейные антенны.

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 предельное входное отношение с/п на элементе антенны оценивается как

$$q_{\lim}^{(an)} = \alpha q_{\lim}^{(r)}, \quad (20)$$

где $\alpha = B/\chi$. Значение $\chi \approx B^2$, так что $\alpha \approx 1/B$. Входные отношения с/п на единичном элементе антенны, когда оценки параметров источника близки реальным значениям, ограничены неравенством $q_0 > q_{\lim}^{(an)}$. Если вначале на каждом b -м приемнике выполнить голографическую обработку и затем на выходе антенны просуммировать спектральные плотности голограмм, то выигрыша в предельном отношении с/п по отношению к одиночному приемнику не получится.

3.3. Помехоустойчивость

Рассмотрим, как связано отношение с/п на выходе антенны $q_{an}^{(out)}$ с отношением с/п на входе элемента антенны q_0 . Их отношение,

как известно, определяет помехоустойчивость обработки

$$\rho_{an} = \frac{q_{an}^{(out)}}{q_0}. \quad (21)$$

При решении данной задачи проанализируем вначале вопрос о связи отношений с/п на выходе $q_r^{(out)}$ и входе q_0 одиночного приемника.

Пусть спектры давления шумового сигнала и помехи, которые обозначим $s(t, f)$ и $n(t, f)$, сосредоточены в полосе Δf . Сигнал и помеха являются взаимонезависимыми гауссовскими случайными стационарными процессами с нулевыми математическими ожиданиями. Ограничимся значениями q_0 , удовлетворяющими условию $q_0 > q_{lim}^{(r)}$. Примем, что в полосе Δf содержится W локализованных полос шириной δf и контрастность интерферограммы, т.е. видность полос, равна единице. Положим, что вдоль интерференционных полос поле шумового сигнала накапливается когерентно, а помехи – некогерентно. Строго говоря, это положение не выполняется, однако с качественной и количественной стороны, как показывают данные компьютерного моделирования и натурных экспериментов [1–3,11], результаты остаются вполне осмысленными.

Под отношением с/п q_0 на входе одиночного приемника в начальный момент времени $t = 0$ понимается величина

$$q_0 = q(0) = \frac{\bar{E}_s(0)}{\bar{E}_n(0)}, \quad (22)$$

где

$$\bar{E}_s(0) = 2 \int_0^{\infty} \overline{|s(0, f)|^2} df = 2 \Delta f \overline{|s(0, f_s')|^2}, \quad (23)$$

$$\bar{E}_n(0) = 2 \int_0^{\infty} \overline{|n(0, f)|^2} df = 2 \Delta f \overline{|n(0, f_n')|^2}, \quad (24)$$

– средние энергии сигнала и помехи. Здесь f_s' и f_n' – выделенные частоты сигнала и помехи в полосе Δf . Черта сверху означает усреднение по ансамблю реализаций. В соответствии с (23), (24) входное отношение с/п (22) равно

$$q_0 = \frac{\overline{|s(0, f_s')|^2}}{\overline{|n(0, f_n')|^2}}. \quad (25)$$

Средние энергии сигнала и помехи на выходе траекторного накопления за время Δt можно записать в форме сложения энергий на временных интервалах длительностью t_1 вдоль интерференционных полос

$$\bar{E}_s(\Delta t) = 2 \int_0^{\infty} \overline{\left| \sum_{j=1}^J W s(t_j, f) \right|^2} df, \quad (26)$$

$$\bar{E}_n(\Delta t) = 2 W J \sum_{j=1}^J \int_0^{\infty} \overline{|n(t_j, f)|^2} df. \quad (27)$$

Пользуясь предположением стационарности процессов, выражения (26), (27) можно привести к виду

$$\bar{E}_s(\Delta t) = 2 W^2 J^2 \overline{|s(f_s'')|^2} \delta f, \quad (28)$$

$$\bar{E}_n(\Delta t) = 2 W J \overline{|n(f_n'')|^2} \delta f, \quad (29)$$

так что на выходе траекторного накопления отношение с/п равно

$$q_r(\Delta t) = \frac{\bar{E}_s(\Delta t)}{\bar{E}_n(\Delta t)} = W J \frac{\overline{|s(f_s'')|^2}}{\overline{|n(f_n'')|^2}}. \quad (30)$$

Здесь f_s'' и f_n'' – выделенные частоты сигнала и помехи в полосе δf .

Используя входное отношение с/п (25), выражение (30) представим в форме

$$q_r(\Delta t) = J W \frac{\overline{|s(f_s'')|^2} \overline{|n(f_n')|^2}}{\overline{|n(f_n'')|^2} \overline{|s(f_s')|^2}} q_0. \quad (31)$$

В начальный момент времени средние энергии сигнала (23) и помехи (24) можно также выразить как

$$\bar{E}_s(0) = 2 W^2 \overline{|s(f_s'')|^2} \delta f, \quad (32)$$

$$\bar{E}_n(0) = 2 W \overline{|n(f_n'')|^2} \delta f. \quad (33)$$

Из сравнения выражений (23), (24) и (32), (33) находим

$$\overline{|s(f_s')|^2} \Delta f_1 = W \overline{|s(f_s'')|^2} \Delta f_2, \quad (34)$$

$$\overline{|n(f_n')|^2} \Delta f_1 = W \overline{|n(f_n'')|^2} \Delta f_2. \quad (35)$$

и тогда выражение (32) принимает вид

$$q_r(\Delta t) = J q_0, \quad (36)$$

так что на выходе траекторного накопления отношение с/п не зависит от числа интерференционных полос W и их ширины δf и с точностью до множителя J пропорционально входному отношению с/п q_0 .

Таким образом, многократное когерентное сложение интерференционных максимумов волнового поля шумового источника вдоль локализованных полос увеличивает выходное отношение с/п $q_r(\Delta t)$ в J раз по отношению к входному значению q_0 . Такое увеличение становится понятным, если провести аналогию с когерентной пространственной обработкой многоэлементной антенны, содержащей J приемников: по отношению к одиночному приемнику отношение с/п возрастает в J раз.

Запись интерферограммы на голограмму и очищение области локализации спектральной плотности от помехи приводит к дополнительному увеличению выходного отношения с/п по сравнению с $q_r(\Delta t)$. Двумерное преобразование Фурье интерферограммы локализует двумерную спектральную плотность шумового сигнала в пределах узкой полосы голограммы, площадь которой можно оценить как

$$S_s = \frac{\tau_*}{\Delta t}. \quad (37)$$

Здесь τ_* – положение главного максимума фокального пятна на осевом времени, обусловленного интерференцией между крайними модами. Спектральная плотность помехи распределена во всей области голограммы, площадь которой равна

$$S_n = |\nu_*| \tau_*, \quad (38)$$

где ν_* – положение главного максимума фокального пятна на оси частоты, обусловленного интерференцией между крайними модами. При интегральном преобразовании энергия не изменяется.

Полагая мощность помехи равномерно распределенной в области голограммы, отношение с/п на выходе голографической обработки можно представить как

$$q_r^{(out)} = \gamma q_r(\Delta t), \quad \gamma = S_n / S_s, \quad (39)$$

где коэффициент концентрации, согласно (37), (38), $\gamma = |\nu_*| \Delta t$. В случае неподвижного источника величина ν_* заменяется шириной спектра $\Delta \nu$ в области голограммы. В соответствии с (36) выражение (39) принимает вид

$$q_r^{(out)} = J \gamma q_0. \quad (40)$$

Таким образом, помехоустойчивость голографической обработки с применением одиночного приемника оценивается как

$$\rho_r = J \gamma. \quad (41)$$

Нетрудно сообразить, как можно оценить выходное отношение с/п на выходе антенны. Согласно (10), (16) значение коэффициента концентрации γ не изменяется. Принимая во внимание, что шумовой сигнал и помеха накапливаются когерентно и не когерентно, отношение с/п на выходе антенны, по отношению к одиночному приемнику, возрастает в $1/\alpha = \chi B \approx B$ раз. Следовательно, отношение с/п на выходе антенны составит

$$q_{an}^{(out)} = (J \gamma / \alpha) q_0. \quad (42)$$

4. КРИТЕРИИ ФОРМИРОВАНИЯ НЕИСКАЖЕННОЙ ИНТЕРФЕРОГРАММЫ

На формирование интерферограммы, соответственно и голограммы, влияют фоновая помеха, пространственно-временные неоднородности среды распространения и условия приема. В настоящее время состояние вопроса по влиянию искажающих факторов на формирование интерферограммы в основном сконцентрировано на таких аспектах, как помеха [1-3] и интенсивные внутренние волны [4-8].

В данном разделе рассмотрено влияние условий приема – ширины полосы и времени накопления – на формирование неискаженной интерферограммы в регулярном волноводе в отсутствие помехи. Исходя из того, что интерференционная картина источника звука характеризуется частотными $\Lambda_f^{(mn)}$ и временными $\Lambda_t^{(mn)}$ масштабами изменчивости, обусловленными интерференцией m -й и n -й модами [19]

$$\Lambda_f^{(mn)} = \frac{2\pi}{r |dh_{mn}(f_0)/df|}, \quad \Lambda_t^{(mn)} = \frac{1}{|wh_{mn}(f_0)|}, \quad (43)$$

установим следующие два критерия формирования неискаженной интерферограммы. Для любой пары (m, n) мод:

I. Частотный диапазон $f_1 \leq f \leq f_2$ не должен быть меньше частотного периода изменчивости интерферограммы

$$\Delta f \geq \Lambda_f^{(mn)}. \quad (44)$$

П. Время наблюдения Δt не должно быть меньше временного периода изменчивости интерферограммы

$$\Delta t \geq \Lambda_i^{(mn)}. \quad (45)$$

Из условий (44), (45) следуют определенные ограничения на ширину полосы и время наблюдения в зависимости от расстояния, радиальной скорости и частотно-временных масштабов изменчивости передаточной функции среды при формировании неискаженной интерферограммы. Уменьшение расстояния и увеличение средней частоты спектра приводят к требованию повышения ширины полосы. Последнее связано с тем, что при возрастании частоты групповые скорости мод $u_m(\omega_0) = d\omega/dh_m(\omega_0)$ асимптотически стремятся к значению, не зависящему от номера моды [19]. Уменьшение радиальной скорости и средней частоты спектра вызывают возрастание времени наблюдения. Критерии наиболее критичны по отношению к номерам соседних мод.

Критерий I исключает возможность образования интерферограммы, обусловленной интерференцией (m, n) мод, с равномерной спектральной плотностью, т.е. в полосе бесконечной ширины, когда локализованные полосы не наблюдаемы. Полезно отметить, что нарушение условия (44) по отношению ко всем парам интерферирующих мод, приводит на голограмме к спектральной плотности в форме единичного фокального пятна в начале координат. Иная ситуация наблюдается при несоблюдении условия (45), когда времени наблюдения недостаточно для пересечения источником пространственных масштабов изменчивости интерференционной картины. В этом случае положение пика фокального пятна, образованного такими интерферирующими модами, смещается на ось времени голограммы, так как по отношению к ним интерферограмма формируется неподвижным источником. Сформулированные условия (44) и (45) позволяют оценить ширину полосы и время наблюдения для уменьшения погрешности восстановления параметров движущегося шумового источника.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Голографическая обработка гидроакустической информации позволила самым существенным образом видоизменить решение проблемы обнаружения и локализации движущихся малошумных подводных источников шума. Оказалось возможным установить в самом общем случае простые и прозрачные связи между измеряемыми характеристиками спектральной плотности голограммы и параметрами малошумного подводного источника. Это придало голографической обработке известную завершенность и весьма ощутимые преимущества, по сравнению с другими видами обработки при решении конкретных задач контроля подводной обстановки при малом входном шумовом сигнале на фоне помехи. В результате достигнуто радикальное упрощение решения задачи обнаружения и локализации источника подводного шума и, вместе с тем, значительное расширение круга задач, вообще поддающихся решению. Например, при малом входном отношении с/п на фоне пространственно-временных неоднородностей и в отсутствие информации о гидроакустических характеристиках среды распространения.

В работе изложена теория голографической обработки гидроакустической информации с применением линейных горизонтальных и вертикальных антенн. Рассмотрена структура интерферограмм и голограмм. Приведены выражения для коэффициента усиления и характеристики направленности. Оценено предельное входное отношение с/п, при превышении которого адекватно восстанавливаются параметры шумового источника звука. Установлена связь между выходным и входным отношениями с/п. Полученные соотношения позволяют рассмотреть большой круг задач контроля подводной обстановки с использованием линейных антенн. Сформулированы ограничения на ширину полосы и времени наблюдения, которые обеспечивают минимальную погрешность восстанавливаемых параметров шумового источника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов ГН, Кузькин ВМ, Пересёлков СА. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море. *Акуст. журн.*, 2017, 63(4):406-418.
2. Kuznetsov GN, Kuz'kin VM, Pereselkov SA, Kaznacheev IV, Grigor'ev VA. 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, 25(4):299-306.
3. Казначеев ИВ, Кузнецов ГН, Кузькин ВМ, Пересёлков СА. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником. *Акуст. журн.*, 2018, 64(1):33-45.
4. Kuz'kin VM, Pereselkov SA, Zvyagin VG, Malykhin AYu, Prosovetskiy DYU. Intense internal waves and their manifestation in interference patterns of received signals on oceanic shelf. *Phys. Wave Phenom.*, 2018, 26(2):160-167.
5. Badiy M, Kuz'kin VM, Lyakhov GA, Pereselkov SA, Prosovetskiy DYU, Tkachenko SA. Intense internal waves and their manifestation in the interference patterns of received signals on oceanic shelf. Part II. *Phys. Wave Phenom.*, 2019, 27(4):313-319.
6. Кузькин ВМ, Ляхов ГА, Пересёлков СА, Казначеева ЕС. Передача информации через случайно-неоднородную океаническую среду. *Фундам. прикл. гидроф.*, 2021, 14(2):54-64.
7. Kaznacheeva ES, Kuz'kin VM, Pereselkov SA. Interferometric processing of hydroacoustic information in the presence of intense internal waves. *Phys. Wave Phenom.*, 2021, 29(3):278-284.
8. Кузькин ВМ, Пересёлков СА, Казначеева ЕС, Грачев ВИ, Ткаченко СА, Рыбьянец ПВ. Голографическая обработка движущихся источников в мелком море при наличии интенсивных внутренних волн. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2022, 14(2):197-204. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.197.
9. Kaznacheeva ES, Kuznetsov GN, Kuz'kin VM, Lyakhov GA, Pereselkov SA. Measurement capability of the interferometric method of sound source localization in the absence of data on the waveguide transfer function. *Phys. Wave Phenom.*, 2019, 27(1):73-78.
10. Kaznacheeva ES, Kuz'kin VM, Lyakhov GA, Pereselkov SA, Tkachenko SA. Adaptive algorithms for interferometric processing. *Phys. Wave Phenom.*, 2020, 28(3):267-273.
11. 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.
12. Kuz'kin VM, Matvienko YuV, Pereselkov SA, Prosovetskiy DYU, Kaznacheeva ES. Mode selection in oceanic waveguides. *Phys. Wave Phenom.*, 2022, 30(2):111-118.
13. Кузькин ВМ, Пересёлков СА, Казначеева ЕС, Грачев ВИ, Ткаченко СА, Рыбьянец ПВ. Выделение мод шумового источника в мелком море методом голографической интерферометрии в присутствии интенсивных внутренних волн. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2022, 14(3):279-286. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.279.
14. Kuz'kin VM, Matvienko YuV, Pereselkov SA, Kaznacheeva ES, Tkachenko SA. Holographic method for mode selection in a shallow sea in the presence of intense internal waves. *Phys. Wave Phenom.*, 2022, 30(5):314-320.
15. Zurk LM, Rouseff D. Striation-based beamforming for active sonar with a horizontal line array. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2012, 132(4):EL264-EL270.
16. Cockrell KL, Schmidt H. Robust passive range estimation using the waveguide invariant. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010, 127(5):2780-2789.
17. Bonnel J, Touze GLe, Mars JI. Physics-based time-frequency representations for underwater acoustics: Power class utilization with waveguide invariant approximation. *IEEE Signal Process. Mag.*, 2013, 30(6):120-129.
18. Emmetiere R, Bonnel J, Cristol X, Gehant M, Chonavel T. Passive source depth discrimination in deep-water. *IEEE J. of Selected Topics in Signal Processing*, 2019, 13(1):185-197.
19. Бреховских АМ, Лысанов ЮП. *Теоретические основы акустики океана*. М.: Наука, 2007, 370 с.
20. 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.

21. Кузькин ВМ, Матвиенко ЮВ, Пересёлков СА, Казначеева ЕС. Интерферометрическая обработка с использованием вертикальной линейной антенны. *Вестн. ВГУ. Серия: Физика. Математика*, 2020, 2:14-23.

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 394018, Россия

E-mail: pereselkov@yandex.ru

Матвиенко Юрий Викторович

д.т.н.

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

5а, ул. Суханова, Владивосток 690091, Россия

E-mail: ymat@marine.febras.ru

Грачев Владимир Иванович

к.ф.-м.н., с.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия

E-mail: grachev@splire.ru

Ткаченко Сергей Александрович

инженер

Воронежский государственный университет

1, Университетская пл., Воронеж 394018, Россия

E-mail: sega-th@mail.ru

Стадная Надежда Павловна

к.ф.-м.н.

Воронежский государственный университет

1, Университетская пл., Воронеж 394018, Россия

E-mail: stadnaya.edu@yandex.ru