

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.129

## Предельная дальность обнаружения подводного шумового источника с применением голографической обработки

<sup>1</sup>Кузькин В.М., <sup>2</sup>Пересёлков С.А., <sup>3</sup>Грачев В.И., <sup>2</sup>Рыбьянец П.В., <sup>2</sup>Ткаченко С.А.

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, <http://www.gpi.ru/>

Москва 119991, Российская Федерация

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет, <http://www.vsu.ru/>

Воронеж 394006, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>

Москва 12509, Российская Федерация

E-mail: [kumiov@yandex.ru](mailto:kumiov@yandex.ru), [pereselkov@yandex.ru](mailto:pereselkov@yandex.ru), [grachev@cplire.ru](mailto:grachev@cplire.ru), [rybyanets.edu@yandex.ru](mailto:rybyanets.edu@yandex.ru), [sega-tk@mail.ru](mailto:sega-tk@mail.ru)

Поступила 29.01.2024, рецензирована 05.02.2024, принята 12.02.2024, опубликована 15.03.2024.

**Аннотация:** Описано формирование голограммы шумового сигнала подводного источника на фоне распределенной помехи. Получено выражение для ширины полосы углового распределения спектральной плотности шумового сигнала на голограмме. Оценена минимальная длительность шумового сигнала, определяющая предельную дальность обнаружения шумового источника звука. Представлен алгоритм определения параметров голографической обработки, реализующей предельную дальность обнаружения. Голографическая обработка шумовых сигналов рассмотрена с применением одиночного векторно-скалярного приемника и линейных антенн.

**Ключевые слова:** голографическая обработка, шумовой подводный источник, приемная система, длительность сигнала, дальность обнаружения

УДК 004.052.34

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/>.

**Для цитирования:** Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Грачев В.И., Рыбьянец П.В., Ткаченко С.А. Предельная дальность обнаружения подводного шумового источника с применением голографической обработки. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):129-136. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.129.

## Maximum detection range of an underwater noise source using holographic processing

Venedikt M. Kuz'kin

A.M. Prokhorov Institute of General Physics of RAS, <http://www.gpi.ru/>

Moscow 119991, Russian Federation

E-mail: [kumiov@yandex.ru](mailto:kumiov@yandex.ru)

Sergey A. Pereselkov, Pavel V. Rybyanets, Sergey A. Tkachenko

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

Voronezh 394006, Russian Federation

E-mail: [pereselkov@yandex.ru](mailto:pereselkov@yandex.ru); [rybyanets.edu@yandex.ru](mailto:rybyanets.edu@yandex.ru); [sega-tk@mail.ru](mailto:sega-tk@mail.ru)

Vladimir I. Grachev

V.A. Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>

Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: [grachev@cplire.ru](mailto:grachev@cplire.ru)

Received January 29, 2024, peer-reviewed February 05, 2024, accepted February 12, 2024, published March 15, 2024.

**Abstract:** The formation of a hologram of a noise signal from an underwater source against the background of distributed interference is described. An expression is obtained for the bandwidth of the angular distribution of the spectral density of the noise signal on the hologram. The minimum duration of the noise signal is estimated, which determines the maximum detection range of the noise sound source. An algorithm is presented for determining the parameters of holographic processing that realizes the maximum detection range. Holographic processing of noise signals is considered using a single vector-scalar receiver and linear antennas.

**Keywords:** holographic processing, underwater noise source, receiving system, signal duration, detection range

**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/>.

**For citation:** Venedikt M. Kuz'kin, Sergey A. Pereselkov, Vladimir I. Grachev, Pavel V. Rybyanets, Sergey A. Tkachenko. Maximum detection range of an underwater noise source using holographic processing. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):129-136e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.129.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (130)
2. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА (131)
3. НЕИСКАЖЕННАЯ ИНТЕРФЕРОГРАММА (132)
4. УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ГОЛОГРАММЫ (132)
5. ЭВРИСТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА (133)
6. ПРЕДЕЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ (134)
7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (135)

## ЛИТЕРАТУРА (136)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сценарии поведения широкополосных акустических сигналов в океанических волноводах чрезвычайно разнообразны и сложны, однако они подчиняются одной общей закономерности, впервые установленной в [1]. Она проявляется в том, что интерференция мод таких сигналов, благодаря волноводной дисперсии, формирует устойчивую интерференционную картину (интерферограмму) максимумов спектральной плотности энергетических параметров волнового поля в переменных частота-расстояние (время). Конфигурация локализованных полос определяется частотным диапазоном, параметрами волновода, скоростью и траекторией источника. Данная закономерность применима, – в чем состоит одно из основных ее преимуществ, – и к шумовым сигналам источника, описание которых носит статистический характер. Это позволяет рассматривать интерферограмму

как универсальную детерминированную математическую модель шумового сигнала и среды распространения. Модель отличается достаточной простотой и в то же время содержит в себе большое разнообразие форм поведения. Кроме того, она обладает предсказательной силой, но не требует жестких причинно-следственных ограничений. В сущности, роль моделей в физических построениях определяется тем, насколько хорошо они передают существенные черты реальных процессов.

Опираясь на модель интерферограммы, предложен и реализован голографический метод обнаружения и локализации шумового источника, основанный на записи двумерной частотно-временной интерферограммы с применением двумерного преобразования Фурье [2,3]. Состояние вопроса о голографической обработке шумовых сигналов в гидроакустике отражено в [4].

В данной статье описано формирование голограммы шумового сигнала одиночного источника на фоне распределенной помехи в океаническом волноводе. Приведены условия формирования неискаженной интерферограммы. Обсуждено угловое распределение спектральной плотности голограммы. Сформулирован эвристический критерий дальности обнаружения шумового источника. Оценена минимальная длительность регистрации шумового сигнала, определяющая предельную дальность обнаружения источника.

Рассмотрена голографическая обработка шумовых сигналов с использованием одиночного векторно-скалярного приемника и линейных антенн.

**2. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА**

Голографическую обработку шумового сигнала  $s(t)$  на фоне помехи  $n(t)$  рассмотрим на примере звукового давления  $p(t)$ , регистрируемого одиночным приемником. Для векторных компонент векторно-скалярного приемника рассмотрение аналогично. За время наблюдения  $\Delta t$  в частотной полосе  $\Delta f$  накапливаются  $J$  независимых временных шумовых реализаций  $p(t) = s(t) + n(t)$  длительностью  $T$  и с временным интервалом  $\delta T$  между ними

$$J = \Delta t / (T + \delta T). \tag{1}$$

Реализации независимы, если  $\delta T \geq 1/\Delta f$ . Преобразованием Фурье восстанавливается частотно-временное представление шумовых реализаций  $p(f,t) = s(f,t) + n(f,t)$  и формируется интерферограмма звукового давления

$$\begin{aligned} I(f,t) &= p(f,t)p^*(f,t) = \\ &= |s(f,t)|^2 + n(f,t)s^*(f,t) + \\ &+ s(f,t)n^*(f,t) + |n(f,t)|^2, \end{aligned} \tag{2}$$

где верхний индекс «\*» обозначает комплексно-сопряженную величину. Первое и четвертое слагаемые (2) дают в плоскости  $(f,t)$  спектральную плотность сигнала и помехи, а второе и третье слагаемые – взаимные спектральные плотности сигнала и помехи. Так как сигнал и помеха некоррелированы, то взаимные спектральные плотности будут иметь вид слабоконтрастного размазанного фона и его весом в интерферограмме  $I(f,t)$  можно пренебречь. Следовательно, интерферограмму (2) приближенно можно представить в виде линейной комбинации интерферограмм сигнала и помехи

$$\begin{aligned} I(f,t) &\approx |s(f,t)|^2 + |n(f,t)|^2 = \\ &= I_s(f,t) + I_n(f,t). \end{aligned} \tag{3}$$

Голограмма звукового давления с учетом соотношения (3) принимает вид

$$\begin{aligned} F(\tau,\nu) &\approx \int\int_0^{\Delta f} [I_s(f,t) + I_n(f,t)] \exp[i2\pi(\nu t - f\tau)] df dt = \\ &= F_s(\tau,\nu) + F_n(\tau,\nu). \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь  $\nu$  и  $\tau$  – частота и время голограммы;  $f_{1,2} = f_0 \mp (\Delta f / 2)$ : – средняя частота спектра. На голограмме спектральная плотность сигнала  $F_s(\tau,\nu)$  движущегося источника сконцентрирована в двух узких полосах, зеркально перевернутых относительно начала координат, в форме фокальных пятен, вызванных интерференцией мод разных номеров. Они размещены в первом и третьем квадрантах голограммы, если радиальная скорость источника  $w < 0$  (источник приближается к приемнику), и во втором и четвертом квадрантах ( $w > 0$ ) при удалении источника от приемника. Под радиальной скоростью понимается проекция скорости источника в направлении на приемник. При неподвижном источнике и движении по дуге окружности координаты пиков фокальных пятен расположены на оси времени  $\tau$ . Область концентрации содержит  $(M - 1)$  главных максимумов с координатами  $(\tau_\mu, \nu_\mu)$ , расположенными на прямой  $\nu = \varepsilon \tau$  с угловым коэффициентом  $\varepsilon = \nu_\mu / \tau_\mu$  где  $M$  – число мод, формирующих поле,  $\mu = \overline{1, M-1}$  – номер фокального пятна. Ближайший к началу координат максимум первого фокального пятна обусловлен интерференцией соседних мод и приходится на значения  $(\tau_1, \nu_1)$ . Координаты соседнего пика, вызванного интерференцией мод номеров  $(m, m + 2)$ , расположены в точке  $(\tau_2, \nu_2)$  и т.д. И, наконец, координаты самого удаленного пика, продиктованного интерференцией первой и последней моды –  $(\tau(M-1), \nu(M-1))$ . В точках с координатами  $(\tau_\mu, \nu_\mu)$  суммируются  $(M - \mu)$  главных максимумов. Спектральная плотность помехи  $F_n(\tau,\nu)$  распределена по всей плоскости  $(\tau,\nu)$  голограммы.

При условии  $r_0 \gg |w|\Delta t$ , где  $r_0$  – удаление источника от приемника в начальный момент времени  $t = 0$ , радиальная скорость и расстояние равны

$$\dot{w} = -2\pi \kappa_{w\mu} \nu_\mu, \dot{r}_0 = \kappa_{r\mu} \tau_\mu, \tag{5}$$

$$\kappa_{w\mu} = \left[ \frac{dh_{m(m+\mu)}(f_0)}{df} \right]^{-1}, \kappa_{r\mu} = 2\pi \left[ \frac{dh_{m(m+\mu)}(f_0)}{df} \right]^{-1} \tag{6}$$

– коэффициенты, определяющие пространственные и частотные масштабы изменчивости передаточной функции волновода [5]. Здесь  $h_{mn} = h_m - h_n$ ,  $h_m$  – горизонтальное волновое число  $m$ -й моды. Восстановленные параметры источника, в отличие от их истинных

значений, отмечены точкой сверху. Черта сверху означает усреднение по номерам мод. Для первого ( $\mu = 1$ ) и последнего ( $\mu = M - 1$ ) фокальных пятен, ограничивающих область локализации спектральной плотности сигнала, соотношение (6) упрощается

$$\begin{aligned} \kappa_{w1} &= (M - 1) [h_{1M}(f_0)]^{-1}, \\ \kappa_{r1} &= 2\pi (M - 1) [dh_{1M}(f_0)/df]^{-1}, \\ \kappa_{w(M-1)} &= \kappa_{w1} / (M - 1), \quad \kappa_{r(M-1)} = \kappa_{r1} / (M - 1). \end{aligned} \quad (7)$$

Спектральная плотность сигнала сосредоточена в полосе, ограниченной прямыми  $v_1 = \varepsilon\tau + \delta\nu$ ,  $v_2 = \varepsilon\tau - \delta\nu$ ,

где  $\delta\nu = 1/\Delta t$  – полуширина фокальных пятен в направлении оси  $\nu$ . Вне этой полосы спектральная плотность сигнала практически подавлена. Вдоль оси  $\tau$  полуширина фокальных пятен  $\delta\tau = 1/\Delta f$ . Угловые коэффициенты прямой расположения максимумов фокальных пятен  $\varepsilon$  и интерференционных полос  $\delta f/\delta t$  связаны соотношением

$$\varepsilon = -\delta f/\delta t, \quad (9)$$

где  $\delta f$  – частотный сдвиг максимума волнового поля за время  $\delta t$ .

### 3. НЕИСКАЖЕННАЯ ИНТЕРФЕРОГРАММА

Интерференционная картина, формируемая шумовым источником, характеризуется частотными  $\Lambda_f^{(mn)}$  и временными  $\Lambda_t^{(mn)}$  масштабами изменчивости, обусловленными интерференцией  $m$ -й и  $n$ -й модами [5]:

$$\Lambda_f^{(mn)} = \frac{2\pi}{r |dh_{mn}(f_0)/df|}, \quad \Lambda_t^{(mn)} = \frac{1}{|wh_{mn}(f_0)|}. \quad (10)$$

Регистрируемые интерферограмма и голограмма не искажаются, если полоса  $\Delta f$  и время наблюдения  $\Delta t$  для любой пары  $(m, n)$  мод удовлетворяют условиям

$$\Delta f > \Lambda_f^{(mn)}, \quad \Delta t > \Lambda_t^{(mn)}. \quad (11)$$

Неравенства (11) накладывают снизу ограничения на ширину полосы приема и время наблюдения в зависимости от расстояния, радиальной скорости и частотно-временных масштабов изменчивости передаточной функции волновода при формировании интерферограммы. Увеличение ширины полосы и уменьшение средней частоты спектра

вызывает уменьшение расстояния, на котором наблюдаемые интерферограмма и голограмма не искажаются. Увеличение времени наблюдения уменьшает допустимые значения радиальной скорости. Нарушение условия (11) приводит к изменению конфигурации и размытию фокальных пятен, сопровождающееся увеличением погрешности восстановления параметров источника (5). Неравенства (11) наиболее критичны по отношению к соседним модам, формирующим первое фокальное пятно. При невыполнении первого (левого) условия локализация полос интерферирующих  $(m, n)$  мод не наблюдается. Иная закономерность проявляется при несоблюдении второго (правого) условия, когда время наблюдения недостаточно для пересечения источником пространственных масштабов изменчивости интерферограммы. В этом случае положение пика фокального пятна таких интерферирующих мод смещается на ось времени голограммы, так что по отношению к ним интерферограмма формируется как бы неподвижным источником. При искажении интерферограммы восстановление параметров источника (5) проводится по отношению к неискаженной конфигурации фокальных пятен.

### 4. УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ГОЛОГРАММЫ

Угловое распределение спектральной плотности сигнала  $F_s(\tau, \nu)$  на голограмме (функция обнаружения) описывается выражением

$$G_s(\chi) = \int_0^{\Delta\tau} |F_s(\tau, \chi\tau)| d\tau, \quad (12)$$

где  $\Delta\tau$  – линейный размер области концентрации по оси времени  $\tau$ ;  $\chi$  – варьируемое значение углового коэффициента при интегрировании вдоль прямых  $\nu = \chi\tau$ . При приближении источника к приемнику  $0 \leq \chi < \infty$ , в случае удаления –  $-\infty < \chi \leq 0$ . Максимум функции обнаружения сигнала достигается при значении  $\chi = \varepsilon$ . Для иллюстрации на **Рис. 1** приведены экспериментальные результаты голографической обработки сигнала пневмоисточника при приближении к одиночному векторно-скалярному приемнику. Время накопления  $\Delta t = 10$  мин. Входное отношение сигнал/помеха (с/п)  $q_0 = 25.5$  (14.1 дБ). На **Рис. 1б** пунктиром и квадратиками



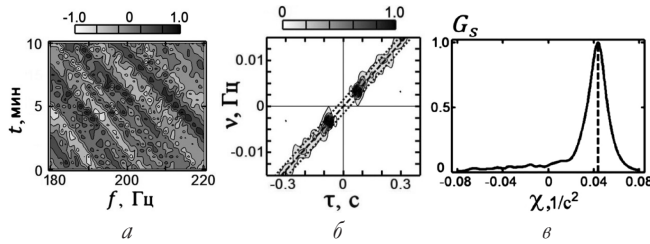


Рис. 1. Нормированные интерферограмма (а), голограмма (б) и функция обнаружения (в) [2].

показаны соответственно прямая  $\nu = \varepsilon\tau$ , на которой расположены пики фокальных пятен, и прямые  $\nu_{1,2}$  (8), ограничивающие спектральную плотность. На Рис. 1в вертикальным пунктиром отмечено значение  $\chi = \varepsilon$ .

Ширина полосы функции обнаружения, согласно Рис. 1в, на уровне 0.1 и 0.5 от максимума равна  $\Delta\chi_{0.1} = 0.048 \text{ с}^{-2}$  и  $\Delta\chi_{0.5} = 0.018 \text{ с}^{-2}$ . Ширину полосы  $\Delta\chi_{0.1}$  можно оценить из условия как разность угловых коэффициентов прямых  $\nu = \chi\tau$ , проходящих через точки  $(\tau_1, \varepsilon\tau_1 + \delta\nu)$ ,  $(\tau_1, \varepsilon\tau_1 - \delta\nu)$ , а ширину полосы  $\Delta\chi_{0.5}$  — через точки  $(\tau_{(M-1)}, \varepsilon\tau_{(M-1)} + \delta\nu)$ ,  $(\tau_{(M-1)}, \varepsilon\tau_{(M-1)} - \delta\nu)$ . В результате получаем

$$\Delta\chi_{0.1} = 2 / \Delta t \tau_1, \Delta\chi_{0.5} = 2 / \Delta t \tau_{(M-1)}. \quad (13)$$

Из Рис. 1б следует, что  $\tau_1 = 0.066 \text{ с}^2$ ,  $\tau_{(M-1)} = 0.22 \text{ с}^2$ . Согласно (13) ширина полосы  $\Delta\chi_{0.1} = 0.050 \text{ с}^{-2}$  и  $\Delta\chi_{0.5} = 0.015 \text{ с}^{-2}$ , что близко к экспериментальным значениям. Ширина полосы  $\Delta\chi$  функции обнаружения, согласно (5) и (13), определяется временем накопления, расстоянием, частотными масштабами изменчивости передаточной функции волновода и не зависит от ширины спектра сигнала и радиальной скорости источника. Она уменьшается с увеличением времени наблюдения  $\Delta t$ , расстояния  $r_0$  и уменьшением средней частоты спектра  $f_0$ . Чем меньше ширина полосы, тем точнее и надежнее оценка углового коэффициента  $\varepsilon$ .

### 5. ЭВРИСТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА

В качестве эвристического критерия дальности обнаружения шумового источника принимается условие, согласно которому максимум функции обнаружения шумовой реализации сигнала на фоне помехи

$$G(\chi, q_0) = \int_0^{\Delta\tau} |F(\tau, \chi\tau, q_0)| d\tau \quad (14)$$

в направлении  $\chi = \varepsilon$  расположения пиков фокальных пятен сигнала в два и более число раз превышает помеховый уровень в направлениях  $\chi \neq \varepsilon$  при входном отношении  $c/\pi q_0$

$$q = G(\varepsilon, q_0) / G(\chi, q_0). \quad (15)$$

За оценку  $\varepsilon$  принимается положение максимального пика,  $\max G(\chi) = G(\varepsilon)$ . При этом восстанавливаемые оценки параметров источника (пеленг, удаленность, радиальная скорость и глубина) близки к реальным значениям [2,3]. Если условие (15) не выполняется, то в функции обнаружения появляются пики помехи, которые усиливаются при уменьшении входного отношения  $c/\pi q_0$  и маскируют пик шумового сигнала. Возрастает неоднозначность в определении углового коэффициента  $\varepsilon$ , отвечающего шумовому сигналу, достоверность обнаружения источника снижается.

При заданных параметрах обработки (время накопления  $\Delta t$ , частотный диапазон  $\Delta f$ , длительность шумовых реализаций  $T$  и интервал между ними  $\delta T$ ) и входном отношении  $c/\pi q_0$  максимальная дальность обнаружения  $r_{\max}$  реализуется при выполнении равенства (15). В качестве примера на Рис. 2, 3 показаны, полученные численным моделированием, результаты голографической обработки в переходной области максимальных расстояний обнаружения движущегося шумового источника на фоне помехи. Параметры обработки:  $\Delta f = 900\text{-}950 \text{ Гц}$ ,  $\Delta t = 30,60 \text{ с}$ ,  $T = 1.5 \text{ с}$ ,  $\delta T = 0.5 \text{ с}$ ,  $J = 15,30$ .

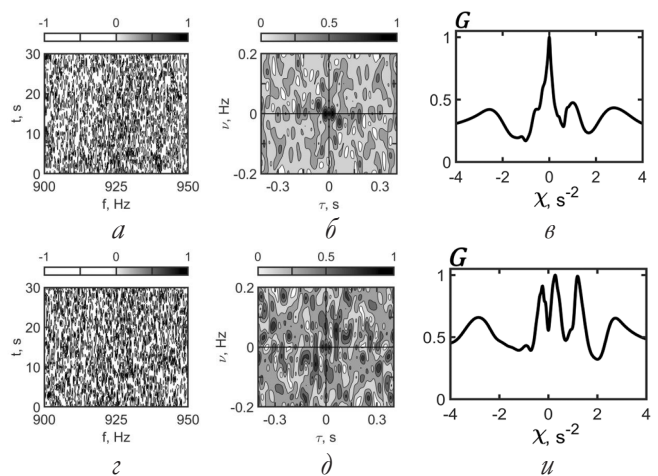
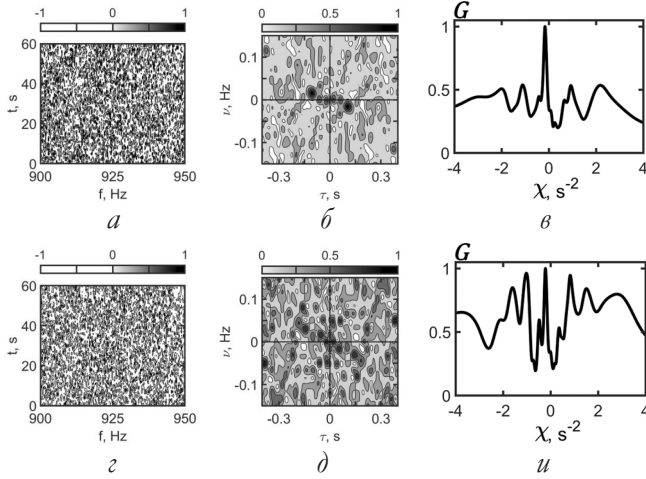


Рис. 2. Нормированные интерферограммы (а, г), голограммы (б, д) и функции обнаружения (в, и). Расстояния: (а-в) —  $r = 6 \text{ км}$ , (г-и) —  $r = 7 \text{ км}$ . Время накопления  $\Delta t = 30 \text{ с}$ , число шумовых реализаций  $J = 15$  [6].



**Рис. 3.** Нормированные интерферограммы (а, з), голограммы (б, д) и функции обнаружения (в, и). Расстояния: (а-в) –  $r = 9$  км, (з-и) –  $r = 10$  км. Время накопления  $\Delta t = 60$  с, число шумовых реализаций  $J = 30$  [6].

При числе временных интервалов  $J = 15, 30$ , согласно критерию (15), максимальные дальности обнаружения оцениваются как  $r_{\max} = 6$  км (Рис. 2) и  $r_{\max} = 9$  км (Рис. 3), которым отвечают входные отношения  $c/\pi q_0 = -8.99, -12.07$  дБ. Рис. 2в и 3в показывают, что увеличение числа временных отсчетов в два раза влечет за собой уменьшение в два раза и ширины полосы  $\Delta\chi_{0.5}$ . При дальнейшем снижении входного отношения  $c/\pi$  сигнал маскируется помехой, возникает неоднозначность в определении положения  $\epsilon$  максимумов функций обнаружения (Рис. 2и, 3и). Обнаружение источника на расстояниях  $r = 7, 10$  км становится невозможным. Расстояниям  $r = 7, 10$  км соответствуют входные отношения  $c/\pi q_0 = -10.14, -12.84$  дБ. В то же время из Рис. 2б, д, 3б, д следует, что конфигурация первых фокальных пятен искажена, поскольку временная координата положения их пика расположена на оси времени, т.е. для соседних интерферирующих мод нарушено правое условие (11).

Под отношением  $c/\pi q$  на выходе голографической обработки, принимая во внимание критерий (15), условимся понимать величину

$$q = G(\epsilon, q_0) / G(\chi, q_0). \quad (16)$$

Тогда, полагая, что частотные смещения интерференционных максимумов волнового поля накапливаются когерентно, а помеха – некогерентно, выражение (16) принимает вид

$$q = Jq_0. \quad (17)$$

При фиксированном значении временных шумовых реализаций  $J$  максимальная дальность обнаружения  $r_{\max}$  шумового источника, согласно (15), (16), определяется неявным выражением

$$2 = Jq_0(r_{\max}), \quad (18)$$

где величина  $q_0(r_{\max})$  определяется законом спадающей средней мощности шумоизлучения источника с расстоянием и уровнем помехи. Таким образом, при фиксированном времени накопления  $\Delta t$  предельная дальность обнаружения  $r_{\lim}$  достигается при минимальной длительности  $T_{\min}$  шумового сигнала, т.е. при максимальном значении  $J$ .

## 6. ПРЕДЕЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ

Минимальную длительность шумового сигнала оценим из представления сигнала с помощью частотных выборок передаточной функции волновода. При этом достаточно ограничиться рассмотрением наименьшего частотного масштаба изменчивости поля, обусловленного интерференцией между крайними модами.

В соответствии с (10) наименьший частотный масштаб в окрестности частоты  $f_0$  на расстоянии  $r$  между источником и приемником

$$\min \Lambda_f = \frac{2\pi}{r |dh_{1M}(f_0)/df|}. \quad (19)$$

Период изменчивости сигнала определяется независимыми значениями передаточной функции в пяти точках. Частотный интервал  $\delta f$  между двумя выборками не должен превышать значения  $1/T$ ,  $\delta f \leq 1/T$ , где  $T$  – длительность шумового сигнала, поэтому величина (19) равна также

$$\min \Lambda_f = 5\delta f = 5/T. \quad (20)$$

Из (19), (20) следует, что длительность шумовой реализации должна удовлетворять неравенству

$$T \geq T_{\min} = \frac{5}{2\pi} r |dh_{1M}(f_0)/df|, \quad (21)$$

так что с увеличением расстояния  $r$  и уменьшением средней частоты  $f_0$  спектра минимальное время регистрации шумового сигнала возрастает.

В результате допустимое число независимых временных шумовых реализаций (1) сверху оценивается как

$$J \leq J_{\max} = \frac{\Delta t}{(5/2\pi)r |dh_{1M}(f_0)/df| + (1/\Delta f)}. \quad (22)$$

Выбором ширины спектра  $\Delta f$  практически всегда можно обеспечить выполнение условия

$$J_{\max} \approx \frac{2\pi}{5} \frac{\Delta t}{r |dh_{1M}(f_0)/df|}. \quad (23)$$

Если длительность регистрации  $T$  меньше  $T_{\min}$  (21), это приводит к искажениям в восстановлении спектра сигнала, что влечет за собой возрастание погрешности в определении положения максимумов фокальных пятен и, как следствие, увеличение погрешности в оценках удаленности и радиальной скорости источника. При входном отношении  $c/\pi q_0(r_{\lim})$  для предельной дальности обнаружения шумового источника, согласно (18) и (23), получаем неявную оценку

$$r_{\lim} = \frac{2\pi}{10} \frac{\Delta t}{|dh_{1M}(f_0)/df|} q_0(r_{\lim}), \quad (24)$$

Характерной чертой соотношения (24) для предельной дальности  $r_{\lim}$  шумового источника является то обстоятельство, что в него входят параметры передаточной функции волновода, физическое содержание которых различно в зависимости от акватории. Напомним, что выражение (24) связывает предельную дальность обнаружения с входным отношением одиночного приемника.

Обобщим оценку (24) на линейные антенны. Предположим, что на входе элементов антенны помеха не коррелирована. Для выполнения этого условия достаточно потребовать выполнения неравенства  $d \geq \lambda/2$ , где  $d$  и  $\lambda$  – межэлементное расстояние и длина волны. Тогда выражение (24) принимает вид

$$r_{\lim(an)} = \frac{2\pi \eta}{10 b} \frac{\Delta t}{|dh_{1M}(f_0)/df|} q_{0(an)}(r_{\lim}), \quad (25)$$

где  $\eta$  и  $b$  – коэффициент усиления и число элементов антенны,  $q_{0(an)}$  – отношение  $c/\pi$  на входе одиночного элемента антенны [7]. В случае горизонтальной линейной антенны максимальная помехоустойчивость голографической обработки достигается при пеленге, равном углу компенсации, при этом  $\eta = b^2$ . Для вертикальной антенны  $\eta \approx b^2$ . Если положить  $b = 1$ , то формула (25) переходит в соответствующую формулу для одиночного приемника.

Алгоритм реализации параметров голографической обработки при предельной

дальности обнаружения на примере одиночного приемника представлен ниже.

1. Вводится априорная модель волновода. Задается предельная дальность обнаружения  $r_{\lim}$  и выбираются параметры обработки: время накопления  $\Delta t$ , ширина полосы  $\Delta f$  и средняя частота спектра  $f_0$ . Фиксируется уровень помехи  $N_{\Delta f}^2$ . Моделируется зависимость мощности шумового источника  $P_{\Delta f}^2$  от расстояния  $r$ .

2. На основе зависимости  $P_{\Delta f}^2(r)$  для предельной дальности обнаружения  $r_{\lim}$  вычисляется входное отношение  $c/\pi q_0(r_{\lim}) = P_{\Delta f}^2(r_{\lim})/N_{\Delta f}^2$ .

3. Из выражения (24) находится величина  $|(dh_{1M}(f_0)/df)|$ , определяющая минимальную длительность шумовой реализации  $T_{\min}$ .

4. Согласно (21), полагая  $r = r_{\lim}$ , определяется минимальная длительность  $T_{\min}$  шумового сигнала.

Описанный алгоритм не требует предварительного знания о числе энергонесущих мод, формирующих поле на предельном расстоянии. Поэтому он применим как для модельных, так и для реальных волноводов. Плодотворность алгоритма рассмотрим на примере численного эксперимента [6]. Исходные данные:  $\Delta f = 50$  Гц,  $f_0 = 925$  Гц,  $\Delta t = 30$  с,  $N_{\Delta f}^2 = -61.01$  дБ,  $r_{\lim} = 15$  км. Зависимость  $P_{\Delta f}^2(r)$  приведена на Рис. 2 [6], из которой следует, что  $q_0(r_{\lim}) = 2.87 \cdot 10^{-2}$  (-15.42) дБ. Согласно (24) имеем  $|(dh_{1M}(f_0)/df)| = 3.61 \cdot 10^{-5}$  с/м. Используя (21), получаем оценку  $T_{\min} = 4.31 \cdot 10^{-1}$  с. Заметим, что выражение (23) обосновано, так как неравенство  $T_{\min} \gg (1/\Delta f)$  выполняется.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плодотворность голографического метода обнаружения и локализации шумовых подводных источников объясняется чрезвычайной простотой, с которой двумерное преобразование Фурье осуществляет довольно сложное и запутанное линейное преобразование, необходимое для получения изображения источника. Такая простота определяется в основном тем, что интерферограмма шумового сигнала на фоне помехи представляется в виде линейной комбинации интерферограмм сигнала и помехи, с одной стороны, и сохранением амплитудной и фазовой информации – с другой.



При этом очень важную роль играет функция обнаружения, определяющая частотно-временную фокусировку шумового сигнала, которая позволяет явным образом определить предельную дальность обнаружения источника в зависимости от параметров обработки и входного отношения сигнал/помеха. Выражение для предельной дальности обнаружения получено по отношению к одиночному приемнику и линейным антеннам. Алгоритм определения предельной дальности обнаружения апробирован в рамках численного эксперимента на примере одиночного приемника.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чупров СД. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане. В: *Акустика океана. Современное состояние*. М.: Наука, 1982, с. 71-82.
2. Кузнецов ГН, Кузькин ВМ, Пересёлков СА. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море. *Акуст. журн.*, 2017, 63(4):406-418.
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. Переселков СА, Кузькин ВМ. *Голографическая обработка широкополосных гидроакустических сигналов*. Воронеж, Издательский дом ВГУ, 2023, 183 с.
5. Бреховских ЛМ, Лысанов ЮП. *Теоретические основы акустики океана*. Л., Гидрометеиздат, 1982, 264 с.
6. Kuz'kin VM, Pereselkov SA, Tkachenko SA, Matvienko YuV, Khvorostov YuA. Range of detection of underwater sound source. *Phys. Wave Phenom.*, 2023, 31(5):339-345.
7. Кузькин ВМ, Пересёлков СА, Ткаченко СА, Казначеев ИВ. Интерферометрическая обработка акустической информации с использованием протяженных антенн в диспергирующих средах. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные Технологии*, 2020, 12(4):483-494. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.483.

**Кузькин Венедикт Михайлович**

*д.ф.-м.н., проф.*

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

**Москва 119991, Россия**

**E-mail: kumiov@yandex.ru**

**Переселков Сергей Алексеевич**

*д.ф.-м.н., проф.*

Воронежский государственный университет

**Воронеж 394006, Россия**

**E-mail: pereselkov@yandex.ru**

**Грачев Владимир Иванович**

*к.ф.-м.н., с.н.с.*

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

**Москва 125009, Россия**

**E-mail: grachev@cplire.ru**

**Рыбьянец Павел Викторович**

*м.н.с.*

Воронежский государственный университет

**Воронеж 394006, Россия**

**E-mail: rybyanets.edu@yandex.ru**

**Ткаченко Сергей Александрович**

*м.н.с.*

Воронежский государственный университет

**Воронеж 394006, Россия**

**E-mail: sega-tk@mail.ru.**