

УДК 542.34

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ШУМОВОГО ПОДВОДНОГО ИСТОЧНИКА В МЕЛКОВОДНОЙ АКВАТОРИИ

© 2024 г. В. М. Кузькин^{1,*}, Ю. В. Матвиенко^{2,**},
С. А. Пересёлков^{3,***}, Ю. А. Хворостов^{2,****}

Представлено академиком РАН Г.И. Долгих 09.10.2023 г.

Поступило 23.10.2023 г.

После доработки 10.01.2024 г.

Принято к публикации 12.02.2024 г.

Изложена голографическая обработка шумовых сигналов с использованием векторно-скалярных приемников. Представлены результаты эксперимента по обнаружению и оценке пеленга подводного шумового источника, который проводился в акватории Черноморского побережья. Прием шумоизлучения источника осуществлялся векторно-скалярными приемниками. Голографическая обработка позволила обнаруживать, пеленговать и разрешать подводный источник при малом входном отношении сигнал/помеха на фоне интенсивного надводного судоходства.

Ключевые слова: векторно-скалярный приемник, шумовой источник, обнаружение, локализация, голографическая обработка, отношение сигнал/помеха

DOI: 10.31857/S2686740024020128, EDN: KGHVBW

В океанических волноводах интерференция мод шумового сигнала формирует устойчивую интерференционную картину (интерферограмму) максимумов спектральной плотности энергетических параметров волнового поля в переменных частота-расстояние [1]. Для решения задачи обнаружения и локализации шумового источника впервые предложен голографический подход, основанный на записи двумерной частотно-временной интерферограммы с применением двумерного преобразования Фурье [2]. Интерферограмма регистрируется векторно-скалярным приемником (ВСП) [3].

Голографическая обработка шумового сигнала $s(t)$ на фоне помехи $n(t)$ с применением ВСП строится следующим образом. За время наблюдения Δt в частотной полосе Δf накапливаются J независимых временных реализаций $s_1(t) = p(t) + n(t)$ и $s_{2,3}(t) = v_{x,y}(t) + n(t)$ длительностью t_1 и с временным интервалом t_2 между ними

$$J = \Delta t / (t_1 + t_2). \quad (1)$$

Здесь $p(t)$ – звуковое давление, $v_{x,y}(t)$ – горизонтальные компоненты вектора колебательной скорости частиц жидкости. Преобразованием Фурье восстанавливаются частотно-временные шумовые реализации $s_{1,2,3}(f, t)$ и формируются интерферограммы звукового давления $I(f, t)$ и составляющих потока мощности $W_x(f, t)$, $W_y(f, t)$:

$$I(f, t) = s_1(f, t)s_1^*(f, t), W_x(f, t) = s_2(f, t)s_1^*(f, t), W_y(f, t) = s_3(f, t)s_1^*(f, t), \quad (2)$$

где верхний индекс * обозначает комплексно-сопряженную величину. Так как сигнал и помеха некоррелированы, то интерферограммы (2) приближенно можно рассматривать как

линейную комбинацию интерферограмм шумового поля сигнала и помехи

$$\begin{aligned} I(f, t) &\approx P(f, t) + N(f, t), \\ W_x(f, t) &\approx X(f, t) + N(f, t), \\ W_y(f, t) &\approx Y(f, t) + N(f, t). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $P(f, t) = |p(f, t)|^2$, $X(f, t) = v_x(f, t)p^*(f, t)$, $Y(f, t) = v_y(f, t)p^*(f, t)$ – интерферограммы шумового сигнала; $N(f, t) = |n(f, t)|^2$ – интерферограмма помехи.

Применением к интерферограммам (2) двумерного преобразования Фурье вычисляются голограммы $F_I(\tau, \nu)$, $F_{W_x}(\tau, \nu)$, $F_{W_y}(\tau, \nu)$. Спектральные плотности голограмм, согласно (3), равны сумме спектральных плотностей голограмм сигнала и помехи. Например, по отношению к интерферограмме $W_x(f, t)$ голограмма имеет вид

$$\begin{aligned} F_{W_x}(\tau, \nu) &\approx \int_0^{\Delta t} \int_{f_1}^{f_2} [X(f, t) + N(f, t)] \times \\ &\times \exp[i2\pi(\nu t - f\tau)] df dt = F_X(\tau, \nu) + F_N(\tau, \nu), \end{aligned} \quad (4)$$

где ν и τ – частота и время голограммы; $f_{1,2} = f_0 \mp (\Delta f/2)$, f_0 – средняя частота спектра. Спектральные плотности голограмм шумоизлучения источника сосредоточены в узкой полосе, ограниченной прямыми

$$\nu = \varepsilon\tau + \delta\nu, \quad \nu = \varepsilon\tau - \delta\nu. \quad (5)$$

Здесь $\delta = 1/\Delta t$, ε – угловой коэффициент прямой, на которой расположены координаты пиков фокальных пятен, обусловленных интерференцией мод. Вне этой полосы спектральная плотность сигнала практически подавлена. Фокальные пятна лежат в первом и третьем квадрантах голограммы, если источник приближается к приемнику, и во втором и четвертом квадрантах, когда он удаляется от приемника. Если источник неподвижен, то фокальные пятна расположены на оси времени τ . Спектральная плотность помехи распределена по всей области голограммы. Рассмотрим обнаружение и определение пеленга шумового источника.

В качестве критерия обнаружения источника принимается условие, согласно которому максимум функции углового распределения

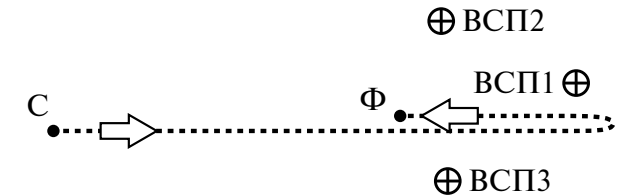


Рис. 1. Схема движения АНПА (пунктир), Ф – точка финиша.

спектральной плотности голограммы (функции обнаружения)

$$G_I(\chi, q_0) = \int_0^{\Delta t} |F_I(\tau, \chi\tau, q_0)| d\tau \quad (6)$$

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 сигнал/помеха q_0

$$G_I[\varepsilon, q_0] \geq 2G_I(\chi, q_0). \quad (7)$$

Здесь Δt – линейный размер области концентрации по оси времени τ ; χ – варьируемое значение углового коэффициента при интегрировании вдоль прямых $\nu = \chi\tau$. За оценку ε принимается положение максимального пика, $\max G_I(\chi) = G_I(\varepsilon)$.

Направление на источник, пеленг ϕ , оценивается через отношение максимумов функций обнаружения для горизонтальных составляющих потоков мощности

$$\text{tg}(\phi) = \frac{G_{W_y}(\varepsilon, q_0)}{G_{W_x}(\varepsilon, q_0)}. \quad (8)$$

Восстановление пеленга неоднозначно: значения ϕ , $\phi + \pi$, согласно (8), равнозначны. Области голограмм $F_{W_x}(\tau, \nu)$, $F_{W_y}(\tau, \nu)$, $F_I(\tau, \nu)$ за пределами зоны концентрации спектральной плотности сигнала очищаются от помехи и выполняются обратные двумерные преобразования Фурье по восстановлению двумерных интерферограмм $\widehat{W}_x(f, t)$, $\widehat{W}_y(f, t)$, $\widehat{I}(f, t)$. Неоднозначность пеленга устраняется при рассмотрении в момент времени t_* на частоте f_* отношений восстановленных интерферограмм

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт проблем морских технологий
Дальневосточного отделения Российской академии
наук, Владивосток, Россия

³Воронежский государственный университет,
Воронеж, Россия

*E-mail: kumiov@yandex.ru

**E-mail: ymat33@yandex.ru

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

****E-mail: oss.dyfu@mail.ru

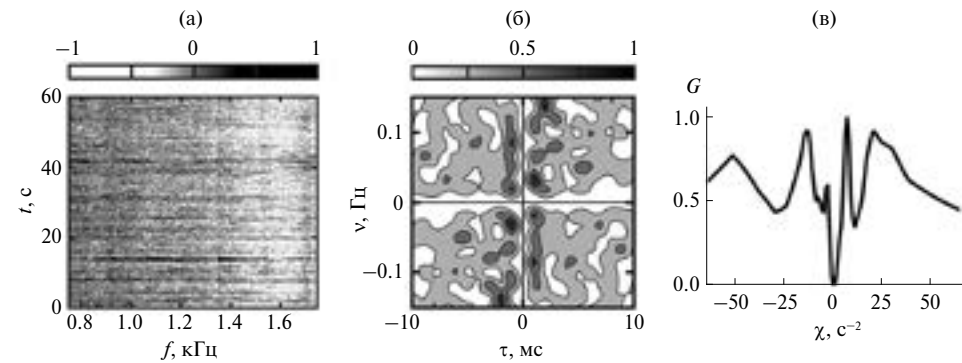


Рис. 2. Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б), функция обнаружения (в). Время 14:13.

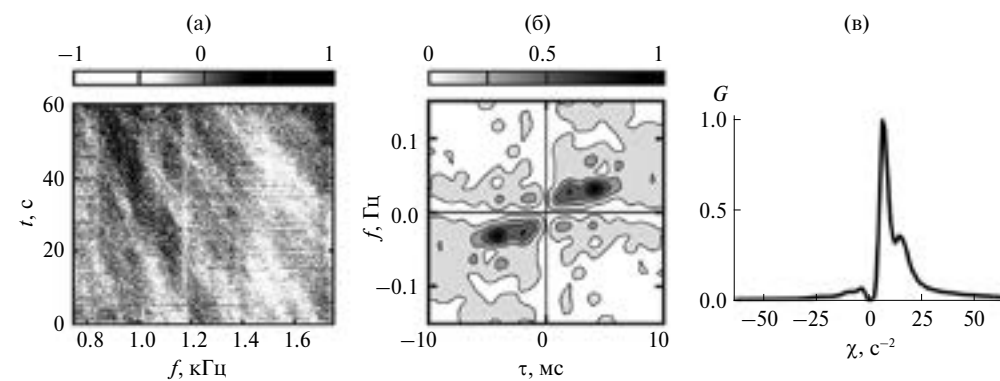


Рис. 3. Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б), функция обнаружения (в). Время 14:24.

$$\gamma_x = \frac{\widehat{W}_x(f_*, t_*)}{\widehat{I}(f_*, t_*)}, \gamma_y = \frac{\widehat{W}_y(f_*, t_*)}{\widehat{I}(f_*, t_*)}. \quad (9)$$

Если: а) $\gamma_x > 0$, $\gamma_y > 0$, то источник расположен в I квадранте ВСП; б) $\gamma_x < 0$, $\gamma_y > 0$ – во II квадранте; в) $\gamma_x < 0$, $\gamma_y < 0$ – в III квадранте; г) $\gamma_x > 0$, $\gamma_y < 0$ – в IV квадранте.

Эксперимент проводился в акватории глубиной $H = 8-10$ м Черноморского побережья, которая была удалена от района надводного судоходства на расстояние $r = 1-2$ км. Три ВСП (ВСП1–ВСП3) располагались на дне. В качестве подводного источника шума использовался малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА), спектральные характеристики шумоизлучения которого приведены в [4]. Скорость подводного аппарата $u = 1.5$ м/с, глубина погружения $z = 4$ м. Схема движения аппарата приведена на рис. 1. Характерные расстояния: С–ВСП1 ≈ 990 м, С–ВСП2 ≈ 740 м, С–ВСП3 ≈ 810 м, ВСП1–ВСП2 ≈ 450 м;

ВСП1–ВСП3 ≈ 440 м; ВСП2–ВСП3 ≈ 410 м; ВСП1–линия ВСП2–ВСП3 ≈ 390 м. Здесь С – точка старта. Прямой галс – начало 14:13, окончание 14:23:30; обратный галс – начало 14:24, окончание 14:31.

Частотный диапазон $f = 0.8-1.7$ кГц. Параметры обработки: $\Delta t = 60$ с, $t_1 = 1.5$ с, $t_2 = 0.5$ с, $J = 30$. Обработка повторялась для последующих временных интервалов, но сдвинутых относительно предыдущего на интервал $\delta T = 60$ с. За время эксперимента было сформировано $N = 17$ временных интервалов, позволявших отследить динамику движения АНПА. В точке С входные отношения сигнал/помеха q_0 для каналов звукового давления ВСП оцениваются как $q_0 = -8.8$ дБ (ВСП1), $q_0 = -10.9$ дБ (ВСП2), $q_0 = -11.1$ дБ (ВСП3).

Для трех моментов времени результаты обработки по каналу звукового давления ВСП1 приведены на рис. 2–4. С целью повышения контрастности на интерферограммах вырезаны средние значения. На голограммах вдоль осей времени и частоты отфильтрованы узкие

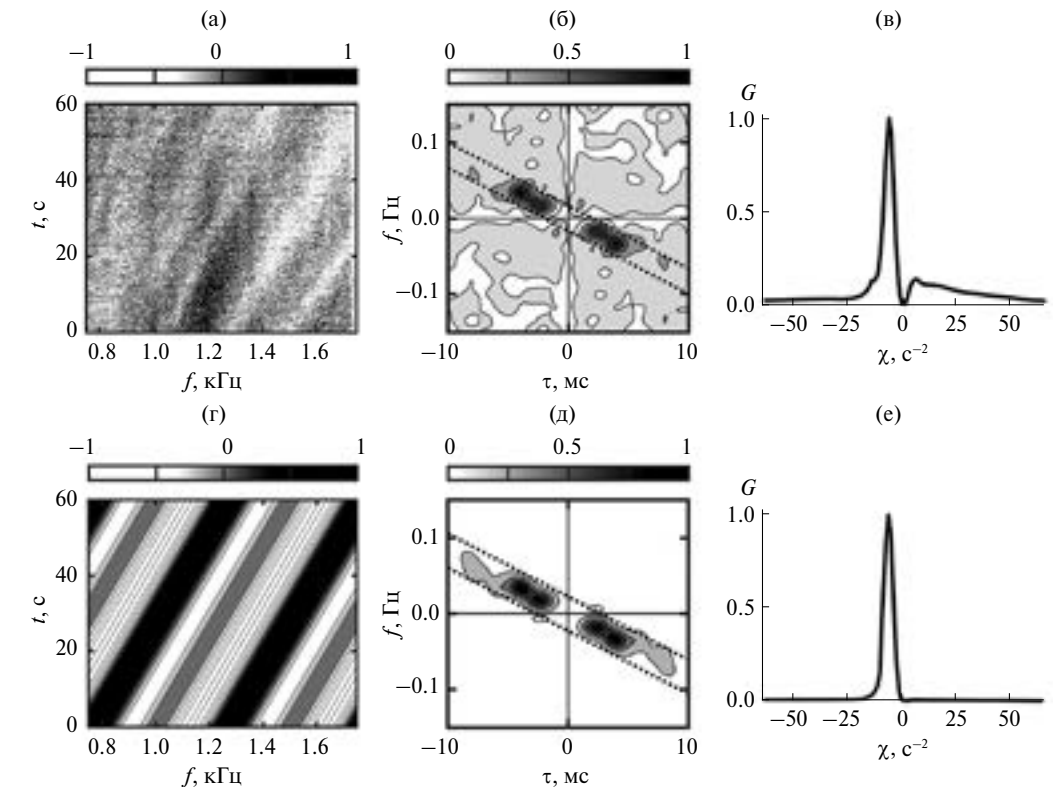


Рис. 4. Нормированные интерферограммы (а, г), модули голограмм (б, д), функции обнаружения (в, е): а, б, в – до очищения от помехи, г, д, е – после очищения от помехи. Время 14:29.

полосы спектральной плотности, отвечающие неподвижным надводным судам и поверхностному волнению соответственно.

В первую минуту эксперимента (рис. 2) интерференционные полосы имеют вид горизонтальных линий, не позволяющих судить об обнаружении источников звука. Голограмма позволяет осуществлять независимые отображения различных источников. На функции обнаружения наблюдаются АНПА и одно надводное судно, приближающиеся к ВСП1 ($\chi > 0$), а также два надводных судна, удаляющиеся от него, $\chi < 0$. После разворота АНПА (рис. 3) угловой коэффициент наклона локализованных полос, расположение фокальных пятен и пика функции обнаружения демонстрируют приближение АНПА к ВСП1. Надводное судоходство не наблюдается. За две минуты до окончания эксперимента (рис. 4) интерферограмма, голограмма и функция обнаружения указывают на удаление АНПА от ВСП1. Надводные суда не обнаруживаются. На рис. 4 также показан механизм очищения голограммы от помехи и восстановления интерферограммы,

голограммы и функции обнаружения, который использовался при оценках пеленга АНПА. До очищения интерференционные полосы размыты (рис. 4а). Фильтрация спектральной плотности сигнала на голограмме проводилась в полосе, показанной пунктиром (рис. 4б).

На рис. 5 приведены временные зависимости $\phi(t)$ пеленга АНПА, регистрируемые ВСП1. Модельная зависимость основана на данных экспериментальной траектории движения подводного аппарата. Экспериментальная зависимость построена на основе алгоритма (8), (9). Крупномасштабные скачки пеленга на обоих зависимостях связаны с прохождением областей траверса при прямом и обратном галсах. Мелкомасштабные осцилляции пеленга на экспериментальной зависимости обусловлены наличием помехи и непрямолинейным движением подводного аппарата в горизонтальной плоскости.

Полученные результаты показывают высокую помехоустойчивость голографической обработки при обнаружении и идентификации малогабаритного АНПА на фоне помехи и

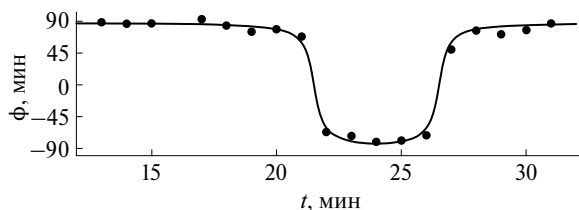


Рис. 5. Модельная (сплошная линия) и экспериментальная (точки) временные зависимости пеленга $\phi(t)$.

интенсивного надводного судоходства. Подводный аппарат обнаруживался и локализовался на всех дальностях, которые были заданы условиями проведения эксперимента.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане. Акустика океана. Современное состояние. М.: Наука, 1982. С. 71–82.
2. Казначеев И.В., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 1. С. 33–45.
<https://doi.org/10.7868/S0320791918010100>
3. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
4. Хворостов Ю.А., Матвиенко Ю.В. Характеристики собственного шумоизлучения малогабаритного АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 58–63.

HOLOGRAPHIC METHOD OF LOCALIZATION OF UNDERWATER NOISE SOURCE IN SHALLOW WATER

V. M. Kuz'kin^a, Yu. V. Matvienko^b, S. A. Pereselkov^c, Yu. A. Khvorostov^b

^a*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Institute of Problems of Marine Technology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

^c*Voronezh State University, Voronezh, Russia*

Presented by Academician of the RAS G.I. Dolgikh

Holographic signal processing of noise signals by using of the vector-scalar receivers is described. The results of an experiment on the detection and direction estimation of an underwater noise source are presented. The experiment was conducted in Black Sea. The source noise emission was received by vector-scalar receivers. Holographic signal processing made it possible to detect, localize and resolve an underwater source with a low input signal/interference ratio against the background of intensive surface navigation.

Keywords: vector-scalar receiver, noise source, detection, localization, holographic signal processing, signal-to-noise ratio