ФИЗИКА

УДК 534.222

РАЗРЕШЕНИЕ ШУМОВЫХ ИСТОЧНИКОВ

В. М. Кузькин¹, С. А. Пересёлков², И. В. Казначеев², С. А. Ткаченко²

¹ — Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, ² — Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 28.12.2017 г.

Аннотация. Рассмотрена возможность использования интерферометрического метода для разрешения шумовых источников различной интенсивности на фоне изотропной помехи в океаническом волноводе. Предложенный метод основан на двукратном преобразовании Фурье интерференционной картины, формируемой во время движения шумового источника в океаническом волноводе. Представлены результаты численного эксперимента разрешения трех шумовых на фоне изотропной помехи. Вычислительный эксперимент реализован на основе интерферометрического метода локализации источника с использованием векторно-скалярных приемников. Выполнен сравнительный анализ точности определения координат источника: пеленга, радиальной скорости, удаленности, глубины. Разрешающая способность рассматривается как возможность раздельного обнаружения и идентификации каждого источника. В качестве критерия разрешающей способности принимается точность, с которой координаты каждого источника определяются при наличии других источников на фоне помехи.

Ключевые слова: гидроакустика, звуковое поле, широкополосный движущийся источник, шумовой источник, интерференционная структура, гидролокация.

NOISE SOURCES SELECTION V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, I. V. Kaznacheev, S. A. Tkachenko

Abstract. The possibility of interferometric method using for selection of noise sources at presence of isotropic noise background in ocean waveguide is considered. The offered method is based on the 2D Fourier transformation of the interference structure formed by moving noise source in an ocean waveguide. The results of the numerical experiment of three noise selection with different intensity at presence of isotropic noise background in ocean waveguide are presented. The computational experiment is based on the interferometric method of source localization by using of vector-scalar receivers. The comparative analysis of estimation accuracy of coordinates (direction, speed, distance, depth) is carried out. Resolution is considered as a possibility of localization and identification of each source. The estimation accuracy of source coordinates at presence of other sources and noise background is taken as criterion of resolution.

Keywords: hydroacoustics, sound field, moving broadband source, noise source, interference structure, hydrolocation.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время разработан интерферометрический метод локализации широкополосных шумовых источников в океанических волноводах, основанный на интерференционных

[©] Кузькин В. М., Пересёлков С. А., Казначеев И. В., Ткаченко С. А., 2018

явлениях [1, 2]. Интерференционная картина (интерферограмма) обусловлена волноводной дисперсией, т. е. частотной зависимостью постоянных распространения (горизонтальных волновых чисел) мод, и связана с многомодовым характером распространения. Эта особенность позволяет смещением частоты излучения выравнивать изменения фаз мод, вызванных изменением условий распространения. Интерферограмма, регистрируемая на плоскости частотавремя, представляет собой локализованные полосы. Они локализованы в окрестности кривой, определяемой уравнением сохранения фазы для опорной моды, в окрестности которой моды синфазны.

Первые результаты по анализу эффективности работоспособности метода выполнены в работах [3–9]. В них применительно к одиночным векторно-скалярным приемникам (ВСП) установлены условия применимости, выработан критерий обнаружения, получены оценки координат (пеленга, удаленности, радиальной скорости, глубины), оценены помехоустойчивость и устойчивость работы по отношению к изменяющимся гидроакустическим характеристикам океанической среды. Метод успешно апробирован в вычислительных и натурных экспериментах. По сравнению с методами обработки сигналов, согласованных со средой [10, 11], интерференционный метод позволяет повысить помехоустойчивость обнаружения и идентификации (определение координат) шумового источника, а также обеспечить устойчивую работу в нестационарной океанической среде.

В настоящей работе приведены результаты компьютерного моделирования разрешения трех шумовых источников различной интенсивности на фоне изотропной помехи, в основе которого лежит интерферометрический метод. Разрешающая способность рассматривается как возможность раздельного обнаружения и идентификации нескольких источников. В качестве критерия разрешающей способности принимается точность, с которой координаты каждого источника определяются при наличии других источников на фоне помехи.

2. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

Метод состоит из двух этапов. На первом этапе, используя когерентное траекторное накопление спектральных максимумов волнового поля вдоль интерференционных полос, формируемых широкополосным источником, решается задача обнаружения, пеленгования, определения радиальной скорости и удаления [4–7].

Когерентное траекторное накопление максимумов поля источника, реализуемое двукратным преобразованием Фурье интерферограммы, формирует на спектрограмме локализованную область спектральной плотности в виде отдельных фокальных пятен. Спектрограмма наделена свойствами активно восстанавливать акустические волны, идущие от источника, и тем самым позволяет получать изображение источника в виде фокальных пятен, располагающихся в локализованной области. Благодаря этому свойству возрастает отношение сигнал/помеха (с/п) на выходе интегрального преобразования. Важное свойство спектрограммы состоит также и в том, что она позволяет осуществлять независимые отображения источников, интерференционные полосы которых перекрываются по частоте и времени. Это дает возможность в спектрограмме обрабатывать исходную информацию сразу же целиком и одновременно по всей частотно-временной области. Таким образом, весь процесс сводится к одноступенчатому преобразованию изображения источника.

Интерферограммы различных скалярно-векторных компонент поля источника и их комбинаций подобны по форме и отличаются лишь значениями интенсивности, что обусловливает возможность когерентного сложения их спектрограмм [4, 6]. Применительно к скалярной компоненте поля (давление P) спектрограмма имеет вид

$$F_P(\tilde{\nu},\tau) = \int_{0}^{\Delta t} \int_{\omega_0 - \frac{\Delta \omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta \omega}{2}} |P(\omega,t)|^2 \exp\left[i\left(\tilde{\nu}t - \omega\tau\right)\nu_r \, dt \, d\omega\right]. \tag{1}$$

Здесь $\tilde{\nu} = 2\pi\nu$ и τ — циклическая частота и время спектрограммы; $v_r = v \cos \vartheta$ — радиальная скорость источника, ϑ — угол между направлением на приемник и вектором скорости v в горизонтальной плоскости $(x, y), v = |v|; \Delta t$ — время наблюдения; $\Delta \omega$ — полоса сигнала, ω и t — циклическая частота и время интерферограммы. По отношению к другим компонентам поля ВСП формирование спектрограмм аналогично.

Спектральная плотность (1) локализована в двух полосах плоскости $(\tau, \tilde{\nu})$, зеркально перевернутых относительно начала координат. Она расположены в первом и третьем квадрантах, если радиальная скорость $v_r < 0$; т. е. источник приближается к приемнику, и во втором и четвертом квадрантах $(v_r > 0)$, когда источник удаляется от приемника. Область локализации содержит (M-1) главных максимумов с координатами $(\tau_{\mu}, \tilde{\nu}_{\mu})$, расположенными на прямой $\tilde{\nu} = \tilde{\epsilon}\tau$. Здесь M — число энергонесущих мод, формирующих поле, $\mu = \overline{1, M-1}$ — номер фокального пятна. Ближайшей к началу координат пик, обусловленный интерференцией сосседних мод, расположен в точке $(\tau_1, \tilde{\nu}_1)$. Координаты пика, вызванного интерференцией мод номеров $(m, m+2), -(\tau_2, \tilde{\nu}_2)$ и т. д. И, наконец, координаты самого удаленного пика, порожденного интерференцией первой и последней моды — $(\tau_{M-1}, \tilde{\nu}_{M-1})$. Фокальные пятна сосредоточены в полосе, ограниченной прямыми

$$\widetilde{\nu} = \widetilde{\varepsilon}\tau + \delta\widetilde{\nu}, \quad \widetilde{\nu} = \widetilde{\varepsilon}\tau + \delta\widetilde{\nu} \tag{2}$$

в интервале значений $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_{M-1}$, где $\delta \tilde{\nu} = 2\pi/\Delta t$. Вне этой полосы спектральная плотность практически подавлена.

Положения максимумов фокальных пятен пропорциональны радиальной скорости и удалению источника от приемника

$$\dot{v}_r(q) = -2\pi\kappa_\nu v_\nu(q),\tag{3}$$

$$\dot{r}(q) = -\kappa_r \tau_\mu(q),\tag{4}$$

где

$$\kappa_{\nu} = \left[\overline{h_{m(m+\mu)}(\omega_0)}\right]^{-1},\tag{5}$$

$$\kappa_r = \left[\overline{dh_{m(m+\mu)}(\omega_0)/d\omega} \right]^{-1} \tag{6}$$

— параметры, определяющие характерные пространственные и частотные масштабы изменчивости передаточной функции волновода [12]. Здесь \dot{v}_r и \dot{r} — оценки радиальной скорости v_r и удаления r в начальный момент времени; q — входное отношение с/п (по мощности); $h_{m(m+1)} = h_m - h_{m+1}, h_m$ — постоянная распространения (горизонтальное волновое число) m-й моды; $dh_m/d\omega = 1/u_m, u_m$ — групповая скорость m-й моды, черта сверху означает усреднение по номерам энергонесущих мод. Оценки параметров источника обозначаются точкой сверху. Размытие фокальных пятен, вызванное нарушением условий $h_{m(m+\mu)} = \text{const}, dh_{m(m+\mu)}(\omega)/d\omega = \text{const}$ для разных номеров мод m, обусловливает ошибку определения координат источника. Наибольшая размытость отвечает фокальному пятну номера $\mu = 1$, наименьшая — номеру $\mu = M - 1$.

В качестве критерия обнаружения источника принимается наличие выраженного пика сигнала, преобладающего над помеховыми пиками, функции обнаружения

$$\Gamma[\varepsilon_*(q)] = \int_0^{\tau_{\max}} |F_P[\tau(q), \nu(\tau(q))]| \sqrt{1 + \varepsilon_*^2(q)} \, d\tau, \tag{7}$$

ВЕСТНИК ВГУ. СЕРИЯ: ФИЗИКА. МАТЕМАТИКА. 2018. № 1

7

определяющей угловой коэффициент прямой $\nu = \varepsilon \tau$ расположения главных максимумов спектрограммы. Здесь τ_{\max} — временной интервал локализации спектральной плотности; ε_* — варьируемое значение углового коэффициента $\varepsilon = \tilde{\varepsilon}/2\pi$; нижний индекс определяется составляющей ВСП, по которой ведется обнаружение (в данном случае скалярная компонента, давление P). За оценку $\varepsilon(q)$ принимается положение максимального пика, $\max \Gamma_P[\varepsilon_*(q)] = \Gamma_P[\dot{\varepsilon}(q)]$.

После обнаружения и определения радиальной скорости и удаления источника проводится итерационная процедура оценки пеленга φ , под которым понимается азимутальный угол. На первом шаге итерации оценивается отношение максимумов функций обнаружения $\Gamma_{W_y}[\varepsilon_*(q)]$ и $\Gamma_{W_x}[\varepsilon_*(q)]$

$$|\operatorname{tg}\varphi(q)| = \frac{\Gamma_{W_y}[\dot{\varepsilon}_*(q)]}{\Gamma_{W_x}[\dot{\varepsilon}_*(q)]}.$$
(8)

Здесь $W_{x,y} = PV_{x,y}^*$ — интерферограммы горизонтальных составляющих потоков мощности, $V_{x,y}$ — горизонтальные компоненты колебательных скоростей. Алгоритму (8) свойственна неоднозначность определения направления на источник: значения углов $\pm \varphi$, $\pi \pm \varphi$ равнозначны. Отношение в правой части (8) эквивалентно отношению модулей спектрограмм $|F_{W_y}(\tau_\mu(q),\nu_\mu(q))|$, $|F_{W_x}(\tau_\mu(q),\nu_\mu(q))|$. Однако при большом числе мод, когда увеличивается размытие фокальных пятен, это может приводить к понижению точности определения пеленга.

На втором шаге итерации область спектрограмм за пределами зоны фокусировки очищается от помехи и выполняется обратное двукратное преобразование Фурье по восстановлению интерферограмм. Рассматривается знак отношения действительных (или мнимых) частей интерферограмм, например,

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\operatorname{Re}W_y}{\operatorname{Re}W_x}.$$
(9)

Если t
g $\varphi>0,$ то пеленг расположен в первом или третьем квадрантах ВСП, если t
g $\varphi<0,$ — во втором или четвертом квадрантах.

На третьем шаге итерации однозначно определяется квадрант ВСП, в котором расположен пеленг. Для решения этой задачи можно воспользоваться одним из двух способов, основанных на временном или частотном однократном преобразовании Фурье очищенной от помехи интерферограммы, например, $W_x(f,t)$. В первом случае регистрируется знак временной задержки δt между огибающими потоков мощности $s_{W_x}(Q_1,t)$ и $s_{W_x}(Q_2,t+\delta t)$, принимаемые разнесенными ВСП $Q_{1,2}$. Во-втором случае — знак частотного сдвига интерференционного максимума Ω между спектральными плотностями $u_{W_x}(Q_1,f)$ и $u_{W_x}(Q_2,f+\Omega)$, воспользовавпись, например, корреляционным методом [13]. Если $\delta t > 0$ ($\Omega > 0$), источник расположен в первом квадранте (tg $\varphi > 0$) или в четвертом квадранте (tg $\varphi < 0$). И наоборот, если $\delta t < 0$ ($\Omega < 0$), — во втором квадранте (tg $\varphi < 0$) или в третьем квадранте (tg $\varphi > 0$). Как видно, правило знаков позволяет выбрать однозначное направление на источник.

На втором этапе по очищенной от помехи интерферограмме восстанавливается огибающая сигнала и определяется амплитуда моды A_m . По отношению амплитуд соседних мод $\gamma_{m(m+1)} = A_m/A_{m+1}$ оценивается глубина источника. Оценка сводится к определению значения \dot{z} , при котором уравнение

$$\Phi_{m(m+1)}(z) = \left|\varphi_{m(m+1)}(z) - \gamma_{m(m+1)}\right|$$
(10)

обращается в нуль, $\Phi_{m(m+1)}(\dot{z}_s) = 0$. Здесь

$$\varphi_{m(m+1)}(z) = \frac{\psi_m(z, f_0)\psi_m(z_q, f_0)}{\psi_{m+1}(z, f_0)\psi_{m+1}(z_q, f_0)},\tag{11}$$

где $\psi_m(z, f)$ — собственная функция *m*-й моды, z_q — глубина приемника. Решение неоднозначное, для избавления от неопределенности нужно выполнить совместную оценку глубины для разных пар соседних мод. В отсутствие ошибки измерения амплитуды моды каждая такая комбинация содержит одно правильное значение, а остальные — ложные. Оценкой глубины будет значение, которое является общим для выбранных комбинаций. Если амплитуды мод измеряются с ошибкой, то оценки глубины для разных комбинаций мод будут различны и для повышения точности следует провести усреднение [8, 9].

Метод применим как к шумовым, так и к не шумовым полям источников [3, 6]. При обработке данных преобразование Фурье (1) проводится в точках временных отсчетов. Предельное входное отношение с/п $q_{\rm lim}$, когда обеспечивается надежное обнаружение источника и оценки координат близки истинным значениям, оценивается как $q_{\rm lim} = \beta/J^2$ [3, 6]. Здесь J — число временных отсчетов, $\beta = 1$ и $\beta = 1.5$ относятся к детерминированному и шумовому спектрам по скалярной компоненте поля в случае изотропной помехи. Для комбинационной составляющей ВСП, являющейся сложением компонент давления и колебательной скорости, выраженной в эквивалентных единицах давления, предельное входное отношение с/п умень-шается в 4–5 раз [4, 6]. Величина $J = \Delta t/(\Delta T + \delta T)$, где ΔT и δT — время регистрации шумового поля и временной интервал между регистрациями. Выбором времени наблюдения Δt и временных интервалов ΔT и δT можно управлять величиной $q_{\rm lim}$.

3. АЛГОРИТМ РАЗРЕШЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ

Интерферограмма нескольких шумовых источников состоит из интерферограмм каждого из источников и слагаемых, вызванных произведением их компонент поля. Эти слагаемые, в отличие от интерферограмм, порождены не когерентным сложением спектральных максимумов, т. е. они не интерферируют между собой. Поэтому их вес в результирующей интерферограмме незначителен, так что результирующую спектрограмму нескольких источников можно приближенно рассматривать как линейную суперпозицию спектрограмм отдельных источников.

В начале на суммарной спектрограмме выделяется область локализации спектральной плотности шумового поля наиболее мощного источника. Она вырезается и по отношению к ней применяется обратное двукратное преобразование Фурье по восстановлению интерферограммы. Выделяя последовательно на суммарных спектрограммах области локализации отдельных источников и вырезая их, получаем спектрограммы, интерферограммы и функции обнаружения менее интенсивных источников. Итерация повторяется до тех пор, пока не останется изображение одного единственного источника. С каждым шагом итерации восстанавливаемая спектрограмма будет все заметнее отличаться от оригинала, так как при вырезании локализованной области одного из источников частично могут вырезаться и спектральные плотности других, менее мощных источников. Данный эффект преимущественно будет проявляться в областях фокусировки, расположенных вблизи окрестности начала координат спектрограммы, т. е. будут ослабляться низкочастотные компоненты. Это может приводить к искажению формы спектрограммы и соответственно к снижению точности определения координат источников при увеличении шага итерации. Поскольку вырезание изменяет только распределение спектральной плотности, то оно должно незначительно влиять на вид интерферограммы и положение максимума функции обнаружения. Для повышения точности регистрации координат источников следует использовать фокальные пятна высших номеров. Очистка не требует предварительных данных о характере сигнала и помехи. Единственными переменными, которые определяют механизм очистки, являются время наблюдения и угловые коэффициенты прямых положения главных максимумов спектральной плотности источников. Возможности очистки ограничены предельным отношением с/п $q_{\rm lim}$ [3, 5, 6].

4. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

4.1. Исходные данные

Волновод полагается горизонтально-однородным, глубина H = 120 м. Профиль скорости звука приведен на рис. 1. Параметры поглощающего жидкого однородного дна: отношение плотности грунта и воды $\rho = 1.8$, комплексный показатель преломления n = 0.84(1 + i0.03). При моделировании использовалось семь мод, их постоянные распространения h_m и групповые скорости u_m приведены в табл. 1.



Рис. 1. Профиль скорости звука

Рис. 2. Геометрия задачи

Таблица 1. Постоянные распространения h_m и групповые скорости u_m мод на частоте $f_0 = 90$ Гц.

Номера	1	2	3	4	5	6	7
мод, m							
$h_m, {\rm M}^{-1}$	0.3840	0.3808	0.3767	0.3713	0.3637	0.3543	0.3428
u_m , м/с	1466.0	1461.7	1450.8	1429.6	1402.8	1369.3	1329.0

Геометрия задачи показана на рис. 2. ВСП $Q_{1,2}$ размещены на глубине $z_q = 100$ м, расстояние между ними d = 150 м. Положительные направления осей x ВСП и системы координат (x, y) совмещены. Шумовые точечные источники S_i на глубине z_{si} движутся по прямолинейной траектории с постоянной скоростью v_i , i = 1, 2, 3. Источник S_1 приближается к ВСП, источники $S_{2,3}$ — удаляются. Начальные координаты источника S_1 : удаление $r_1 = 7$ км, скорость $v_1 = 3$ м/с, глубина $z_1 = 80$ м, пеленг $\varphi_1 = 45^\circ$, угол траектории $\vartheta_1 = 180^\circ$, радиальная скорость $v_{r1} = -3$ м/с, входное отношение с/п $q_1 = 6 \times 10^{-3}$. Начальные координаты источника S_2 : удаление $r_2 = 10$ км, скорость $v_2 = 13.5$ м/с, глубина $z_2 = 5$ м, пеленг $\varphi_2 = 60^\circ$, угол траектории $\vartheta_2 = 0$, радиальная скорость $v_{r2} = 13.5$ м/с, входное отношение с/п $q_2 = 1$. Начальные координаты источника S_3 : удаление $r_3 = 20$ км, скорость $v_3 = 9.9$ м/с, глубина $z_3 = 6$ м, пеленг $\varphi_3 = 15^{\circ}$, угол траектории $\vartheta_3 = 45^{\circ}$, радиальная скорость $v_{r3} = 7.0$ м/с, входное отношение с/п $q_3 = 10^{-1}$.

Сигналы источников являются белым шумом. Время наблюдения $\Delta t = 1.5$ мин. Ширина полосы $\Delta f = 80 - 100$ Гц. Шумовое поле регистрируется в течение $\Delta T = 5$ с, т. е. шаг дискретизации по частоте равен 0.2 Гц, временной интервал между регистрациями $\delta T = 0.1$ с. Число временных точек отсчета $J \cong 17$, так что по скалярной компоненте поля предельное входное отношением с/п $q_{\rm lim} \cong 5 \times 10^{-3}$.

4.2. Результаты моделирования

Для иллюстрации принципа линейной суперпозиции процесса формирования изображений источников на рис. З представлены нормированные интерферограмма, спектрограмма и функция обнаружения суммарного поля трех шумовых источников одинаковой интенсивности в отсутствие помехи. Нормированные величины обозначаются сверху знаком "крышка". На интерферограмме (рис. За) отчетливо прослеживаются перекрывающиеся интерференционные полосы трех источников, т. е. поля источников не интерферируют между собой. Наложение спектральных плотностей приходится преимущественно на первое фокальное пятно (рис. 3(6, в)), которое претерпевает основные искажения при разрешении источников. Восстановление волнового фронта интерферограммы с помощью спектрограммы образует два изображения источника, являющиеся зеркальными отображениями друг друга. Максимумы функции обнаружения (рис. 3r) приходятся на угловые коэффициенты прямых, на которых расположены главные максимумы спектральных плотностей источников. Крайний левый максимум соответствует источнику S_2 , средний — источнику S_3 , правый крайний источнику S_1 .

На рис. 4 приведены интерферограмма, спектрограмма и функция обнаружения суммарного поля трех шумовых источников на фоне помехи для условий моделирования. Отличие в интенсивностей шумовых источников приводит к тому, что на интерферограмме (рис. 4а) и спектрограмме (рис. 4(б, в)) прослеживается изображение только самого мощного источника S_2 . Указанная особенность проявляется и на поведении функции обнаружения (рис. 4г), имеющей один выраженный максимум. Изображения двух других источников $S_{1,3}$ маскируются полем источника S_2 и помехой.

Эффект фильтрации области спектрограммы за пределами полосы локализации спектральной плотности источника S_2 и выполнения обратного двукратного преобразования Фурье продемонстрирован на рис. 5. Для сравнения показана спектрограмма источника в отсутствие помехи и источников $S_{1,3}$ (рис. 5(д, е)). Такие спектрограммы назовем оригиналами.

Истонники	Координаты источников					
источники	$\dot{\varphi}$, град	$\dot{v}_r,\mathrm{m/c}$	\dot{r} , KM	\dot{z}_s , M		
	(φ) , град	$(v_r),\mathrm{m/c}$	$(r), {\rm km}$	(z), м		
S_1	46.8	-3.4	7.2	80.8		
	(45)	(-3)	(7)	(80)		
S_2	60.5	12.4	9.2	≤ 5.3		
	(60)	(13.5)	(10)	(5)		
S_3	16.2	6.7	18.9	≤ 9.2		
	(15)	(7)	(20)	(6)		

Таблица 2. Оценки координат разрешенных шумовых источников на фоне помехи (в круглых скобках указаны модельные координаты источников)

Незначительное различие между ними обусловлено отсутствием боковых максимумов на очищенной спектрограмме и никак не проявляется на положениях фокальных пятен по срав-



Рис. 3. Нормированная интерферограмма (a), спектрограмма (б, в) и функция обнаружения (г) трех шумовых источников S_{1,2,3} одинаковой интенсивности в отсутствие помехи.



Рис. 4. Нормированная интерферограмма (а), спектрограмма (б, в) и функция обнаружения (г) трех шумовых источников S_{1,2,3} для условий моделирования.



Рис. 5. Очистка области спектрограммы за пределами области локализации источника S_2 (a, b), восстановленные интерферограмма (b) и функция обнаружения (c). Оригинал спектрограммы источника S_2 (d, e).

нению с оригиналом. Очищенные интерферограмма и функция обнаружения идентичны оригиналу (на рис. 5 они не приводятся). Координаты положения первого главного максимума: $\tau_1 = 0.11$ с, $\nu_1 = -0.014$ Гц (рис. 5а). Согласно (3)–(6) и данным табл. 1 получаем оценки координат источника S_2 : $\dot{r}_2 = 9.2$ км, $\dot{v}_{r2} = 12.4$ м/с. Оценки координат разрешенных источников далее сгруппированы в табл. 2.

Далее поле трех источников очищается от поля источника S_2 вырезанием области локализации спектральной плотности на спектрограмме и обратным двукратным преобразованием Фурье восстанавливается интерферограмма (рис. 6). В результате получаем изображения двух источников $S_{1,3}$. На зашумленной интерферограмме (рис. 6а) едва различимы интерференционные полосы. В тоже время спектрограмма (рис. 6(б, в)) и функция обнаружения (рис. 6г) позволяют отчетливо наблюдать изображение источника S_3 . Источник S_1 не прослеживается, он маскируется источником S_3 и помехой.



Рис. 6. Нормированная интерферограмма (a), спектрограмма (б, в) и функция обнаружения (в) двух шумовых источников $S_{1,3}$.

Изображение источника S_3 , очищенное от источника S_1 и помехи, а также функция обнаружения приведено на рис. 7 (а–г). Показан оригинал спектрограммы (рис. 7(д, е)). Различие между спектрограммами, если абстрагироваться от побочных максимумов, связано с видом

и расположением первого фокального пятна: деформирована форма и смещено положение максимума, что обусловлено механизмом вырезания. Очищенные нормированные интерферограмма и функция обнаружения по-прежнему идентичны оригиналу. Координаты источника S_3 корректно определять по положению максимума второго фокального пятна: $\tau_2 = 0.36$ с, $\nu_2 = -0.013$ Гц (рис. 7а). В результате получаем: $\dot{r}_3 = 18.9$ км, $\dot{v}_{r3} = 6.7$ м/с.

Результат очищения поля двух источников $S_{1,3}$ от поля источника S_3 приведен на рис. 8. Интерферограмма становится хаотической и интерференционные полосы не различимы (рис. 8a), однако на спектрограмме (рис. 8(б, в)) видно упорядоченное расположение фокальных пятен источника S_1 . На это указывает и вид функции обнаружения (рис. 8г).

Очистка источника S_1 от помехи продемонстрирована на рис. 9(а–г), там же приведен оригинал спектрограммы (рис. 9(д, е)). Различия между очищенной спектрограммой и ее оригиналом проявляются преимущественно в области расположения первых двух фокальных пятен. Очищенные интерферограмма и функция обнаружения, как и для других источников, идентичны оригиналу. Координаты положения третьего главного максимума: $\tau_3 = 0.25$ с, $\nu_3 = 0.011$ Гц, так что координаты источника S_1 оцениваются как $\dot{r}_1 = 7.2$ км, $\dot{v}_{r1} = -3.4$ м/с.

На рис. 10 приведены интерферограмма (а), спектрограмма (б, в) и функция обнаружения (г) после вырезания спектральных областей источников $S_{1,2,3}$. Наблюдается хаотическая картина распределения спектральной плотности (а–в). Многочисленные сопоставимые пики функции обнаружения (г) свидетельствуют об отсутствии источника, что соответствует условиям численного эксперимента. В реальности это может означать, что изображение не разрешенного источника полностью маскируется помехой. По отношению максимумов восстановленных функций обнаружения (8) выполнена оценка пеленга для трех источников $S_{1,2,3}$ (см. табл. 2).

На рис. 11 представлены зависимости функции (10), обрезанные на уровне $\Phi_{m(m+1)}(z) = 5$, для двух комбинаций мод разрешенных источников. Решение уравнения $\Phi_{m(m+1)}(\dot{z}_s) = 0$ неоднозначно. Для разрешенного источника S_1 глубина оценивается как $Z_{s1} = [(84.6 + 77.1)/2 = 80.8$ м.

Зависимости $\Phi_{m(m+1)}(z)$ для источников $S_{2,3}$ незначительно различаются лишь в области границы волновода z = 0, где их нулевые значения размыты. Поэтому для них можно лишь указать области значений оценок глубины: $\dot{z}_2 \leq 5.3$ м, $\dot{z}_3 \leq 9.2$ м. Оценки глубин источников приведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результирующая интерферограмма и спектрограмма представляет собой линейную суперпозицию интерферограмм и спектрограмм нескольких источников. Разрешение источников может быть осуществлено во всех случаях, когда локализованные области спектрограмм источников полностью не накладываются друг на друга, позволяя выделять их на фоне помехи. При этом координаты разрешенных источников на фоне помехи измеряются с такой же точностью, когда другие источники и помеха отсутствуют. Методу свойственны некоторые особенности.

Во-первых, можно корректировать предельное входное отношение с/п и тем самым управлять максимальной дальностью обнаружения разрешенных источников.

Во-вторых, возможно восстановление интерференционной картины каждого из разрешенных источников путем обратного преобразования Фурье их спектрограммы, очищенной от помехи. Это дает возможность восстанавливать передаточную функцию волновода в различных направлениях, определяемых пеленгом источника.

Далее, в-третьих, с увеличением частоты возможно возникновение несколько однотипных групп мод, которые для источников, расположенных вблизи поверхности и на глубине, формируют на спектрограмме не пересекающиеся локализованные области спектральных плот-



Рис. 7. Очистка области спектрограммы за пределами области локализации источника S_3 (a, b), восстановленные интерферограмма (b) и функция обнаружения (c). Оригинал спектрограммы источника S_3 (d, e).



Рис. 8. Нормированная интерферограмма (а), спектрограмма (б, в) и функция обнаружения (г) источника S₁.



Рис. 9. Очистка области спектрограммы за пределами области локализации источника S_1 (a, b), восстановленные интерферограмма (b) и функция обнаружения (c). Оригинал спектрограммы источника S_1 (d, e).



Рис. 10. Нормированные интерферограмма (a), спектрограмма (б, в) и функция обнаружения (г) после вырезания локализованных областей спектральной плотности источников $S_{1,2,3}$.



Рис. 11. Функция $\Phi_{m(m+1)}(z)$ при различных комбинациях мод (m, m + 1) разрешенных источников: $(a, b) S_1$; $(e, c) S_2$; $(d, e) S_3$. Комбинации мод: (2, 3) (a, e, d); (3, 4) (b, c, e). Вертикальным пунктиром показаны значения функции, отвечающие модельной глубине источника.

ностей. Это позволяет разрешать приповерхностные и подводные источники и в случае, когда у них одинаковые пеленги, дальности и радиальные скорости.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН І. 7 «Актуальные проблемы фотоники, зондироване неоднородных сред и материалов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чупров, С. Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане / Акустика океана. Современное состояние / С. Д. Чупров. — М. : Наука, 1982. — С. 71–82.

2. Орлов, Е. Ф. Интерференционная структура широкополосного звука в океане / Проблемы акустики океана / Е. Ф. Орлов. — М. : Наука, 1984. — С. 85–92.

3. Noise Source Localization Shallow Water / G. N. Kuznetsov, V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, I. V. Kaznacheev // Phys. Wave Phenom. - 2017. - V. 25, № 2. - P. 156–163.

4. Interferometric Method for Estimating the Velocity of a Noise Sound Source and the Distance to it in Shallow Water Using a Vector-Scalar Receiver / G. N. Kuznetsov, V. M. Kuz'kin,

S. A. Pereselkov et. al. // Phys. Wave Phenom. — 2017. — V. 25, № 4. — P. 299–306.

5. Кузнецов, Г. Н. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море / Г. Н. Кузнецов, В. М. Кузькин, С. А. Пересёлков // Акуст. журн. — 2017. — Т. 63, № 4. — С. 406–418.

6. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторноскалярным приемником / И. В. Казначеев, Г. Н. Кузнецов, В. М. Кузькин, С. А. Пересёлков // Акуст. журн. — 2018. — Т. 64, № 1. — С. 33–45.

7. Interferometric Direction Finding by a Vector-Scalar Receiver / V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, G. N. Kuznetsov, I. V. Kaznacheev // Phys. Wave Phenom. -2018. - V. 26, Nº 1. - P. 63-73.

8. Estimation of the Depth of an Immobile Sound Source in Shallow Water / T. N. Besedina, G. N. Kuznetsov, V. M. Kuz'kin et. al. // Phys. Wave Phenom. − 2015. − V. 23, № 4. − P. 292–303.

9. Wave Method for Estimating the Sound Source Depth in an Oceanic Waveguide / G. N. Kuznetsov, V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, D. Yu. Prosovetskiy // Phys. Wave Phenom. - 2016. - V. 24, № 4. - P. 310-316.

10. Dosso, S. E. Maximum-Likelihood and Other Processors for Incoherent and Coherent Matched-Field Localization / S. E. Dosso, M. J. Wilmut // J. Acoust. Soc. Am. 2012. - V. 132. - P. 2273-2285.

11. Сазонтов, А. Г. Согласованная пространственная обработка сигналов в подводных звуковых каналах (Обзор) / А. Г. Сазонтов, А. И. Малеханов // Акуст. журн. — 2015. — Т. 61, № 2. — С. 233–253.

12. Бреховских, Л. М. Теоретические основы акустики океана / Л. М. Бреховских, Ю. П. Лысанов. — М. : Наука, 2007. — 370 с.

13. Кузькин, В. М. Корреляционный метод измерения частотных сдвигов максимумов звукового поля, вызванных возмущениями океанической среды / В. М. Кузькин, А. А. Луньков, С. А. Пересёлков // Акуст. журн. — 2010. — Т. 56, № 5. — С. 655–661.

REFERENCES

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

2. Orlov E.F. Interference structure of broadband sound in ocean. [Orlov E.F. Interferencionnaya struktura shirokopolosnogo zvuka v okeane]. *Problemy akustiki okeana — Problems in ocean acoustics*, Moscow: Nauka, 1984, pp. 85–92.

3. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznacheev I.V. Noise Source Localization

Shallow Water. Phys. Wave Phenom, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 156–163.

4. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznacheev I.V., Grigor'ev V.A. 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, vol. 25, no. 4, pp. 299–306.

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

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

7. Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kuznetsov G.N., Kaznacheev I.V. Interferometric Direction Finding by a Vector-Scalar Receiver. Phys. Wave Phenom., 2018, vol. 26, no. 1, pp. 63–73.

8. Besedina T.N., Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Prosovetskiy L.Yu. Estimation of the Depth of an Immobile Sound Source in Shallow Water. Phys. Wave Phenom., 2015, vol. 23, no. 4, pp. 292–303.

9. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Prosovetskiy D.Yu. Wave Method for Estimating the Sound Source Depth in an Oceanic Waveguide. Phys. Wave Phenom., 2016, vol. 24, no. 4, pp. 310–316.

10. Dosso S.E., Wilmut M.J. Maximum-Likelihood and Other Processors for Incoherent and Coherent Matched-Field Localization. J. Acoust. Soc. Am. 2012, vol. 132, pp. 2273–2285.

11. Sazontov A.G., Malekhanov A.I. Matched field signal processing in underwater sound channels (Review). [Sazontov A.G., Malexanov A.I. Soglasovannaya prostranstvennaya obrabotka signalov v podvodnyx zvukovyx kanalax (Obzor)]. Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics, 2015, vol. 61, no. 2, pp. 233–253.

12. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. Fundamentals of Ocean Acoustics. [Brexovskix L.M., Lysanov Yu.P. Teoreticheskie osnovy akustiki okeana]. Moscow: Nauka, 2007, 370 p.

13. Kuz'kin V.M., Lun'kov A.A., Pereselkov S.A. Correlation method of measuring the frequency shifts of the sound field maxima caused by perturbations of the oceanic medium. [Kuz'kin V.M., Lun'kov A.A., Peresyolkov S.A. Korrelyacionnyj metod izmereniya chastotnyx sdvigov maksimumov zvukovogo polya, vyzvannyx vozmushheniyami okeanicheskoj sredy]. Akusticheskij zhurnal – Acoustical Physics, 2010, vol. 56, no. 5, pp. 655–661.

Кузькин Венедикт Михайлович, главный	Kuz'kin Venedikt Mikhailovich, chief			
научный сотрудник, НЦВИ ИОФ РАН,	researcher, Wave Research Center, GPI			
Москва, Россия	RAS Moscow, Russia			
E-mail: kumiov@yandex.ru	E-mail: kumiov@yandex.ru			
Тел.: +7 (499) 503-83-84	$Tel.:+ 7 \; (499) \; 503 - 83 - 84$			
Переселков Сергей Алексеевич, профессор	Pereselkov Sergey Alexeevich, Professor of			
Переселков Сергей Алексеевич, профессор кафедры математической физики ВГУ, Во-	Pereselkov Sergey Alexeevich, Professor of the Department of Mathematical Physics,			
Переселков Сергей Алексеевич, профессор кафедры математической физики ВГУ, Во- ронеж, Россия	Pereselkov Sergey Alexeevich, Professor of the Department of Mathematical Physics, Voronezh State University, Voronezh, Russia			
Переселков Сергей Алексеевич, профессор кафедры математической физики ВГУ, Во- ронеж, Россия E-mail: pereselkov@yandex.ru	Pereselkov Sergey Alexeevich, Professor of the Department of Mathematical Physics, Voronezh State University, Voronezh, Russia E-mail: pereselkov@yandex.ru			
Переселков Сергей Алексеевич, профессор кафедры математической физики ВГУ, Во- ронеж, Россия E-mail: pereselkov@yandex.ru Tea: ± 7 (950) 770–86–79	Pereselkov Sergey Alexeevich, Professor of the Department of Mathematical Physics, Voronezh State University, Voronezh, Russia E-mail: pereselkov@yandex.ru Tel: ± 7 (950) 770–86–79			

Казначеев Илья Викторович, аспирант кафедры математической физики ВГУ, Воронеж, Россия E-mail: kaznacheev.ilya@gmail.com Тел.: +7 (473) 220-87-48

Ткаченко Сергей Александрович, аспирант кафедры математической физики ВГУ, Воронеж, Россия E-mail: sega-tk@mail.ru Teл.: +7 (473) 220-87-48 Kaznacheev Ilya Viktorovich, Postgraduate Student of the Department of Mathematical Physics, Voronezh State University, Voronezh, Russia E-mail: kaznacheev.ilya@gmail.com Tel.: +7 (473) 220-87-48