

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МАЛОШУМНОГО ИСТОЧНИКА ЗВУКА

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 11.01.2018 г.

Аннотация. На основе интерферометрического метода локализации источника звука рассмотрено пеленгование шумового источника с использованием двух векторно-скалярных приемников. Интерферометрический метод базируется на двукратном преобразовании Фурье интерференционной картины, формируемой во время движения шумового источника в океаническом волноводе. В основе пеленгования лежит отношение абсолютных значений максимумов функций обнаружений с использованием x -й составляющей колебательной скорости и комбинационной компоненты, равной произведению x -й и y -й составляющих. Предложенное в работе правило знаков, основанное на использовании очищенных от помех интерферограмм, позволяет выбрать однозначное направление на источник. Существенным преимуществом предложенного метода пеленгования является отсутствие необходимости знаний о характере шумового сигнала источника, распределенной помехи и передаточной функции волновода. Точность пеленгования ограничена предельным входным отношением с/п. В работе оценена помехоустойчивость метода. Приведены результаты численного эксперимента.

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

LOCATION METHOD OF LOW-NOISE SOUND SOURCE

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

Abstract. The noise source direction estimation based on the interferometric method of sound source localization by using of two vector-scalar receivers is considered. The interferometric method is based on the double Fourier transform of the interference structure formed by noise source moving in the ocean waveguide. The source direction estimation is determined by the ratio of absolute values of detection functions peaks formed by x -th component of the vibrational velocity and combination of x -th and y -th components. The proposed rule of signs allows to detect the one-value of source direction. A significant advantage of the proposed method is not necessary information about source noise signal spectrum and waveguide transfer function. The direction estimation accuracy is limited by maximum value of input ratio signal/noise. The method noise immunity is estimated. The results of the numerical experiment are presented.

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

ВВЕДЕНИЕ

Требования к увеличению дальности обнаружения и идентификации малошумных источников звука стимулировали интенсивные исследования в создании нового поколения средств измерений и обработки гидроакустических сигналов. Увеличение объема информации о волновых полях может быть обеспечено за счет применения векторно-скалярных приемников

(ВСП), регистрирующих как давление, так и составляющие колебательной скорости частиц среды или градиента давления [1]. Некоторые результаты измерений характеристик полей с использованием ВСП отражены в работах [2–5].

На настоящий момент разработан инновационный метод обработки данных, основанный на интерференционных явлениях [6], обусловленных волноводной дисперсией, т. е. частотной зависимостью постоянных распространения (горизонтальных волновых чисел) мод, и многомодовым характером распространения. В основе метода лежит когерентное траекторное накопление максимумов поля вдоль интерференционных полос, формируемых движущимся шумовым источником. Двукратное преобразование Фурье интерференционной картины (интерферограммы) формирует на спектрограмме локализованную область спектральной плотности в форме отдельных фокальных пятен. Через эту информацию решаются задачи обнаружения, определения радиальной скорости (составляющей скорости по направлению к источнику) и удаленности источника [7–10]. Далее за пределами области локализации спектральной плотности спектрограмма очищается от помехи и выполняется обратное двукратное преобразование Фурье. По восстановленной интерферограмме, очищенной от помехи, восстанавливается огибающая сигнала и через отношение амплитуд соседних мод оценивается глубина источника [11, 12]. Метод успешно апробирован в вычислительных и натуральных экспериментах.

В настоящей статье изложен интерферометрический метод пеленгования, позволяющий двумя ВСП с высокой помехоустойчивостью однозначно определять направление на шумовой источник. Приведены результаты численного эксперимента.

ОБНАРУЖЕНИЕ ИСТОЧНИКА

Волновод полагается горизонтально-однородным. Положение источника на момент времени t обозначено S , а расстояние до ВСП — r . Азимутальный угол (пеленг) направления на источник в момент времени t — θ . Источник движется с постоянной радиальной скоростью v_r . Характерный частотный масштаб изменения средней величины модуля квадрата спектра шумового сигнала много больше характерного масштаба квадрата модуля передаточной функции. Горизонтальные компоненты колебательных скоростей $V_{x,y}$ представим в виде суммы мод дискретного спектра [8, 10]

$$V_x = \frac{\cos \theta}{\rho \omega} \sum_m A_m h_m(\omega) \exp[ih_m(\omega)r], \quad (1)$$

$$V_y = \frac{\sin \theta}{\rho \omega} \sum_m A_m h_m(\omega) \exp[ih_m(\omega)r], \quad (2)$$

где A_m и h_m — амплитуда и постоянная распространения m -й моды, $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота, ρ — плотность водной среды. Цилиндрическое расхождение поля, модальное затухание и глубины расположения источника и приемников учитываются амплитудной зависимостью мод. Аргументы у амплитуд мод и постоянный множитель, характеризующий спектр, опущены. Далее от переменной r перейдем к переменной t .

Используя выражения (1), (2), запишем интерферограммы x -й составляющей колебательной скорости $R = V_x V_x^*$, комбинационной компоненты $L = V_x V_y^*$, и применим к ним двукратные преобразования Фурье

$$F_P(\tau, \tilde{\nu}) = \int_0^{\Delta t} \int_{\omega_0 - \frac{\Delta \omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta \omega}{2}} R(\omega, t) \exp[i(\tilde{\nu}t - \omega\tau)] \nu_r d\omega dt, \quad (3)$$

$$F_L(\tau, \tilde{\nu}) = \int_0^{\Delta t} \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} L(\omega, t) \exp [i (\tilde{\nu}t - \omega\tau)] \nu_r d\omega dt. \quad (4)$$

Здесь $\tilde{\nu} = 2\pi\nu$ и τ — циклическая частота и время спектрограммы; $\Delta\omega$ — ширина спектра; Δt — время накопления. Максимумы фокальных пятен расположены на прямой $\tilde{\nu} = \tilde{\varepsilon}\tau$. Спектрограммы (3), (4) в силу соотношений (1), (2) различаются постоянными множителями, определяемыми пеленгом, так что их нормированные величины идентичны, т.е. их спектрограммы когерентны.

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

$$\Gamma_{R,L}[\varepsilon_*(q)] = \int_0^{\tau_{\max}} |F_{R,L}[\tau(q), \nu(\tau(q))]| \sqrt{1 + \varepsilon_*^2(q)} d\tau, \quad (5)$$

определяющей угловой коэффициент прямой $\nu = \varepsilon\tau$, на которой расположены максимумы фокальных пятен спектрограммы при входном отношении $c/\pi q$. Здесь τ_{\max} — временной интервал локализации спектральной плотности; ε_* — варьируемый угловой коэффициент $\varepsilon = \tilde{\varepsilon}/2\pi$. За оценку $\varepsilon(q)$ принимается положение максимального пика, $\max \Gamma_{R,L}[\varepsilon_*(q)] = \Gamma_{R,L}[\hat{\varepsilon}(q)]$. Для обнаружения источника информация о гидроакустических характеристиках океанической среды не требуется.

Предельное отношение $c/\pi q_{\lim}$, при котором реализуется когерентное накопление спектральных максимумов вдоль интерференционных полос, т.е. источник обнаруживается, а оценки его координат близки истинным значениям, для шумового источника по скалярной компоненте поля на фоне изотропной помехи оценивается как $q_{\lim} = 1,5/J^2$ (по мощности) [7, 10]. Здесь J — число временных отсчетов при двукратном быстром преобразовании Фурье.

АЛГОРИТМ ПЕЛЕНГОВАНИЯ ИСТОЧНИКА

После обнаружения источника проводится итерационная процедура оценки пеленга. На первом шаге определяется отношение максимумов функций обнаружения

$$|\operatorname{tg} \theta(q)| = \frac{\Gamma_L[\hat{\varepsilon}(q)]}{\Gamma_R[\hat{\varepsilon}(q)]}. \quad (6)$$

Алгоритму (6) свойственна неоднозначность определения направления на источник: значения пеленгов $\pm\theta$, $\pi \pm \theta$ равнозначны.

На втором шаге область спектрограмм за пределами зоны фокусировки очищается от помехи и выполняется двукратное обратное преобразование Фурье по восстановлению интерферограмм источника. Анализируется корреляция между интерферограммами $L(f)$ и $R(f)$ в фиксированный момент времени t . Если корреляция положительная, то пеленг расположен в первом или третьем квадрантах горизонтальной плоскости ВСП, если корреляция отрицательная, то — во втором или четвертом квадрантах. Данное условие можно формализовать в форме соотношения

$$\gamma = \frac{L(f)}{R(f)}. \quad (7)$$

Условие $\gamma > 0$ соответствует положительной корреляции, а условие $\gamma < 0$ — отрицательной корреляции.

На третьем шаге однозначно определяется квадрант горизонтальной плоскости ВСП, в котором расположен пеленг. Для решения этой задачи можно воспользоваться одним из

двух способов, основанных на временном или частотном представлении одной из очищенной от помехи интерферограммы, например $R(f, t)$. Один из них предусматривает однократное преобразование Фурье интерферограммы по частоте, другой — по времени. В первом случае регистрируется знак временной задержки \tilde{t} между огибающими сигнала $s_R(Q_1, t)$ и $s_R(Q_2, t + \tilde{t})$ разнесенных ВСП $Q_{1,2}$. Во втором случае — знак частотного сдвига \tilde{f} между спектрами $u_R(Q_1, f)$ и $u_R(Q_2, f + \tilde{f})$. Если $\tilde{t} > 0$ ($\tilde{f} > 0$), источник расположен в первом квадранте ($\text{tg } \theta > 0$) или в четвертом квадранте ($\text{tg } \theta < 0$). И наоборот, если $\tilde{t} < 0$ ($\tilde{f} < 0$), то — во втором ($\text{tg } \theta < 0$) или в третьем квадрантах ($\text{tg } \theta > 0$).

Таким образом, правило знаков на втором и третьем шагах итерации позволяет выбрать однозначное направление на источник, оцененное на первом шаге итерации по отношению функций обнаружения.

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ ШУМОВОГО СИГНАЛА

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

Характерный наименьший частотный масштаб в окрестности частоты ω_0 на расстоянии r между источником и приемником

$$\Lambda = \frac{2\pi}{r|dh_{1M}(\omega_0)/d\omega|}, \quad (8)$$

где $h_{1M} = h_1 - h_M$, M — наибольший номер моды, формирующей поле [6]. Примем, что период изменчивости поля определяется независимыми значениями передаточной функции в N точках (ориентировочно $N \approx 5$). Частотный интервал $\delta\omega$ между двумя выборками не должен превышать значения $2\pi/T$, $\delta\omega \leq 2\pi/T$, где T — время регистрации шумового сигнала. Величину (8) можно также записать как

$$\Lambda = N\delta\omega = 2\pi N/T. \quad (9)$$

Из (8), (9) следует, что длительность регистрации сигнала оценивается как

$$T \geq T_{\min} = Nr \left| \frac{dh_{1M}(\omega_0)}{d\omega} \right|, \quad (10)$$

так что с увеличением расстояния r и опорной частоты ω_0 минимальное время регистрации шумового сигнала возрастает. Для того, чтобы регистрируемые посылки были независимыми, длительность δT между ними должна быть более $2\pi/\Delta\omega$, т. е. $\delta T \geq \delta T_{\min} = 2\pi/\Delta\omega$.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Глубина волновода $H = 120$ м. Распределение скорости звука по глубине приведено на рис. 1. Параметры поглощающего жидкого однородного дна: отношение плотности грунта и воды $\beta = 1.8$, комплексный показатель преломления $n = 0.84(1 + i0.03)$.

Геометрия задачи показана на рис. 2. ВСП $Q_{1,2}$ находятся на глубине $z_q = 100$ м, расстояние между ними $d = 100$ м. Шумовые источники S_1 и S_2 расположены в первом и втором квадрантах на глубине $z_s = 80$ м, пеленги: $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 135^\circ$. Первый источник удаляется от приемников со скоростью $v_r = 3$ м/с, второй — с такой же скоростью приближается. В начальный момент времени источники удалены от ВСП Q_1 на расстояние $r = 7$ км. Ширина полосы $\Delta f = 180 - 200$ Гц.

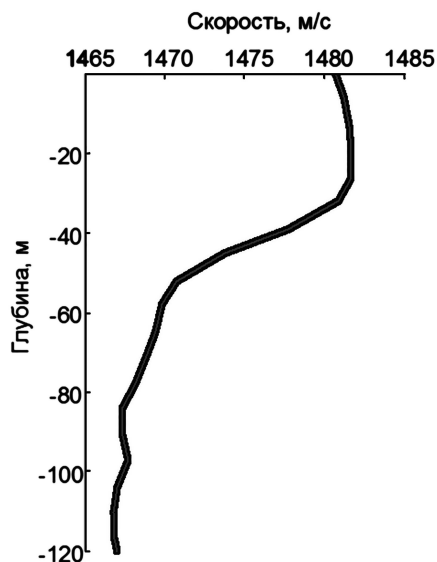


Рис. 1. Профиль скорости звука.

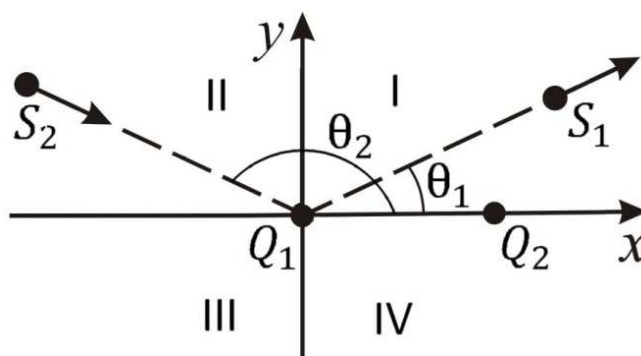


Рис. 2. Схема расположения шумовых источников по отношению к ВСП: $Q_1Q_2 = 100$ м, $Q_1S_1 = Q_1S_2 = 7$ км, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 135^\circ$.

При моделировании использовалось пятнадцать мод, их постоянные распространения h_m и групповые скорости $u_m = 1/(dh_m/d\omega)$ приведены в табл. 1. Согласно этим данным $T_{\min} = 2.9$ с, $\delta T = 0.05$ с.

Таблица 1. Постоянные распространения h_m и групповые скорости u_m мод на частоте $f_0 = 190$ Гц.

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Номера мод, m | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $h_m, \text{ м}^{-1}$ | 0.8124 | 0.8099 | 0.8067 | 0.8035 | 0.8004 | 0.7960 | 0.7908 | 0.7847 | 0.7776 |
| $u_m, \text{ м/с}$ | 1466.7 | 1465.4 | 1463.6 | 1460.0 | 1457.9 | 1449.2 | 1440.0 | 1428.9 | 1416.5 |

продолжение табл. 1.

| | | | | | | |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Номера мод, m | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| $h_m, \text{ м}^{-1}$ | 0.7697 | 0.7608 | 0.7509 | 0.7399 | 0.7279 | 0.7149 |
| $u_m, \text{ м/с}$ | 1402.5 | 1386.8 | 1369.4 | 1350.2 | 1329.3 | 1306.9 |

Сигналы источников и распределенная помеха являются белым шумом. Помеха изотропная. Время наблюдения $\Delta = 1.5$ мин. Шумовое поле источника регистрируется в течение $T = 5$ с, временной интервал между регистрациями $\delta T = 0.1$ с. Входное отношение с/п $q \cong 6 \times 10^{-3}$ ($\cong -22$ дБ). Число временных точек отсчета при БПФ $J = \Delta t / (T + \delta T) \cong 17$, так что предельное входное отношение с/п $q_{\text{lim}} \cong 5 \times 10^{-3}$ ($\cong -23$ дБ). Таким образом, обнаружение осуществляется при малом входном отношении с/п, близком предельному значению.

Нормированные величины ниже обозначены сверху знаком “крышка”. С целью повышения контрастности на интерферограммах вырезаны средние значения.

На рис. 3, 4 приведены нормированные интерферограммы, спектрограммы и функции обнаружения источников S_1 и S_2 . Нижние индексы у функций обнаружения опущены, так как для интерферограмм составляющей колебательной скорости и комбинационной компоненты их нормированные зависимости идентичны. На фоне интенсивной фоновой помехи интерференционные полосы не наблюдаются (рис. 3а, 4а). В результате двукратного преоб-

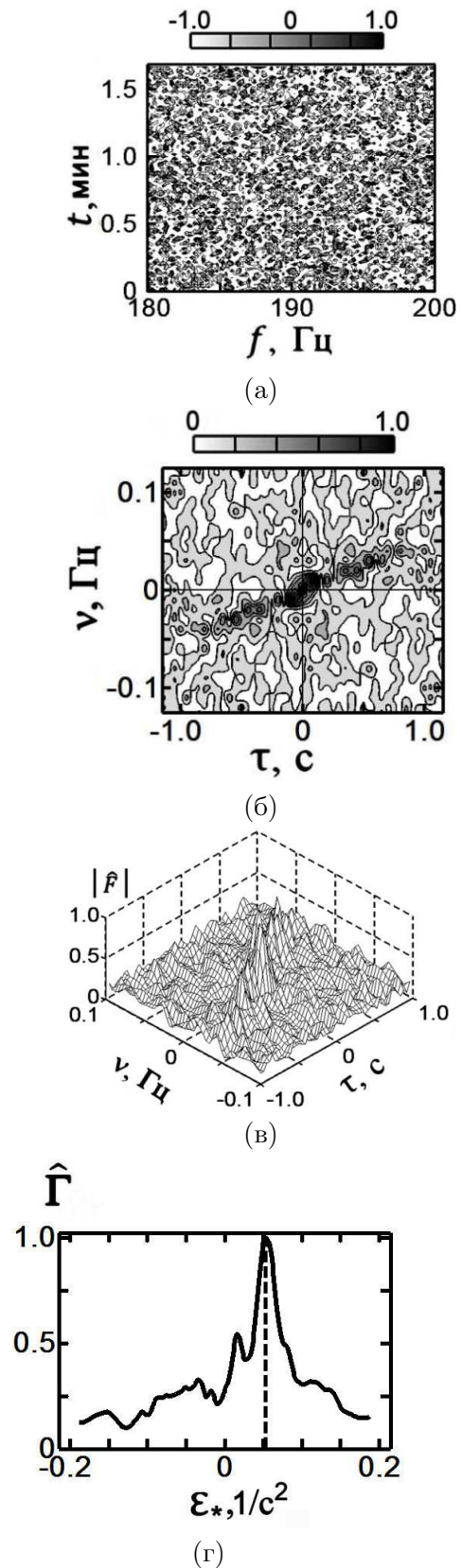
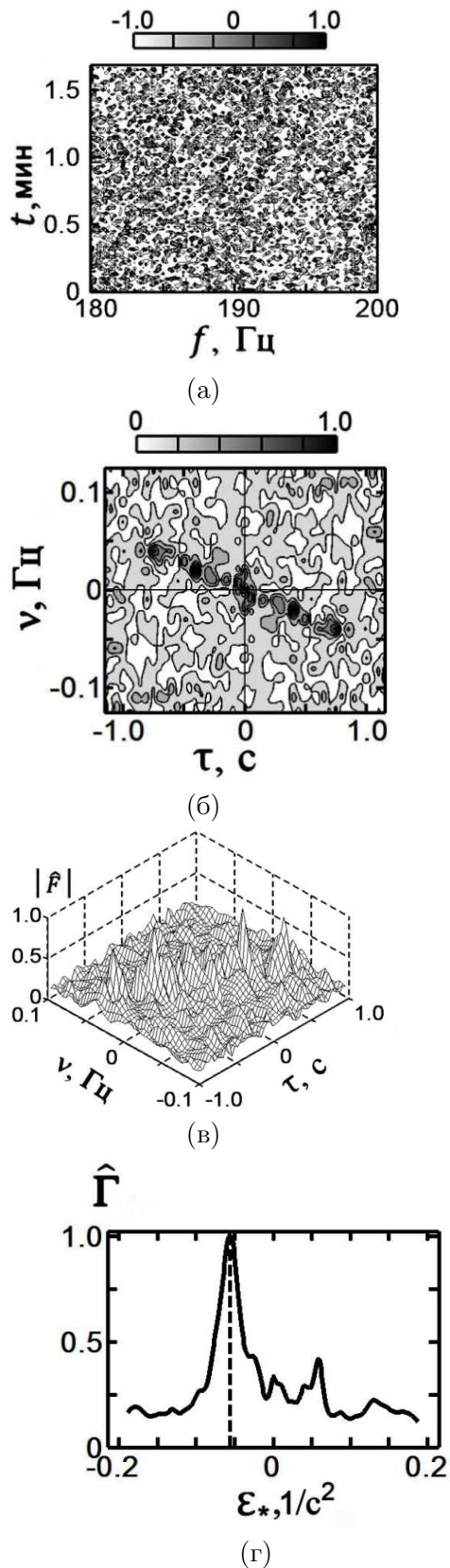


Рис. 3. Нормированные интерферограмма (а), спектрограмма (б, в) и функция обнаружения (г). Источник S_1 .

Рис. 4. Нормированные интерферограмма (а), спектрограмма (б, в) и функция обнаружения (г). Источник S_2 .

разования Фурье виден эффект изображения источников в виде расположения фокальных пятен (рис. 3(б, в), 4(б, в)) и одиночного пика функции обнаружения (рис. 3г, 4г). Отношение абсолютных значений максимумов функций обнаружения (6) показывает, что для источника S_1 пеленги принимают значения: 45.4° , 134.6° , 225.4° , 314.6° , а для источника S_2 — 44.3° , 135.7° , 224.3° , 315.7° .

Эффект фильтрации помехи за пределами полосы расположения фокальных пятен спектрограмм и фурье-образ очищенных интерферограмм представлен на рис. 5, 6. Для источника S_1 нормированные восстановленные интерферограммы $\hat{R}(f, t)$ и $\hat{L}(f, t)$ идентичны. Нормированные интерферограммы $\hat{R}(f, t)$ и $\hat{L}(f, t)$ источника S_2 различаются знаком, т. е. противофазные.

Нормированные интерферограммы $\hat{R}(f)$ и $\hat{L}(f)$, очищенные от помехи, для начального момента времени показаны на рис. 7. Для источника S_1 нормированные интерферограммы идентичны, отношение (7) положительно. Для источника S_2 нормированные интерферограммы смещены на π по фазе, их отношение отрицательно. Исключение составляют значения частот f_* , когда они равны, $\hat{R}(f_*) = \hat{L}(f_*)$. Это позволяет пеленгам первого и второго источников поставить в соответствие первый, третий и второй, четвертый квадранты соответственно.

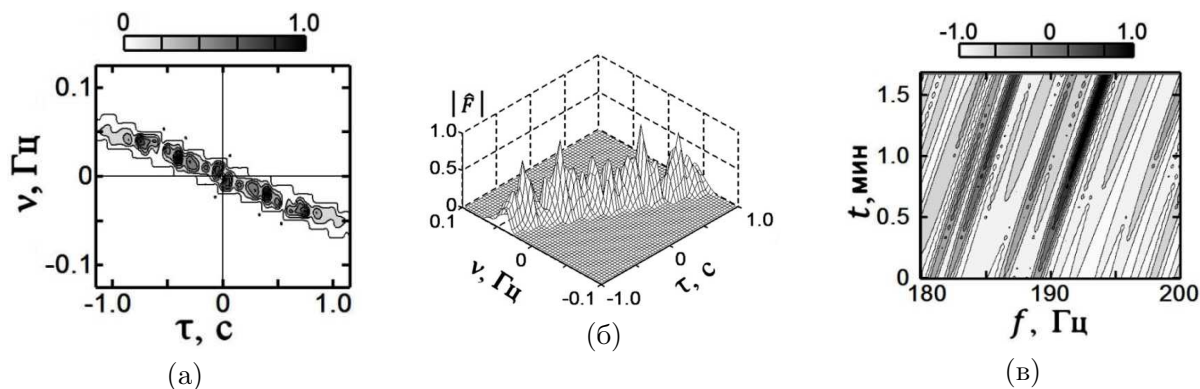


Рис. 5. Нормированная спектрограмма, очищенная от помехи за пределами полосы локализации (а, б); нормированная восстановленная интерферограмма $R(f, t)$ (в). Источник S_1 .

На рис. 8 приведен модуль нормированной взаимокорреляционной функции ВСП $Q_{1,2}$

$$B(\tilde{f}) = \int_{-\infty}^{\infty} u_R(Q_1, f)u_R(Q_2, f + \tilde{f}) df \quad (11)$$

спектров шумовых источников $S_{1,2}$. Для первого источника S_1 максимум приходится на частотный сдвиг $\tilde{f} > 0$, для второго источника S_2 — $\tilde{f} < 0$. В соответствии с правилом знаков первый источник расположен в первом квадранте, а второй источник — во втором квадранте. Таким образом, пеленги оцениваются как $\theta_1 = 45.4^\circ$ и $\theta_2 = 135.7^\circ$, что близко исходным данным $\theta_1 = 45^\circ$ и $\theta_2 = 135^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложен интерферометрический метод пеленгования с использованием двух ВСП, позволяющий однозначно определять направление на источник. В его основе лежит отношение абсолютных значений максимумов функций обнаружений с использованием x -й составляющей колебательной скорости и комбинационной компоненты, равной произведению x -й и y -й составляющих. Правило знаков, основанное на использовании очищенных от помех интерферограмм, позволяет выбрать однозначное направление на источник. Для пеленгования

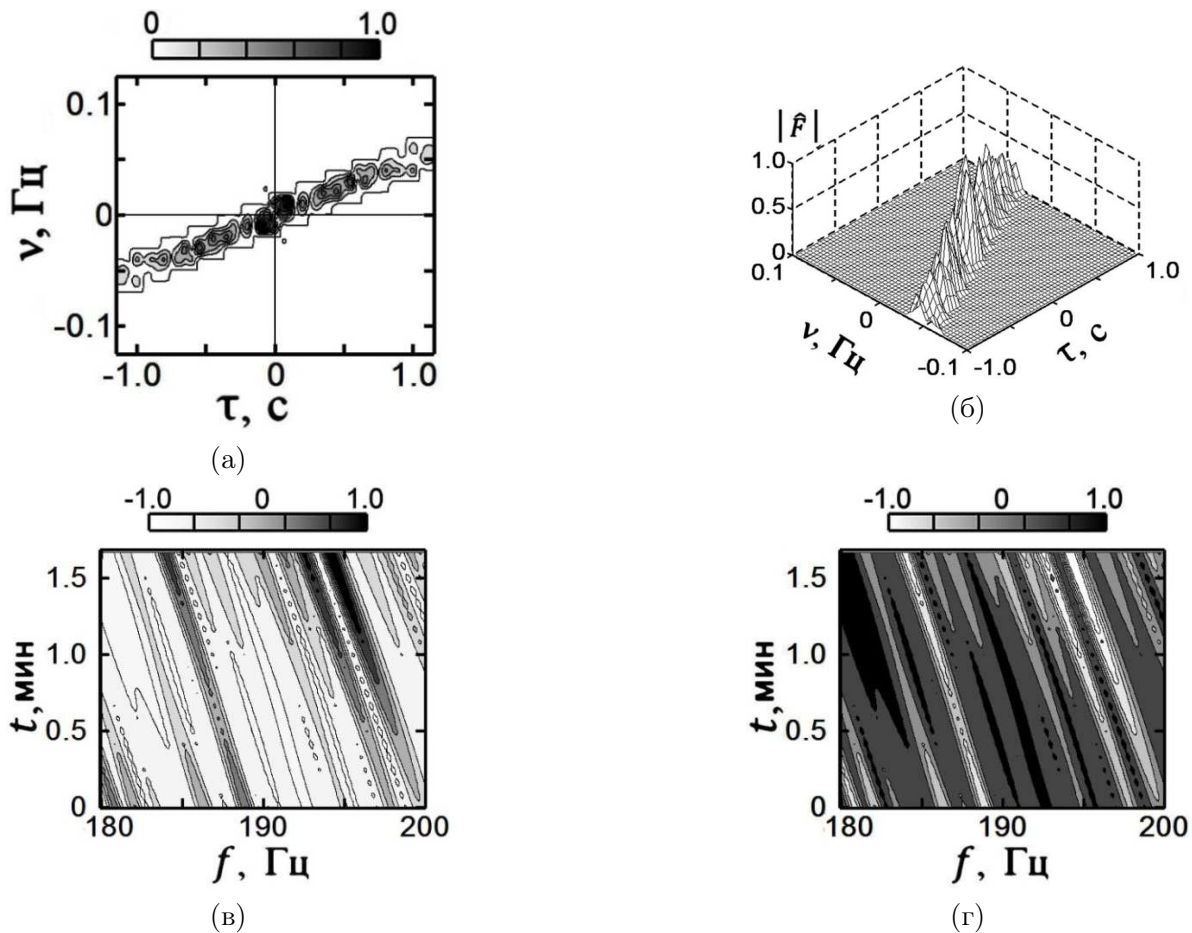


Рис. 6. Нормированная спектрограмма, очищенная от помехи за пределами полосы локализации (а, б); нормированные восстановленные интерферограммы $R(f, t)$ (в) и $L(f, t)$ (г). Источник S_2 .

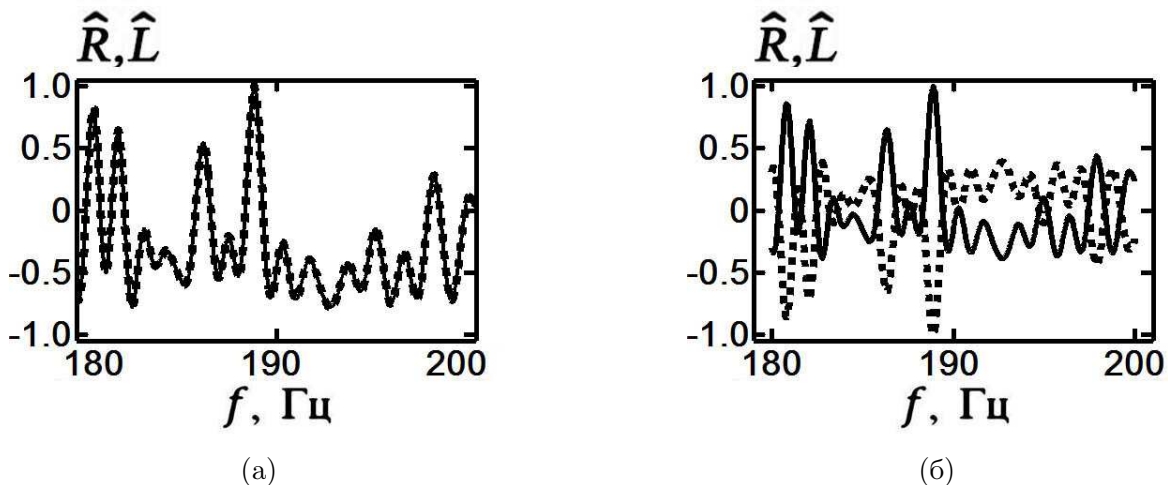


Рис. 7. Очищенные от помехи нормированные интерферограммы источников S_1 (а) и S_2 (б) для момента времени $t = 0$. Сплошная линия – интерферограмма $\hat{R}(f)$, пунктирная линия – $\hat{L}(f)$.

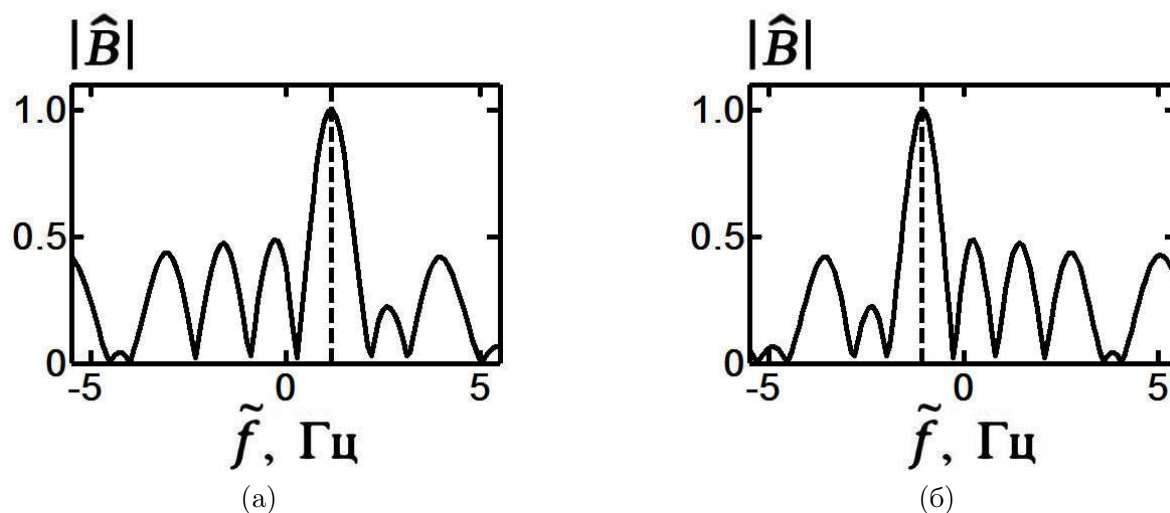


Рис. 8. Нормированная взаимокорреляционная функция: (а) источник S_1 ; (б) источник S_2 .

знаний о характере шумового сигнала источника, распределенной помехи и передаточной функции волновода не требуется. Точность пеленгования ограничена предельным входным отношением с/п.

Работа выполнена в рамках гос. задания темы “Акустика мелкого моря, нелинейная акустическая диагностика, нелинейная динамика волн” (номер гос. регистрации АААА–А18–118021390174–1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко, В. А. Векторно-фазовые методы в акустике / В. А. Гордиенко. — М. : Физматлит, 2007. — 480 с.
2. Щуров, В. А. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море / В. А. Щуров, В. П. Кулешов, А. В. Черкасов // Акуст. журн. — 2011. — Т. 57, № 6. — С. 837–843.
3. Глебова, Г. М. Векторно-скалярные шумовые поля, образованные взволнованной морской поверхностью / Г. М. Глебова, Г. Н. Кузнецов, О. Е. Шимко // Акуст. журн. — 2013. — Т. 59, № 4. — С. 508–519.
4. Белова, Н. И. Экспериментальное исследование интерференционной и фазовой структуры потока мощности от локальных источников в мелком море / Н. И. Белова, Г. Н. Кузнецов, А. Н. Степанов // Акуст. журн. — 2016. — Т. 62, № 3. — С. 318–327.
5. Белов, А. И. Пеленгование и подавление векторно-скалярных сигналов в мелком море с учетом их корреляционной и модовой структуры / А. И. Белов, Г. Н. Кузнецов // Акуст. журн. — 2016. — Т. 62, № 3. — С. 308–317.
6. Чупров, С. Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане / Акустика океана. Современное состояние / С. Д. Чупров. — М. : Наука, 1982. — С. 71–82.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

10. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником / И. В. Казначеев, Г. Н. Кузнецов, В. М. Кузькин, С. А. Пересёлков // Акуст. журн. — 2018. — Т. 64, № 1. — С. 33–45.
11. Определение глубины источника звука в мелком море на фоне интенсивного шума / Т. Н. Беседина, Г. Н. Кузнецов, В. М. Кузькин, С. А. Пересёлков // Акуст. журн. — 2015. — Т. 61, № 6. — С. 718–712.
12. 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.

REFERENCES

1. Gordienko V.A. Vector-phase methods in acoustics. [Gordienko V.A. Vektorno-fazovye metody v akustike]. Moscow: Fizmatlit, 2007, 480 p.
2. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Vortex properties of the acoustic intensity vector in a shallow sea. [Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Vixrevnye svoystva vektora akusticheskoy intensivnosti v melkom more]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2011, vol. 57, no. 6, pp. 837–843.
3. Glebova G.M., Kuznetsov G.N., Shimko O.E. Vector-scalar noise fields formed by an excited sea surface. [Glebova G.M., Kuznetsov G.N., Shimko O.E. Vektorno-skalyarnye shumovye polya, obrazovannye vzvolnovannoy morskoy poverkhnost'yu]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2013, vol. 59, no. 4, pp. 508–519.
4. Belova N.I., Kuznetsov G.N., Stepanov A.N. Experimental research of the interference field phase structure of the power flux from a local source in shallow water. [Belova N.I., Kuznetsov G.N., Stepanov A.N. Eksperimental'noe issledovanie interferencionnoy i fazovoy struktury potoka moshhnosti ot lokal'nykh istochnikov v melkom more]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no. 3, pp. 318–327.
5. Belov A.I., Kuznetsov G.N. Direction finding and suppression of vector-scalar sound signals in shallow water taking into account their correlation and mode structure. [Belov A.I., Kuznetsov G.N. Pelengovanie i podavlenie vektorno-skalyarnykh signalov v melkom more s uchetom ik korrelyacionnoy i modovoy struktury]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no. 3, pp. 308–317.
6. Chuprov S.D. Interference structure of sound in a layered ocean. Ocean acoustics. Current State. [Chuprov S.D. Interferencionnaya struktura zvukovogo polya v sloistom okeane. Akustika okeana. Sovremennoe sostoyanie]. Moscow: Nauka, 1982, pp. 71–82.
7. 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.
8. 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.
9. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. Spectrogram and localization of a sound in shallow water. [Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. Spektrogramma i lokalizaciya istochnika zvuka v melkom more]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2017, vol. 63, no. 4, pp. 406–418.
10. 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., Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. Interferometricheskij metod obnaruzheniya dvizhushhegosya istochnika zvuka vektorno-skalyarnym priemnikom]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2018, vol. 64, no. 1, pp. 33–45.

11. Besedina T.N., Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. Determining the depth of a sound source in shallow water against intense background noise. [Besedina T.N., Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. Opredelenie glubiny istochnika zvuka v melkom more na fone intensivnogo shuma]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2015, vol. 61, no. 6, pp. 718–712.

12. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Prosovetskiy D.Yu. Wave method for estimating the sound source depth in a oceanic waveguide. *Phys. Wave Phenom.* 2016, vol. 24, no. 4, pp. 310–316.

Кузькин Венедикт Михайлович, главный научный сотрудник, НЦВИ ИОФ РАН, Москва, Россия

E-mail: kumiov@yandex.ru

Тел.: +7(499)503-83-84

Kuz'kin Venedikt Mikhailovich, chief researcher, Wave Research Center, GPI RAS, Moscow, Russia

E-mail: kumiov@yandex.ru

Tel.: +7(499)503-83-84

Пересёлков Сергей Алексеевич, профессор кафедры математической физики ВГУ, Воронеж, Россия

E-mail: pereselkov@yandex.ru

Тел.: +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

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

Ткаченко Сергей Александрович, аспирант кафедры математической физики ВГУ, Воронеж, Россия

E-mail: sega-tk@mail.ru

Тел.: +7(473)220-87-48

Tkachenko Sergey Alexanderovich, Postgraduate Student of the Department of Mathematical Physics, Voronezh State University, Voronezh, Russia

E-mail: sega-tk@mail.ru

Tel.: +7(473)220-87-48