# ПРИМЕНЕНИЕ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОГО ПРИЕМНИКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕЛЕНГА ИСТОЧНИКА ШУМА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

### С. А. Пересёлков, И. В. Казначеев, С. А. Ткаченко

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 29.09.2017 г.

Аннотация. Изложен интерферометрический метод пеленгования широкополосного источника звука в океаническом волноводе с применением одиночного векторноскалярного приемника, основанный на двукратном преобразовании Фурье интерференционной картины, формируемой во время движения. По результатам натурного эксперимента проведено сравнение эффективности пеленгования предлагаемым методом с методом, использующим измерение времен задержек сигналов, приходящих на разнесенные скалярные приемники. Рассмотрена помехоустойчивость интерференционного метода пеленгования.

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

# USING OF VECTOR-SCALAR RECEIVER FOR ESTIMATION OF NOISE SOURCE DIRECTION BY INTERFEROMETRIC METHOD

### S. A. Pereselkov, I. V. Kaznacheev, S. A. Tkachenko

**Abstract**. The interferometric method of estimation of broadband sound source direction in an ocean waveguide by using of vector-scalar receiver is presented in the paper. The offered method is based on a double Fourier transform of the interference pattern generated during the movement of sound source. Within framework of experimental data the comparative analysis interferometric method estimation of source direction and method based on time delays of signals of scalar receivers is carried out. The noise immunity of interference method of direction estimation is considered.

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

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Необходимость создания нового поколения средств измерений, расширяющих возможности обработки гидроакустических сигналов за счет более полного извлечения информации из каждой точки поля привело к разработке векторно-скалярных приемников (ВСП) [1]. Они позволяют анализировать четырехмерные характеристики поля (давление P, составляющие колебательной скорости частиц  $V_{x,y,z}$ ) и их комбинации, в частности, поток мощности, что может способствовать повышению помехоустойчивости и выполнению пеленгования источника. Важные результаты с применением ВСП отражены, в частности, в работах [2–7].

На настоящий момент классические алгоритмы обработки сигналов, основанные на согласовании со средой (см., например, обзоры [8–10]) достигли предельных возможностей и не позволяют решать задачи идентификации малошумных источников. Основные факторы,

<sup>©</sup> Пересёлков С. А., Казначеев И. В., Ткаченко С. А., 2017

ограничивающие возможности такой обработки: a) рассогласование между модельным и реальным океаническими волноводами; б) низкая помехоустойчивость. Даже в условиях, когда удается компенсировать рассогласование, алгоритмы теряют эффективность при малом входном отношении сигнал/помеха (с/п).

Поэтому требуется разработка более эффективных методов обработки сигналов. Одним из них является интерферометрический метод, основанный на двукратном преобразовании Фурье интерференционной картины, формируемой движущимся источником [11]. Сочетание предложенного метода с алгоритмом оценки глубины [12, 13], использующим информацию отношения амплитуд соседних мод, позволяет, располагая одиночным приемником, с высокой помехоустойчивостью и малой чувствительностью к вариациям параметров волновода решать комплексную задачу по обнаружению, определению радиальной скорости, начального удаления и глубины источника. При использовании многоэлементных антенн, естественно, помехоустойчивость метода возрастает. Условия применимости метода и его экспериментальная проверка при использовании ВСП и различных видов спектра сигнала (детерминированный, случайный) разобраны в [11, 14, 15].

В настоящей работе рассмотрено пеленгование источника с применением одиночного ВСП, используя интерферометрический метод. По результатам натурного эксперимента выполнено сравнение точности определения пеленга предлагаемым методом со стандартным методом, основанным на измерении времен задержек широкополосных сигналов по скалярной компоненте поля (давления), приходящих на разнесенные ВСП. Рассмотрена помехоустойчивость метода пеленгования на фоне изотропной внешней помехи.

### 2. МЕТОДЫ ПЕЛЕНГАЦИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА

Волновод считается горизонтально-однородным. Геометрия задачи показана на рис. 1 (вид сверху). ВСП  $Q_1$  и  $Q_2$  расположены на оси абсцисс, в начале координат размещен  $Q_1$ . Оси x ВСП совпадают с положительным направлением абсциссы системы координат. Горизонтальное расстояние r между источником и ВСП много больше расстояния d между ними, r >> d. Положение источника на момент времени  $t_i$  обозначено  $S_i$ , а расстояния до ВСП  $Q_1$  и  $Q_2 - r_{i1}$  и  $r_{i2}$  соответственно. Азимутальный угол направления на источник в момент времени  $t_i - \theta_i$ . Источник движется со скоростью v.

### 2.1. Интерферометрический метод

Положим, что в рассматриваемой полосе частот характерный частотный масштаб изменения модуля квадрата спектра сигнала много больше характерного масштаба квадрата модуля







Рис. 2. Схема эксперимента.

передаточной функции. Для шумового источника выполнение этого условия следует понимать по отношению к средней величине модуля квадрата спектра сигнала. В этом случае, как показано в [14, 15], применим интерферометрический метод [11], разработанный применительно к равномерному (постоянному) спектру источника.

При использовании одиночного ВСП азимутальный угол  $\theta_i$  определяется как [1]

$$\theta_i = \operatorname{arctg} \frac{|V_y(t_i)|}{|V_x(t_i)|}.$$
(1)

Алгоритм (1), как любой другой алгоритм без пространственно-временного когерентного накопления сигнала, имеет низкую помехоустойчивость. Для повышения помехоустойчивости пеленгования следует перейти к спектрограммам составляющих  $V_x$  и  $V_y$  колебательной скорости в горизонтальной плоскости (x, y), при формировании которых реализуется когерентное траекторное накопление спектральных максимумов вдоль интерференционных полос (траекторное накопление) [11].

Составляющую колебательной скорости  $V_x$  запишем в виде суммы мод дискретного спектра [15]

$$V_x = \frac{\cos\theta}{\rho\omega} \sum_m A_m h_m(\omega) \exp\left[ih_m(\omega)r\right].$$
 (2)

Здесь  $A_m$  и  $h_m$  — амплитуда и постоянная распространения *m*-й моды,  $\omega = 2\pi f$  — циклическая частота, r — горизонтальное расстояние между источником и приемником. Цилиндрическое расхождение поля, модальное затухание и глубины расположения источника  $z_s$ и приемника  $z_q$  учитываются амплитудной зависимостью мод. Аргументы у амплитуд мод и постоянный множитель, характеризующий спектр, опущены. Выражение для составляющей  $V_y$  получается из (2) заменой  $\cos \theta$  на  $\sin \theta$ . От переменной r перейдем к переменной  $t, r = v(t - t_0) + r_0$ , где  $r_0$  — расстояние между источником и приемником в начальный момент времени  $t = t_0$ . К интерферограммам  $I_{V_{x,y}}(\omega,t) = |V_{x,y}(\omega,t)|^2$  применим двукратное преобразование Фурье

$$F_{V_{x,y}}\left(\widetilde{\nu},\tau\right) = \int_{0}^{\Delta t} \int_{\omega_0 - \frac{\Delta \omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta \omega}{2}} I_{V_{x,y}}\left(\omega,t\right) \exp\left[i\left(\widetilde{\nu}t - \omega\tau\right)\right] v_r dt d\omega.$$
(3)

Здесь  $\tilde{\nu} = 2\pi\nu = v_r\kappa, \kappa$  и  $\tau$  — циклическая частота, пространственная частота и время спектрограммы соответственно;  $v_r = v \cos \varphi$  — радиальная скорость источника,  $\varphi$  — угол между направлением на приемник и вектором скорости **v** источника в горизонтальной плоскости;  $\Delta \omega$  — ширина спектра источника,  $-(\Delta \omega/2) + \omega_0 \leqslant \omega \leqslant \omega_0 + (\Delta \omega/2), \Delta t$  — время траекторного накопления. Картина распределения спектральной плотности  $F_{V_{x,y}}(\tau, \tilde{\nu})$  трактуется как спектрограмма интерферограммы  $I_{V_{x,y}}(\omega,t)$ . Спектральная плотность (3) локализована в двух областях плоскости  $(\tau, \tilde{\nu})$ , симметрично расположенных относительно начала координат. Она расположена в первом и третьем квадратах, если радиальная скорость  $v_r < 0$ , т. е. источник приближается к приемнику и во втором и четвертом квадратах, если  $v_r > 0$ , когда источник удаляется от приемника. Спектральная плотность содержит (М – 1) главных максимумов с координатами  $(\tau_{\mu}, \tilde{\nu}_{\mu})$ , расположенными на прямой с угловым коэффициентом  $\tilde{\varepsilon}$ . Здесь M – число мод, формирующих поле,  $\mu = \overline{1, M - 1}$ . Максимальный пик, обусловленный интерференцией соседних мод, расположен в точке  $(\tau_1, \tilde{\nu}_1)$ . Координаты второго по величине пика, вызванного интерференцией мод номеров  $(m, m+2), -(\tau_2, \tilde{\nu}_2)$  и т. д. И, наконец, координаты наименьшего по величине максимума, порожденного интерференцией первой и последней моды —  $(\tau_{M-1}, \tilde{\nu}_{M-1})$ . По измеренным координатам  $\tau_1$  и  $\tilde{\nu}_1$  оцениваются начальное расстояние  $r_0$  и радиальная скорость  $v_r$  [11].

Угловые коэффициенты прямолинейных интерференционных полос интерферограммы и прямой расположения главных максимумов спектрограммы связаны соотношением  $\tilde{\varepsilon} = -\delta\omega/\delta t$ , где  $\delta\omega$  — частотный сдвиг интерференционных максимумов за время  $\delta t$ . В общем случае, когда интерференционные полосы искривлены, под эффективным угловым коэффициентом  $\delta\omega/\delta t$  следует понимать направление, вдоль которого траекторное накопление обеспечивает максимальную интенсивность сигнала.

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

$$P_{V_r}\left[\varepsilon_*\left(q\right)\right] = \int_{0}^{\tau_{\max}} |F_{V_r}\left[\tau\left(q\right), \nu\left(\tau\left(q\right)\right)\right]| \sqrt{1 + \varepsilon_*^2\left(q\right)} d\tau, \tag{4}$$

определяющего угловой коэффициент  $\varepsilon$  прямой  $\nu = \varepsilon \tau$ , на которой расположены главные максимумы спектрограммы интерферограммы  $I_{V_r} = |V_r|^2$  при входном отношении с/п q. Здесь  $|V_r|^2 = |V_x|^2 + |V_y|^2$ ;  $\tau_{max} \ge \tau_{M-1}$ ;  $\varepsilon_*$  — варьируемое значение углового коэффициента  $\varepsilon = \tilde{\varepsilon}/2\pi$ . За оценку  $\varepsilon(q)$  принимается положение главного максимума, max  $P_{V_r}[\varepsilon_*(q)] = P_{V_r}[\varepsilon(q)]$ . Разумеется, такого рода критерий обнаружения источника не является скольконибудь универсальным. Общая постановка задачи должна оценивать вероятностные характеристики обнаружения. Функцию (4) назовем функцией обнаружения.

Азимутальный угол оценивается как отношение максимальных пиков спектрограмм

$$tg^{2}\theta = \frac{|F_{V_{y}}(\tau_{1},\nu_{1})|}{|F_{V_{x}}(\tau_{1},\nu_{1})|}.$$
(5)

Алгоритм (5) оценивает направление на источник в начальный момент времени траекторного накопления. Данное положение является особенностью интерферометрического метода измерений характеристик движущегося источника [11]. Для отслеживания плавного изменения азимутального угла следует использовать каскадное траекторное накопление. В начальный момент времени  $t_0 = 0$  осуществляется траекторное накопление в течение времени  $\Delta t$ . Далее в момент времени  $t_1 = t_0 + \delta t$  проводится следующее траекторное накопление в течение времени  $\Delta t$  и т. д. В результате за время наблюдения T получаем  $N = [(T - \Delta t)/\delta t] + 1$  число отсчетов азимутального угла. Благодаря каскадному траекторному накоплению каждая спектрограмма содержит информацию о пеленге, радиальной скорости и удаленности источника в разные моменты времени. Для обнаружения (4) и пеленгования (5) источника знание характеристик океанической среды не требуется.

Алгоритму (5) свойственна неоднозначность определения направления на источник. Для ее устранения следует применить интерферометрический метод, т. е. построение спектрограмм (3), к двум ВСП  $Q_1$ ,  $Q_2$  (рис. 1) и воспользоваться знаком разности временных положений максимальных пиков

$$\Delta \tau_1 = \tau_1 (Q_1) - \tau_1 (Q_2).$$
(6)

При  $\Delta \tau_1 < 0$  источник приближается (удаляется) со стороны ВСП  $Q_1$  (ВСП  $Q_2$ ). И наоборот, если  $\Delta \tau_1 > 0$ , то источник приближается (удаляется) со стороны ВСП  $Q_2$  (ВСП  $Q_1$ ). Приближение или удаление от источника, как отмечалось выше, определяется местоположением спектральной плотности на спектрограмме. Но даже и в этом случае сохраняется неопределенность в направлении на источник: перемещается источник слева или справа от оси *x*. Для ее устранения необходим третий ВСП  $Q_3$ , расположенный не на оси *x*, и применить правило знака (6) по отношению к ВСП  $Q_1, Q_3$  или  $Q_2, Q_3$ . Применение векторно-скалярного приемника для оценки пеленга источника шума...

#### 2.2. Метод временных задержек

Стандартный метод пеленгования источника основан на измерении времен задержек широкополосных сигналов, принимаемых двумя разнесенными ВСП по скалярной компоненте поля

$$\theta_i = \arccos\left[\delta t_*\left(t_i\right) u_{\rm ef}/d\right],\tag{7}$$

где  $\delta t_*(t_i)$  — временная задержка в момент времени  $t_i$ , обусловленная разностью хода от источника до ВСП  $Q_1$  и  $Q_2$  (рис. 1);  $u_{ef}$  — эффективная групповая скорость. Данный метод, в отличие от предыдущего, содержит неизвестную величину  $u_{ef}$ , подлежащую нахождению, и ему также свойственна неоднозначность направления на источник относительно оси расположения приемников. Для регистрации временной задержки  $\delta t_*(t_i)$  используется обработка, заключающаяся в определении положения максимума взаимокорреляционной функции сигналов  $s_{Q_{1,2}}$ , принимаемых ВСП  $Q_1$  и  $Q_2$ 

$$G\left(\delta t, t_{i}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{Q_{1}}\left(t, t_{i}\right) s_{Q_{2}}\left(t + \delta t, t_{i}\right) dt, \quad \max G\left(\delta t, t_{i}\right) = G\left(\delta t_{*}, t_{i}\right).$$

$$(8)$$

По данным натурного эксперимента оценим эффективность интерферометрического метода пеленгования, сравнив его с методом временных задержек.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился в акватории Тихоокеанского шельфа: глубина  $H \cong 53$  м, скорость звука  $c \cong 1474$  м/с [5, 6]. Источником звука являлся буксируемый на глубине  $z_s \cong 15$  м пневматический излучатель. Скорость буксировки  $v \cong 1.7$  м/с. Излучаемый сигнал контролировался гидрофоном, расположенным на расстоянии 2 м от излучателя. Прием сигналов осуществлялся на четыре стационарные четырехкомпонентные ВСП, включающие каналы измерения давления и три проекции колебательной скорости частиц. При обработке использовались измерения двух ВСП, расположенных на глубине  $z_q \cong 52$  м и разнесенных между собой на расстояние  $d \cong 100$  м. Сигналы анализировались в полосе  $\Delta f = 180 - 220$  Гц. Для анализа получаемых результатов значения колебательных скоростей  $V_{x,y}$  приводились к эквивалентным единицам звукового давления, которые обозначены как  $U_{x,y}$ . Во время эксперимента амплитуда излучаемых импульсов по техническим причинам изменялась. В целях сохранения контрастности интерференционной картины, при обработке для каждой посылки излучения проводилась нормировка амплитуды импульсов к одной и той же величине.

Схема движения буксируемого пневмоисточника и расположение двух применяемых ВСП  $Q_1$  и  $Q_2$  изображена на рис. 2 (вид сверху). Из начальной т. А источник перемещался по дуге окружности радиуса  $r_0 \cong 11$  км до т. В. Точка А располагалась примерно в направлении оси y ВСП  $Q_1$ . Из т. В источник приближался к ВСП по прямолинейной траектории до т. С, расположенной вблизи приемной системы, в которой он разворачивался и по прямолинейной траектории удалялся от ВСП в конечную т. D. Расстояние т. С до оси x составляло  $r \cong 1$  км. На максимальном удалении источника от ВСП (дуга окружности) входное отношение с/п (по мощности)  $q \cong 25.5$ .

Для различных характерных областей движения источника представлена лишь динамика интерферограммы (2) и спектрограммы (3) колебательной скорости  $U_x$ . С целью повышения контрастности и информативности на интерферограммах вырезаны средние значения. Для составляющей  $U_y$  картина распределения спектральной плотности подобна компоненте  $U_x$  и не приводится. При движении по дуге окружности: периодичность излучения  $\delta T = 1$  мин, задержка времени при каскадном траекторном накоплении  $\delta t = 5$  мин. При движении в ради-

альных направлениях: периодичность излучения  $\delta T = 30$  с, задержка времени при каскадном траекторном накоплении  $\delta t = 2.5$  мин.

Для условий натурного эксперимента результаты обработки приведены на рис. 3–8. Нормированные величины обозначены сверху знаком "крышка".



Рис. 3. Нормированные интерферограмма (a), спектрограмма (б, в) и функция обнаружения (г). Движение по дуге окружности.

Картина интерференционных полос (рис. 3(а)) показывает, что траектория источника была несколько отлична от движения по дуге окружности относительно ВСП, так как при таком движении интерференционные полосы локализованы вдоль вертикальных линий. В тоже время расположение главных максимумов спектральной плотности на оси времени (рис. 3(б, в)) показывает, что радиальная скорость источника равна нулю. Об этом свидетельствует и положение максимума функции обнаружения (рис. 3(в)). Наличие двух максимумов спектрограммы (рис. 3(б, в)) указывает на то, что поле формировалось тремя модами. Отметим, что для неподвижного источника и при движении по дуге окружности интерферограммы и спектрограммы идентичны. Для оценки радиуса  $r_0$  обратимся к формуле (12) [11], положив радиальную скорость  $v_r = 0$ . Тогда приходим к выражению

$$r_0 = \frac{2\tau_1}{(1/u_3) - (1/u_1)},\tag{9}$$

где  $u_i$  — групповая скорость *i*-й моды. Как следует из рис. 36,  $\tau_1 = 0.073$  с. Для условий эксперимента, согласно данным [11], на опорной частоте  $f_0 = 200$  Гц групповые скорости  $u_1 = 1467.0$  м/с,  $u_3 = 1438.4$  м/с. В результате получаем  $r_0 = 10.8$  км.



При движении по дуге окружности зависимость пеленга  $\vartheta$  от времени t приведена на рис. 4. Здесь и далее под пеленгом понимается угол, дополнительный к азимутальному углу  $\theta$ ,  $\vartheta = 90^{\circ} - \theta$ . При оценке пеленга методом временных задержек (7) в качестве эффективной групповой скорости принята групповая скорость первой моды, как наиболее энергонесущая,  $u_{ef} = 1467.0$  м/с. Как видно, рассмотренные методы дают практически равные значения угла, что демонстрирует работоспособность интерферометрического метода пеленгования источника (5). Скорость источника оценивается как

$$v = r_0 \Delta \vartheta / \Delta T, \tag{10}$$

Рис. 4. Пеленгование источника: точки — интерференционный метод, сплошная линия метод временных задержек. Движение по дуге окружности.

где  $\Delta \vartheta$  — изменение пеленга (в радианах) за время наблюдения  $\Delta T$ . Принимая  $r_0 =$ 10.8 км и воспользовавшись зависимостью  $\vartheta(t)$ , получаем v = 1.9 м/с.

Интерференционная картина поля при переходе от движения по дуге окружности в направлении ВСП представлена на рис. 5. Наблюдается излом (скачкообразное изменение угла наклона) интерференционных полос (рис. 5(а)) в момент времени  $t_i \cong 5$  мин, соответствующий развороту источника в окрестности т. В (рис. 2). Вид спектрограммы (рис. 5(б, в)) и функции обнаружения (рис. 5(г)) показывают, что во время разворота радиальная скорость источника отлична от нуля.

Координаты основного максимума спектрограммы:  $\tau_1 = 1.0739$  с,  $\nu_1 = 0.00154$  Гц. Положение максимума функции обнаружения  $\varepsilon_* = 0.0208$  с<sup>-2</sup>. Для условий эксперимента на опорной частоте  $f_0 = 200$  Гц постоянные распространения  $h_1 = 0.8488$  м<sup>-1</sup>,  $h_3 = 0.8234$  м<sup>-1</sup>, интерференционный инвариант  $\beta = 1.2$  [11]. Принимая значение частоты интерференционного максимума  $f_1 = 210$  Гц, отвечающее моменту времени  $t_i \cong 5$  мин (рис. 5(a)), для радиальной скорости источника и его удаленности от ВСП при развороте находим  $v_r = -0.95$  м/с, r = 11.6 км ([11], формулы (29), (32)).

На рис. 6 приведены интерферограмма, спектрограмма и функция обнаружения при приближении (удаления) источника к (от) ВСП. Интерферограммы (рис. 6(а, д)) состоят из прямолинейных локализованных полос, что отображает постоянство направления движения и скорости источника. Угловые коэффициенты интерференционных полос противоположны по знаку.

Спектрограммы, по сравнению со случаем движения источника по дуге окружности, обогащены главными максимумами, указывающими на возрастание числа мод, формирующих поле. При приближении источника к ВСП координаты положения основного максимума  $\tau_1 = 0.0623$  с,  $\nu_1 = 0.00278$  Гц (рис. 6(б)), положение максимума функции обнаружения  $\varepsilon_* = 0.0446$  с<sup>-2</sup> (рис. 6(г)). При удалении источника от ВСП –  $\tau_1 = 0.0611$  с,  $\nu_1 = 0.00336$  Гц (рис. 6(е)),  $\varepsilon_* = -0.0550$  с<sup>-2</sup> (рис. 6(з)). В результате для оценок радиальной скорости и удаленности источника получаем: при приближении  $v_r = -1.7$  м/с, r = 10.1 км, при удалении  $v_r = 2.1$  м/с, r = 8.1 км ([11], формулы (29), (32)). Отношение угловых коэффициентов прямых, на которых расположены координаты главных максимумов спектрограмм равно отношению радиальных скоростей источника,  $\gamma = -0.550/0.0446 = -2.1/1.7 = -1.23$ , как и следовало ожидать.



Рис. 5. Нормированные интерферограмма (а), спектрограмма (б, в) и функция обнаружения (г). Область перехода от движения по дуге окружности к прямолинейному движению в направлении ВСП.



Рис. 6. Нормированные интерферограммы (a, d), спектрограммы (б, в, е, ж) и функция обнаружения (г, з). Приближение источника к ВСП: (a-г), удаление источника от ВСП: (d-з).



Рис. 7. Нормированные интерферограмма (а), спектрограмма (б, в) и функция обнаружения (г) в окрестности расположения ВСП.

При развороте источника вблизи ВСП интерференционная картина представлена на рис. 7. В момент времени  $t_i \cong 5$  мин (рис. 7(а)) менялся знак радиальной скорости и источник находился на минимальном расстоянии от приемной системы (рис. 2, т. С). Очевидно, интерферограмма представляет собой интерференционные полосы, приближенные к параболам, вершины которых расположены на горизонтальной прямой с координатой  $t \cong 5$  мин (эта картина заметна при увеличении времени наблюдения). Из общих соображений ясно, что направление максимального накопления спектральных максимумов соответствует горизонтальным прямым, т. е. эффективный угловой коэффициент интерференционных полос  $\delta f/\delta t = \infty$ . Наиболее ярко этот эффект проявляется на спектрограмме (рис. 7(б, в)), на которой главные максимумы спектральной плотности расположены на оси частоты. В этом случае угловой коэффициент прямой  $\varepsilon_* = \infty$ , что согласуется с положением максимума функции обнаружения (рис. 7(г)). Положение основного максимума спектрограммы оценивается как  $\nu_1 = 0.00222$  Гц и для радиальной скорости источника находим  $v_r = 1.4$  м/с ([16], формула (29)). Полагая теперь  $\tau_1 = 0$  и  $t_{mn} = 10$  мин, из формулы (12) [16] для минимального удаления источника от ВСП получаем оценку r = 0.84 км.



Рис. 8. Пеленгование источника: точки интерференционный метод, сплошная линия — метод временных задержек. Движение в окрестности расположения ВСП.

Рис. 3(а, б), рис. 5(а, б), рис. 6(а, б, д, е) и рис. 7(а, б) показывают, как расплываются фокальные пятна при изменении вида траектории. Наименьшие размеры фокальное пятно имеет при движении источника по окружности и по прямолинейной траектории, когда кривизна полос неизменна. В тоже время, при переходе от движения по дуге окружности к прямолинейному движению или при изгибе прямолинейной траектории область локализации спектральной плотности расширяется.

При движении в окрестности расположения ВСП зависимость пеленга от времени приведена на рис. 8. Положительные значения углов относятся к приближению источника к ВСП, отрицательные — к удалению. Как видно, пеленги, измеренные двумя различными методами близки между собой. По сравнению со случаем движения по дуге окружности (рис. 4) наблюдается усиление флуктуаций пеленга, регистрируемого мето-

дом временных задержек, по отношению к интерферометрическому методу. Это объясняется увеличением числа мод, формирующих поле источника, что приводит к изменению числа энергонесущих мод.

# 4. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО МЕТОДА ПЕЛЕНГОВАНИЯ

Для проверки помехоустойчивости интерферометрического метода пеленгования при обработке экспериментальных данных добавлялась изотропная помеха. На максимальном удалении источника от ВСП отношение с/п  $q \cong 10^{-3}$ , так что уровень помехи возрос в 39.2 раз. Это значение отвечает предельному входному отношению с/п, при котором достигается устойчивое обнаружение и оценки движущегося источника близки реальным [11]. Результаты обработки приведены на рис. 9–11.



Рис. 9. Нормированные интерферограмма (а), спектрограмма (б, в) и функция обнаружения (г). Движение по дуге окружности. Добавлена помеха.

Интерференционные картины поля при движении источника по дуге окружности и в радиальных направлениях при приближении и удалении от ВСП приведены на рис. 9, 10. Введение дополнительной помехи приводит к хаотическим интерферограммам (рис. 9(а), рис. 10(а, б)), не позволяющим наблюдать интерференционные полосы. На спектрограммах (рис. 9(б, в), рис. 10(б, в), е, ж)) увеличивается уровень помехи, однако главные максимумы отчетливо видны и их положения практически не смещаются. На кривых обнаружения (рис. 9(г), рис. 10(г, з)) преобладает один пик, обусловленный сигналом источника. При движении по дуге окружности: положение главного максимума  $\tau_1 = 0.072$  с, положение максимума функции обнаружения  $\varepsilon_* = 0$ . При приближении источника к ВСП  $\tau_1 = 0.0624$  с,  $\nu_1 = 0.00281$  Гц,  $\varepsilon_* = 0.0450$  с<sup>-2</sup>; при удалении —  $\tau_1 = 0.0610$  с,  $\nu_1 = 0.00336$  Гц,  $\varepsilon_* = 0.0551$  с<sup>-2</sup>.

Зависимости пеленга от времени при движении по дуге окружности и в области разворота вблизи ВСП показаны на рис. 11 (точки). Там же для сравнения сплошной линией представлены временные зависимости пеленга методом временных задержек, полученные для условий эксперимента. Как видно, интерферометрический метод демонстрирует устойчивое пеленгование при малом отношении с/п (см. рис. 4, 8).

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием ВСП изложен интерферометрический метод пеленгования, основанный на отношении максимальных пиков спектрограмм для горизонтальных компонент колебательной скорости. Координаты максимального пика спектрограммы (по одной из компонент колебательной скорости) позволяют провести обнаружение источника, оценить его радиальную скорость и удаление от приемника. Метод апробирован на данных натурного эксперимента. Он обеспечивает такую же точность измерения пеленгов, что и стандартный метод,



Рис. 10. Нормированные интерферограммы (a, d), спектрограммы (б, в, е, ж) и функции обнаружения (г, з). Приближение источника к ВСП: (a)-(г), удаление источника от ВСП: (d)-(з). Добавлена помеха.



Рис. 11. Пеленгование источника: (a) движение по дуге окружности, (б) движение в окрестности расположения ВСП. Точки — интерференционный метод (добавлена помеха), сплошная линия — метод временных задержек (для условий эксперимента).

основанный на измерении времен задержек сигналов, принимаемых разнесенными приемниками. Продемонстрированы возможности пеленгования при предельно малом отношении с/п, когда еще возможно обнаружение источника и его идентификация.

Интерферограмма дает возможность визуального наблюдения картины траектории источника при достаточно большом отношении с/п, тогда как спектрограмма позволяет получать количественные параметры траектории при малых отношениях с/п. Это свойство обусловлено когерентным траекторным накоплением спектральных максимумов вдоль интерференционных полос даже в условиях скачкообразного изменения кривизны полос.

Если двукратное преобразование Фурье рассматривать как технологию записи интерференционной картины, т.е. как голографию, то получаемую в результате спектрограмму можно трактовать как голограмму, на которой в закодированной форме записана вся информация об источнике. Таким образом, данный метод можно рассматривать одним из направлений применения голографической интерферометрии в гидроакустике.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко, В. А. Векторно-фазовые методы в акустике / В. А. Гордиенко. — М. : Физматлит, 2007. — 480 с.

2. Vector sensors and vector sensor line arrays: Comments on optimal array gain and detection / G. L. D'Spain, J. C. Luby, G. R. Wilson, R. A. Gramann // J. Acoust. Soc. Am. -2006. - V. 120, Nº 1. - P. 171–185.

3. О помехоустойчивости приемника, регистрирующего поток акустической мощности / В. А. Гордиенко, Е. Л. Гордиенко, Н. В. Краснописцев, В. Н. Некрасов // Акуст. журн. — 2008. — Т. 54, № 5. — С. 774–785.

4. 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.

5. Белов, А. И. Оценка акустических характеристик поверхностных слоев морского дна с использованием четырехкомпонентных векторно-скалярных приемников / А. И. Белов, Г. Н. Кузнецов // Акуст. журн. — 2016. — Т. 62, № 2. — С. 194–202.

6. Белова, Н. И. Экспериментальное исследование интерференционной и фазовой структу-

ры 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.

7. 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.

8. Ianniello, J. P. Recent developments is sonar signal processing / J. P. Ianniello // IEEE Signal. Process. Mag. -1998. - V. 15, Nº 4. - P. 27-40.

9. Малышкин, Г. С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов / Г. С. Малышкин, Г. Б. Сидельников // Акуст. журн. — 2014. — Т. 60, № 5. — С. 526–545.

10. 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.

11. 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.

12. Estimation of the depth of a stationary sound source in shallow water / T. N. Besedina et. al. // Phys. Wave Phenom. -2015. - V. 23, Nº 4. - P. 292–303.

13. Wave method for estimating the sound source depth in a 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.

14. Noise source localization shallow water / G. N. Kuznetso, V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, I. V. Kaznachheev // J. Phys. Wave Phenom. — 2017. — V. 25, № 2. — P. 156–163.

15. 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, I. V. Kaznachheev // J. Phys. Wave Phenom. -2017. - V. 25, Nº 4. - P.

### REFERENCES

1. Gordienko V.A. Acoustic vector-phase methods. [Gordienko V.A. Vektorno-fazovye metody v akustike]. Moscow, 2007, 480 p.

2. D'Spain G.L., Luby J.C., Wilson G.R., Gramann R.A. Vector Sensors and Vector Sensor Line Arrays: Comments on Optimal Array Gain and Detection. J. Acoust. Soc. Am., 2006, vol. 120, no. 1, pp. 171–185.

3. Gordienko V.A., Gordienko E.L., Krasnopistsov N.V., Nekrasov V.N. Interference Immunity of Hydroacoustic Power Flux Receive Systems. [Gordienko V.A., Gordienko E.L., Krasnopiscev N.V., Nekrasov V.N. O pomexoustojchivosti priemnika, registriruyushhego potok akusticheskoj moshhnosti]. Akusticheskij zhurnal – Acoustical Physics, 2008, vol. 54, no. 5, pp. 774– 785.

4. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Vortex Properties of the Acoustic Intensity Vector in a Shallow Sea. [Shhurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Vixrevye svojstva vektora akusticheskoj intensivnosti v melkom more]. Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics, 2011, vol. 57, no. 6, pp. 837–843.

5. Belov A.I., Kuznetsov G.N. Estimating the Acoustic Characteristics of Surface Layers of the Sea Bottom Using Four-Component Vector-Scalar Receivers. [Belov A.I., Kuznecov G.N. Ocenka akusticheskix xarakteristik poverxnostnyx sloev morskogo dna s ispol'zovaniem chetyrexkomponentnyx vektorno-skalyarnyx priemnikov]. Akusticheskij zhurnal – Acoustical Physics, 2016, vol. 62, no. 2, pp. 194–202.

6. Belova N.I., Kuznetsov G.N., Stepanov A.N. Experimental Research of the Interference fnd Phase Structure of the Power Flux from a Local Source in Shallow Water. [Belova N.I.,

Kuznecov G.N., Stepanov A.N. E'ksperimental'noe issledovanie interferencionnoj i fazovoj struktury potoka moshhnosti ot lokal'nyx istochnikov v melkom more]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no. 3, pp. 318–327.

7. 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., Kuznecov G.N. Pelengovanie i podavlenie vektorno-skalyarnyx signalov v melkom more s uchetom ix korrelyacionnoj i modovoj struktury]. Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics, 2016, vol. 62, no. 3, pp. 308–317.

8. Ianniello J.P. Recent developments is sonar signal processing. IEEE Signal. Process. Mag., 1998, vol. 15, no. 4, pp. 27–40.

9. Malyshkin G.S., Sidel'nikov G.B. Optimal and Adaptive Methods of Processing Hydroacoustic Signals (Review). [Malyshkin G.S., Sidel'nikov G.B. Optimal'nye i adaptivnye metody obrabotki gidroakusticheskix signalov]. *Akusticheskij zhurnal – Acoustical Physics*, 2014, vol. 60, no. 5, pp. 526–545.

10. 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.

11. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. Spectrogram and Localization of a Sound 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.

12. Besedina T.N., Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Prosovetskiy D.Yu. Estimation of the depth of a stationary sound source in shallow water. Phys. Wave Phenom, 2015, vol. 23, no. 4, pp. 292–303.

13. 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, p. 310–316.

14. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznachheev I.V. Noise source localization shallow water/ J. Phys. Wave Phenom, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 156–163.

15. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznachheev I.V. Interferometric method for estimating the velocity of a noise sound source and the distance to it in shallow water using a vector-scalar receiver. J. Phys. Wave Phenom, 2017, vol. 25, no. 4, pp. .

Пересёлков Сергей Алексеевич, профессор	Pereselkov Sergey Alexeevich, Professor of
кафедры математической физики ВГУ, Во-	the Department of Mathematical Physics,
ронеж, Россия	Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: pereselkov@yandex.ru	E-mail: pereselkov@yandex.ru
Тел.: +7(950)770-86-79	Tel.: + 7(950) 770 - 86 - 79
Казначеев Илья Викторович, аспирант ка-	Kaznacheev Ilya Viktorovich, Postgraduate
Казначеев Илья Викторович, аспирант ка- федры математической физики ВГУ, Воро-	Kaznacheev Ilya Viktorovich, Postgraduate Student of the Department of Mathematical
Казначеев Илья Викторович, аспирант ка- федры математической физики ВГУ, Воро- неж, Россия	Kaznacheev Ilya Viktorovich, Postgraduate Student of the Department of Mathematical Physics, Voronezh State University, Voronezh,
Казначеев Илья Викторович, аспирант ка- федры математической физики ВГУ, Воро- неж, Россия E-mail: kaznacheev.ilya@gmail.com	Kaznacheev Ilya Viktorovich, Postgraduate Student of the Department of Mathematical Physics, Voronezh State University, Voronezh, Russia
Казначеев Илья Викторович, аспирант ка- федры математической физики $B\Gamma Y$ , Воро- неж, Россия E-mail: kaznacheev.ilya@gmail.com Ten.: $+7(473)220-87-48$	Kaznacheev Ilya Viktorovich, Postgraduate Student of the Department of Mathematical Physics, Voronezh State University, Voronezh, Russia E-mail: kaznacheev.ilya@gmail.com
Казначеев Илья Викторович, аспирант ка- федры математической физики ВГУ, Воро- неж, Россия E-mail: kaznacheev.ilya@gmail.com 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.: $+7(473)220-87-48$

Применение векторно-скалярного приемника для оценки пеленга источника шума...

Ткаченко Сергей Александрович, аспирант кафедры математической физики ВГУ, Воронеж, Россия E-mail: sega-tk@mail.ru Teл.: +7(473)220-87-48