

А. Ф. Курчанов

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ), <http://www.vniiftri.ru/>, e-mail: [director@vniiftri.ru](mailto:director@vniiftri.ru)*

## Пеленг двух сосредоточенных источников при наличии помехи

*Получена 09.04.2008, опубликована 24.04.2008*

Найдено аналитическое решение задачи определения интенсивностей и направлений на два сосредоточенных источника акустического шума в безграничной среде при наличии изотропной в горизонтальной плоскости помехи. Исходными данными для решения являются сигналы комбинированного векторного приемника. Проверена работоспособность алгоритма на модельных и на реально полученных в море сигналах.

Ключевые слова: акустические измерения, комбинированный приемник, сосредоточенные источники шума, угловое разрешение источников, оценка уровней.

### ВВЕДЕНИЕ

С помощью комбинированного приемника [1 – 3] определяются направления и оцениваются уровни двух сосредоточенных независимых источников шума на фоне шумовой помехи [4 – 10] от поверхности моря. В безграничной водной среде неподвижно расположен комбинированный приемник (акустического давления и трех ортогональных компонент колебательной скорости) [10]. В дальней зоне неподвижно расположены два сосредоточенных независимых стационарных источника шума, причем отражение их сигналов от поверхности, дна и технических конструкций не учитывается. Учет же искажений сигнала может быть произведен с использованием неизвестных в общем случае функций распространения [11], которые могут быть уточнены как на основе теоретической априорной информации (глубина, профиль скорости звука и т.п.), так и на основе экспериментальных измерений [4, 5] сигналов. Шумовая помеха рассматривается как стационарная изотропная в горизонтальной плоскости [7 – 9, 12] (шум поверхности моря и его отражение от дна). Параметры ее анизотропии в вертикальной плоскости считаются известными. Все три источника шума действуют в одной и той же полосе частот (например, в 1/3-октаве). Требуется определить направления (пеленги) на два сосредоточенных источника, оценить их интенсивности и найти интенсивность помехи в выбранной частотной полосе анализа. Для движущихся источников шума [8, 13] пеленг вычисляется за время, в течение которого направления на них не изменяются существенно.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПЕЛЕНГА ИСТОЧНИКОВ

Существует общепринятый при обработке сигналов подход [14], однако, в рамках этой работы, обработка сигналов будет рассматриваться с несколько другой точки зрения. Известно, что одиночный комбинированный приемник в обесшумленной среде может [4] точно разрешить положение и вклады трех удаленных некоррелированных сосредоточенных источников шума. Антенная система [15 – 17], составленная из комбинированных приемников [4, 5], может разрешить и большее количество сосредоточенных источников шума в одной и той же полосе анализа частот. В общем случае решение для модельных источников шума должно минимизировать некоторый функционал, построенный как на основе измеренных сигналов, так и на основе модели того волновода, в котором сигналы распространяются. Это может быть сделано по методу Писаренко или согласно классическим методам Кейпона и Берга [18], либо применяя метод максимальной энтропии ММЭ [19], либо метод максимального правдоподобия ММП [20], а также другими, многочисленными способами. Например, при наличии всего трех сосредоточенных источников мы имеем уже 9 неизвестных параметров (азимут, угол места и уровень акустического давления в точке приема для каждого из источников). Рассматриваемые же ниже уравнения позволяют вместо поиска минимума функции в 9-мерном пространстве искать такой минимум в одномерном пространстве. Нахождение минимума некоторой функции в 9-мерном пространстве — задача сама по себе не простая, но при современном уровне вычислительной техники разрешимая. В случае же большего количества приемников сигналов и источников шума [4] объем вычислений возрастает многократно. При этом оптимальность [14] практически любой примененной для вычислений процедуры не очевидна. Критерием выбора процедуры в условиях неполной информации может быть время вычислений, «робастность» (устойчивость к отклонениям условий от модельных) и погрешности некоторых из определяемых параметров. Но так как для разных задач существенными будут погрешности разных параметров, то и оптимальные вычислительные алгоритмы будут отличаться.

Рассматриваемая модель отличается от реального гидроакустического поля в море. Однако, преломление звуковых лучей, искажающее «видимый» угол места шумящего источника, может быть учтено уже после применения обсуждаемого ниже алгоритма. Когда шумящий источник находится достаточно близко к поверхности, он вместе со своим отражением может рассматриваться как единый дипольный (либо с большей степенью мультипольности) источник.

Фоновый шум, наблюдаемый в море [6, 7, 10, 12] имеет анизотропию в вертикальной и в горизонтальной плоскости. При этом горизонтальная анизотропия имеет место в связи с дальним судоходством, влиянием неровностей дна, влиянием звукового канала и наличием береговой линии (на низких частотах), а также в связи с влиянием направления распространения волн и направления ветра (на более высоких частотах). В данной работе предполагается, что работа проводится в диапазоне частот, где горизонтальная анизотропия шума либо отсутствует, либо ее параметры известны.

Целью работы является рассмотрение алгоритма, требующего при своей работе очень малые вычислительные ресурсы и позволяющего оценить уровень шума поверхности одновременно с отдельной оценкой уровней шума в точке приема каждого из двух независимых источников шума, их азимутов и углов места.

Используемые в алгоритме аналитические выражения допускают значительный произвол при выборе целевой функции, что позволяет рассматривать предлагаемый алгоритм не как строго зафиксированный, а как метод исследования. Так, в настоящей работе для целевой функции выбрано симметричное выражение (8), имеющее 4-ю степень относительно сигналов приемника, а не «привычную» 2-ю степень. Изменяя вид целевой функции, можно влиять на устойчивость алгоритма и точность оценки направлений или интенсивностей сигналов.

После такой предварительной оценки точность результата может быть улучшена решением линеаризованных уравнений, например, по методу максимального правдоподобия [18, 20], либо другим способом.

## 2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

### 2.1. Формулировка алгоритма

Пусть приемник измеряет гидроакустическое давление  $P(t)$ , где  $t$  — время, и три ортогональных компонента колебательной скорости  $V_1(t)$ ,  $V_2(t)$  и  $V_3(t)$ . Подразумевается, что сигналы предварительно пропущены через фильтр, выделяющий некоторую полосу частот для обработки. Для определенности будем считать, что оси 1 и 2 лежат в горизонтальной плоскости, а ось 3 направлена вертикально вверх. Под направлением «вверх» подразумевается то направление, откуда приходит помеха, вызванная шумом поверхности моря. Пусть плотность среды  $\rho$ , а скорость звука в среде  $c$ . Обозначим  $V_0(t) = P(t)/(c\rho)$ . Вектор единичной длины, направленный от приемника на первый сосредоточенный источник шума обозначим как  $\vec{n}_1$ , а на второй источник как  $\vec{n}_2$ .

Приемник измеряет мгновенную колебательную скорость  $\vec{V} = -U_1\vec{n}_1 - U_2\vec{n}_2 + \vec{U}_0$ , где слагаемое  $\vec{U}_0$  определяется помехой и акустическое давление  $P = (c\rho)(U_1 + U_2) + P_0$ , где  $P_0$  определяется помехой.

При решении задачи нам понадобится скалярная величина  $A_0$ , вектор  $\mathbf{B}$  и тензор  $\Gamma$ :

$$A_0 = \sum_{i=1}^3 \langle V_i^2 \rangle, \quad \mathbf{B}_i = \langle V_i V_0 \rangle, \quad \Gamma_{ij} = \langle V_i V_j \rangle,$$

где угловыми скобками обозначено усреднение по времени.

Вначале время усреднения в выкладках будем считать стремящимся к бесконечности. Затем, после получения выражений для оценок искомых величин, время усреднения будем считать конечным — таким, за которое пеленги на источники не изменяются существенно. Если сигналы источников отсутствуют, и есть только помеха, тогда

$$B_i = -\delta_{i3} h_1 A_0, \quad \Gamma_{ij} = [h_2 \delta_{i3} \delta_{j3} + \frac{1}{2} (\delta_{i1} \delta_{j1} + \delta_{i2} \delta_{j2}) (1 - h_2)] A_0,$$

где  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера.

Это выражение означает по сути дела, что шум в горизонтальной плоскости изотропен, а в вертикальной плоскости его анизотропия может быть выражена двумя безразмерными числами. Два безразмерных параметра, определяемых распределением помехи в вертикальной плоскости, а именно  $h_1 = -B_3 / A_0$  и  $h_2 = \Gamma_{33} / A_0$ , будем считать известными, а ее интенсивность  $E_3 \equiv A_0$  нам неизвестной. Величину  $E_3$  мы вводим как характеристику шума поверхности, чтобы не путать ее в дальнейшем с величиной  $A_0$ , содержащей в себе как помеху, так и полезный сигнал. Параметры  $h_1$  и  $h_2$  определяются рабочей областью частот, реальными параметрами акватории (глубина), источником (волнение, ветер, дождь) и изменяются в зависимости от условий не слишком существенно. Эти параметры можно подсчитать, используя для шума поверхности модель Крона-Шермана [21] и проделав несложные вычисления. Они могут быть также измерены приемником заранее, в отсутствие двух пеленгуемых источников. Если один из источников присутствует постоянно (например, шумы расположенного в отдалении порта), то это также не препятствует правильно определить эти параметры. Могут быть также использованы их номинальные теоретические величины.

Вся информация о помехе, которая нам понадобится, заключена в величинах  $E_3$ ,  $h_1$  и  $h_2$ . Обозначим  $E_1 = \langle U_1^2 \rangle$ ,  $E_2 = \langle U_2^2 \rangle$ . Тогда для полного сигнала двух источников и помехи получим

$$A_0 = E_1 + E_2 + E_3, \quad B_i = -n_{1i} E_1 - n_{2i} E_2 - \delta_{i3} h_1 E_3,$$

$$\Gamma_{ij} = n_{1i} n_{1j} E_1 + n_{2i} n_{2j} E_2 + [\delta_{i3} \delta_{j3} h_2 + \frac{1}{2} (\delta_{i1} \delta_{j1} + \delta_{i2} \delta_{j2}) (1 - h_2)] E_3.$$

Заметим, что  $A_0 - \sum_{i=1}^3 \Gamma_{ii} = 0$ , а 6 компонент симметричного тензора  $\Gamma$  и 3 компоненты вектора  $B$  в сумме по своему количеству выглядят достаточными для определения всех интересующих нас величин.

Введем функции:

$$\alpha'_0(E) = A_0 - E, \quad \beta'_i(E) = B_i + \delta_{i3} h_1 E, \quad \gamma'_{ij}(E) = \Gamma_{ij} - [\delta_{i3} \delta_{j3} h_2 + \frac{1}{2} (\delta_{i1} \delta_{j1} + \delta_{i2} \delta_{j2}) (1 - h_2)] E$$

и обозначим  $\alpha_0 = \alpha'_0(E_3)$ ,  $\beta_i = \beta'_i(E_3)$ ,  $\gamma_{ij} = \gamma'_{ij}(E_3)$ .

Тогда

$$\alpha_0 = E_1 + E_2, \tag{1}$$

$$\beta_i = -E_1 n_{1i} - E_2 n_{2i}, \tag{2}$$

$$\gamma_{ij} = E_1 n_{1i} n_{1j} + E_2 n_{2i} n_{2j}. \tag{3}$$

Ниже мы решим уравнения (1) – (3) и выразим векторы  $\vec{n}_1$ ,  $\vec{n}_2$  и интенсивности  $E_1$  и  $E_2$  через  $\alpha_0$ ,  $\beta_i$  и  $\gamma_{ij}$ . Так как количество уравнений при этом больше количества неизвестных, то для результирующих аналитических выражений возникает некий произвол. Заметим, что выбор конкретной формы для этих выражений, здесь кажущийся несущественным, далее может серьезно влиять на погрешность результата работы алгоритма при конечном времени усреднения. Заменяя формально в полученных выражениях  $\alpha_0$  на  $\alpha'_0(E)$ ,  $\beta_i$  на  $\beta'_i(E)$  и  $\gamma_{ij}$  на  $\gamma'_{ij}(E)$ , мы получим функции  $\vec{n}_1(E)$ ,  $\vec{n}_2(E)$ ,  $E_1(E)$  и  $E_2(E)$  от переменной  $E$ . Обозначим

$$s^\alpha(E) = \alpha'_0(E) - E_1(E) + E_2(E),$$

$$s_i^\beta(E) = \beta'_i(E) + E_1(E)n_{1i}(E) + E_2(E)n_{2i}(E),$$

$$s_{ij}^\gamma(E) = \gamma'_{ij}(E) - E_1(E)n_{1i}(E)n_{1j}(E) - E_2(E)n_{2i}(E)n_{2j}(E).$$

Тогда «невязки»  $s^\alpha(E)$ ,  $s_i^\beta(E)$  и  $s_{ij}^\gamma(E)$  будут равны нулю при  $E = E_3$ . Образует теперь обобщенную «невязку»  $S(E) = F(s^\alpha, s^\beta, s^\gamma)$  по абсолютному минимуму которой (при  $E = E_{\min}$ ) оценим  $E_3 = E_{\min}$ , а по полученным ранее формулам оценим  $\vec{n}_1$ ,  $\vec{n}_2$ ,  $E_1$  и  $E_2$ . После того, как формулы для оценок определены, их можно применять для исходных, полученных в результате измерений сигналов приемника величин  $A_0$ ,  $B$  и  $\Gamma$  уже для конечного времени усреднения. При этом замечания относительно формы выражений при решении уравнений (1) – (3) и выбор формулы для обобщенной «невязки» становятся уже существенными и влияют на погрешность результата. Ниже мы, из субъективных соображений, выберем одну из многих форм реализации описанного выше алгоритма. Оптимизация алгоритма в данной работе не рассматривается.

Получим теперь необходимые для реализации алгоритма формулы. Обозначим:

$$g = \sum_i n_{1i}n_{2i}, \quad Q_{ij} = (\sum_k \gamma_{ik}\gamma_{kj}) - \alpha_0\gamma_{ij}.$$

Тогда

$$Q_{ij} = E_1E_2[g(n_{1i}n_{2j} + n_{2i}n_{1j}) - (n_{1i}n_{1j} + n_{2i}n_{2j})]$$

и, следовательно,

$$\sum_j Q_{ij}n_{1j} = -(1 - g^2)E_1E_2n_{1i}, \quad \sum_j Q_{ij}n_{2j} = -(1 - g^2)E_1E_2n_{2i},$$

т.е. собственное число матрицы  $Q$  вырождено (несколько разных собственных векторов матрицы имеют одно и то же собственное число), а  $n_1$  и  $n_2$  являются ее собственными векторами. Решим (методом Кардано) относительно величины  $\lambda$  кубическое уравнение  $\det(Q - \lambda I) = 0$ , где  $I$  — единичная матрица, и найдем максимальный по модулю отрицательный корень  $\lambda_0$ .

Затем на плоскости, перпендикулярной любой ненулевой строке матрицы  $Q - \lambda_0 I$  введем два ортогональных вектора единичной длины с компонентами  $e_{1i}$  и  $e_{2i}$ . Мы можем сделать это, т.к. для одного и того же собственного числа  $\lambda_0$  существуют два разных (ортогональных) собственных вектора матрицы  $Q - \lambda_0 I$ , а потому любая ненулевая строка этой матрицы задает направление, перпендикулярное к этой паре собственных векторов. По сути дела аналогичную процедуру [18] можно описать как нахождение ядра матрицы (совокупности всех векторов с нулевым или практически нулевым собственным значением) и выделение подпространства, ортогонального ядру матрицы. Любая ненулевая строка матрицы  $Q - \lambda_0 I$  как раз и будет описывать ее ядро, если оставшееся малое по модулю собственное значение будет действительно малым. Но именно это условие и будет выполнено в результате окончательного численного решения уравнения с одной неизвестной величиной. Разумеется, при численном решении в этом случае возникает некая «зона захвата», попав в которую, решение находится всего за несколько итераций, однако тонкости численной реализации алгоритма не стоят излишнего внимания. Переходя в новую систему координат, обозначим

$$N_{11} = \sum_i n_{1i} e_{1i}, N_{12} = \sum_i n_{1i} e_{2i}, N_{21} = \sum_i n_{2i} e_{1i}, N_{22} = \sum_i n_{2i} e_{2i},$$

$$\tilde{\beta}_1 = \sum_i \beta_i e_{1i}, \tilde{\beta}_2 = \sum_i \beta_i e_{2i}$$

и ведем комплексные величины

$$N_1 = N_{11} + iN_{12}, N_2 = N_{21} + iN_{22},$$

$$\tilde{\beta} = \tilde{\beta}_1 + i\tilde{\beta}_2 \text{ и } \tilde{\gamma} = \sum_{ij} \gamma_{ij} [(e_{1i} e_{1j} - e_{2i} e_{2j}) + i(e_{1i} e_{2j} + e_{2i} e_{1j})],$$

где  $i$  — мнимая единица.

Тогда

$$\tilde{\beta} = -E_1 N_1 - E_2 N_2, \tilde{\gamma} = E_1 N_1^2 + E_2 N_2^2.$$

Обозначим  $\Lambda = N_1^* N_2$ , где  $*$  обозначает комплексное сопряжение, тогда

$$E_1 + \Lambda E_2 = -\tilde{\beta} N_1^*, \tag{4}$$

$$E_1 + \Lambda^2 E_2 = \tilde{\gamma} (N_1^*)^2, \tag{5}$$

откуда, с учетом (1), получим

$$\frac{\Lambda^2 - 1}{\Lambda - 1} = \frac{\tilde{\gamma} (N_1^*)^2 - \alpha_0}{-\tilde{\beta} N_1^* - \alpha_0}.$$

Следовательно

$$\Lambda = -\frac{\tilde{\gamma}(N_1^*)^2 + \tilde{\beta}N_1^*}{\tilde{\beta}N_1^* + \alpha_0},$$

откуда

$$N_2 = -\frac{\tilde{\gamma}N_1^* + \tilde{\beta}}{\tilde{\beta}N_1^* + \alpha_0}. \tag{6}$$

Умножив (6) на комплексно сопряженное выражение, получим

$$\tilde{\beta}^* \tilde{\beta} + \alpha_0(\tilde{\beta}N_1^* + \tilde{\beta}^* N_1) + \alpha_0^2 = \tilde{\beta}^* \tilde{\beta} + \tilde{\gamma}^* \tilde{\gamma} + \tilde{\gamma} \tilde{\beta}^* N_1^* + \tilde{\gamma}^* \tilde{\beta} N_1.$$

Тогда, обозначив  $\tilde{\gamma} \tilde{\beta}^* - \alpha_0 \tilde{\beta} = s \nu$ ,  $\tilde{\gamma}^* \tilde{\gamma} - \alpha_0^2 = \mu$  и  $r = N_1 s^*$ , где  $\nu$  — действительное число, а  $s$  — комплексный вектор единичной длины, получим

$$r + r^* = -\mu/\nu. \tag{7}$$

Уравнение (7) имеет два решения, соответствующие векторам  $n_1$  и  $n_2$ . Эти два решения представляют собой пару векторов, направленных от приемника на два обнаруженных (предположительно) приемником сосредоточенных источников шума. Разумеется, нумерация «первый» и «второй» в этом случае условна, мы получим пару направлений и уровень акустического давления в точке приема, соответствующий каждому из этих двух направлений. Позже, когда будет проведено достаточное количество пеленгов (независимых решений), полученные пары решений сами собой сформируются в виде двух кластеров, соответствующих двум реально разделенным в пространстве источникам шума. После этого станет возможным усреднение либо другой анализ результатов внутри каждого из кластеров по отдельности. Для определенности будем считать, что  $N_1 = rs$  для решения  $r$  с положительной мнимой частью. Тогда  $N_2 = r^* s$  и  $\Lambda = (r^*)^2$ . Взяв в уравнениях (4) и (5) действительные части, находим величины  $E_1$  и  $E_2$ . Сразу же заметим, что из уравнения (1), двух действительных и двух мнимых частей уравнений (4), (5) можно получить много разных формул для оценки этих величин, а формула, использующая действительные части (4) и (5), взята просто как один из вариантов алгоритма.

Тензор [11, 22] невязок  $s_{ij}^\gamma$  симметричен и имеет равный нулю след. При численном исследовании работы алгоритма мы будем пользоваться формулой

$$S(E) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 s_{ij}^\gamma s_{ij}^\gamma, \tag{8}$$

которая, в силу своего симметричного вида, представляется достаточно разумной. Условие  $\min_{0 \leq E \leq \Delta_0} S(E)$  определяет величину  $E_3$ . Величина  $S(E_3)$  позволяет также оценить достоверность полученного решения и забраковать сомнительные результаты.

При измерении шумности обеспечивающее судно всегда создает некоторую помеху в анализируемой области частот и представляет собой относительно приемника

действительно достаточно удаленный сосредоточенный источник шума, который необходимо отделить от источника, расположенного на обследуемом судне. Например, если обеспечивающее судно находится от приемника на расстоянии 600 метров, а обследуемое судно проходит над приемником на дистанции около 50 метров, то учет отражения от дна и поверхности помехи, излучаемой обеспечивающим судном на частотах выше 2 кГц, вряд ли необходимо — помеха приходит практически с горизонтального направления. С другой стороны, если приемник расположен выше дна хотя бы на 50 метров, то отраженный от дна излучаемый сигнал обследуемого судна (даже при полном отражении) ослаблен в точке приема, по крайней мере, на 10 дБ. Возникающие при этом в работе алгоритма погрешности, если они существенны, могут быть частично устранены, например, широко известными методами теории возмущений.

Рассматриваемый алгоритм работает хорошо не для любых направлений на источники относительно друг друга и относительно вертикального направления. Увеличение погрешности происходит, когда один из углов становится близким к 0 или к 180°. Однако, в реальных измерительных задачах можно существенно снизить ограничения угла места и азимута. Это возможно, если средняя интенсивность шума поверхности моря оценивается не за каждый короткий промежуток времени (пока пеленг заметно не изменяется), а за весь проход обследуемого судна.

Ниже, при численном моделировании, за границу помехоустойчивости мы (для определенности) будем принимать такое отношение сигнала к помехе, при котором бракуется примерно 50% решений. То есть при моделировании мы упорядочиваем результаты измерений пеленгов в порядке роста минимума  $S(E)$  и оставляем для анализа только первые 50% измерений. В этом случае исключаются грубые ошибки, которые могут возникать на границе помехоустойчивости алгоритма. Границу помехоустойчивости можно было бы определить и иначе, более привычно, используя границы доверительных интервалов, но, стремясь к лучшей ясности излагаемого материала, будем ниже использовать данное выше простое определение именно потому, что граница при этом становится четко обозначенной и имеет ширину всего 1–2 дБ по величине отношения сигнала к помехе.

## 2.2. Проверка алгоритма

Ниже приводятся результаты проверки алгоритма вначале на модельных сигналах, а затем на реально полученных в морских условиях сигналах.

### 2.2.1. Компьютерное моделирование сигналов

При моделировании шумов поверхности моря вычислялись методом Монте-Карло. Для каждого независимого измерения акустического давления и вектора колебательной скорости шум поверхности моря представлялся в виде суммы 50 плоских волн со случайными направлениями, приходящих из верхнего полупространства и равномерно распределенными по телесному углу. Считалось, что каждая из плоских волн генерируется точечным источником на поверхности моря. При этом для плоской волны, приходящей под углом  $\Omega$  к вертикальному направлению, учитывалось

расстояние до поверхности, площадь участка поверхности и диаграмма направленности излучающего шум участка поверхности [21]  $g^2(\Omega) = I_0 \cos^{2m}(\Omega)$ , где  $I_0$  — интенсивность излучения при  $\Omega = 0$ . На одну из 50 плоских волн приходится в среднем телесный угол 0,126 стерadians, что соответствует конусу с углом полуоткрытия  $11,5^\circ$ . Косинус такого угла равен  $0,98 \approx 1$ , поэтому 50 плоских волн представляются достаточными для моделирования шума поверхности. Число  $m$  лежит [21] в пределах от 0,5 до 1 для частотного диапазона до 300–400 Гц и  $m = 1, 2, 3$  для диапазона частот выше 500 Гц; с увеличением скорости ветра и с увеличением частоты число  $m$  увеличивается. Согласно же результатам работы [12], число  $m$  может быть равным 0,5 даже до частоты 700 Гц.

Работа алгоритма проверялась при моделировании 24 измерений длительностью по 120 секунд каждый при  $m = 0,5$ . Расчет проводился для неподвижного судна при полосе анализа сигналов 300 Гц. При моделировании полагалось, что в анализируемой полосе частот шумы источников и моря имеют спектральную плотность, соответствующую белому шуму, а дискретные частотные составляющие отсутствуют. Глубина приемника относительно днища судна принималась равной 50 м. Координаты двух шумящих сосредоточенных источников в метрах относительно приемника были заданы как (50, -25, 50) и (50, +25, 50), где третья координата направлена вертикально вверх. Таким образом, расстояния от источников до приемников составляли 75 м. Источники считались монополярными излучателями, т.е. в точке приема их уровни были на 3,5 дБ ниже, чем на дистанции 50 метров от источника. Уровни сигналов источников считались равными. Параметр анизотропии  $m$  был принят равным 0,5. На рис. 1 показаны погрешности оценки положения, а на рис. 2 — уровни акустического шума первого источника шума.



Рис. 1. Смещение (тонкая линия) и среднее квадратическое отклонение (с.к.о., жирная линия) оценки положения «первого» источника относительно его истинного значения на корпусе судна в зависимости от отношения сигнал/помеха (дБ) на дистанции 50 м от судна



Рис. 2. Смещение (тонкая линия) и среднее квадратическое отклонение (с.к.о., жирная линия) оценки уровня акустического шума «первого» источника относительно его истинного значения в зависимости от отношения сигнал/помеха (дБ) на дистанции 50 м от судна

### 2.2.2. *Натурный эксперимент*

На рисунках 3 и 4 приведены результаты обработки записанных в море сигналов находящегося в режиме тишины водолазного мотобота ВМ-420 и опущенного с катера излучателя тонального сигнала 2031 Гц. Приемник находился на дне в стороне от мотобота. Излучатель находился не совсем точно по вертикали относительно приемника (катер был в дрейфе). Обработка сигналов велась в полосе частот 1992 – 2070 Гц, время одного пеленга составляло 1 секунду. При работе алгоритма параметр  $m$  анизотропии шума поверхности моря был принят равным 0,5. Для частот порядка 2 кГц возможно этот параметр должен быть больше. На рисунках источником № 1 обозначен излучатель, а источником № 2 — водолазный мотобот в режиме тишины. Среднее квадратическое отклонение рассчитанной величины  $E_1$  составило 1,48 дБ. Для величины  $E_2$  среднее значение было получено на 6 дБ больше, чем для величины  $E_1$ . При этом для величины  $E_2$  среднее квадратическое отклонение составило 0,76 дБ.

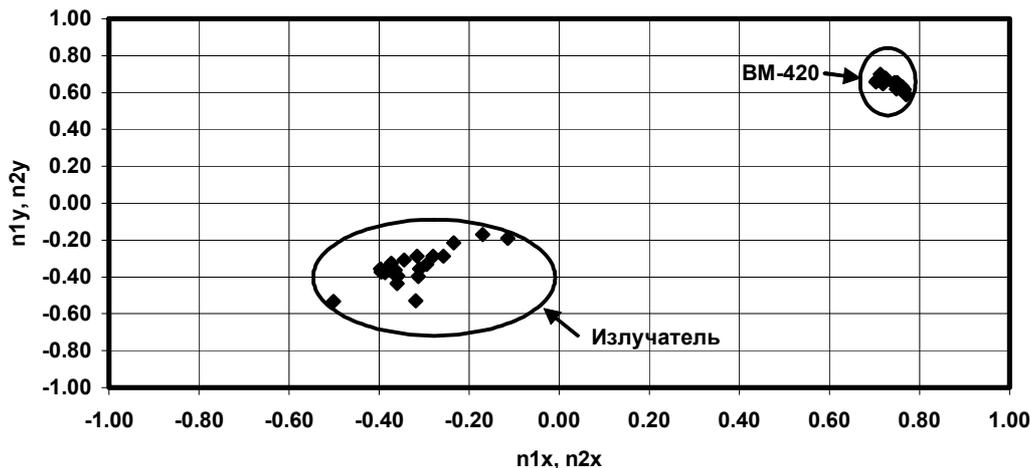


Рис. 3. Для векторов единичной длины, направленных на источники шума, показаны проекции на горизонтальную ось X ( $n_{1x}, n_{2x}$ ) и на горизонтальную ось Y ( $n_{1y}, n_{2y}$ ). Последовательные решения для пар векторов ( $n_1, n_2$ ) ложатся на плоскость так, что образуется два четко разделенных кластера, соответствующих двум реальным источникам шума

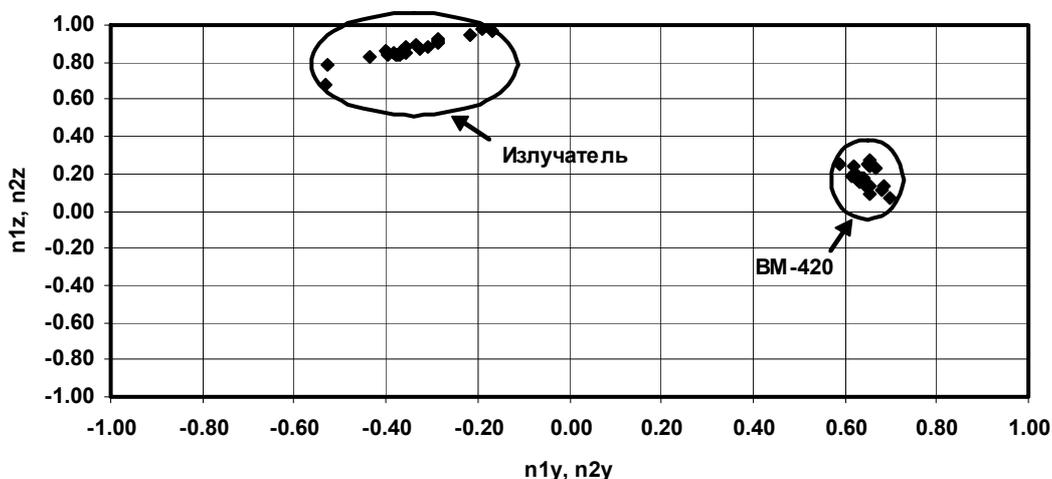


Рис. 4. Для векторов единичной длины, направленных на источники шума, показаны проекции на горизонтальную ось Y ( $n_{1y}, n_{2y}$ ) и на вертикальную ось Z ( $n_{1z}, n_{2z}$ ). Последовательные решения для пар векторов ( $n_1, n_2$ ) ложатся на плоскость так, что образуется два четко разделенных кластера, соответствующих двум реальным источникам шума

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм, как по результатам моделирования, так и по результатам его испытания на реальных сигналах, подтвердил свою работоспособность и показал неплохую помехоустойчивость. Смещение оценки положения источника и смещение оценки его уровня невелико и может быть учтено с помощью заранее вычисленных поправок. Кроме того, полученные формулы позволяют реализовать не только изложенный алгоритм, но и ряд его вариаций. Алгоритм может и должен быть «оптимизирован». Поэтому в данной работе не приводится большого количества графиков с иллюстрациями для разнообразных положений сосредоточенных источников относительно приемника. Исследование и оптимизация алгоритма требует большого объема вычислений и анализа результатов. Однако, даже в таком «как есть» виде, алгоритм может быть использован при измерениях реальных объектов в морских условиях наряду с алгоритмами, развитыми в работах [4, 6 – 10]. В основном частотный диапазон для обсуждаемого алгоритма предполагается от 2 кГц до 30 кГц, в этой области частот, видимо, можно обойтись без сложных поправок и применять алгоритм непосредственно, оценив заранее возникающие погрешности, обычно для задач гидроакустики не малые.

## ЛИТЕРАТУРА

1. J. Pat. 2582994 (USA). Underwater microphone [Текст]. / James M. Kendall. – 1952.
2. Hydrophone for measuring particle velocity [Текст]. / С. В. Leslie, J. M. Kendall, J. L. Jones. // JASA, 1956. – v. 28. – №4. – P. 711–715.
3. Малогабаритные излучающие и приемные системы высокой направленности [Текст]. / С. А. Маков // Доклады Акад. Наук СССР. – 1940. – т. XXVIII. – №5. – С. 418–422.
4. Estimating parameters of signal sources and characteristics of noise field by using spatially vector-scalar modules [Текст]. / G. M. Glebova, G. N. Kuznetsov // The Formation of Acoustical Fields in Oceanic Waveguides. Reconstruction of Inhomogeneities in Shallow Water. – Nizhny Novgorod: IAP RAS. – 1998. – In two volumes. – V. 1. – P. 109–137.
5. Noise stability of measurements of signal sources parameters made with the horizontal antennae in the shallow sea [Текст]. / A. Verevkin, G. Glebova, G. Kuznetsov // Wave Research Center of the General Physics Institute RAS, XIII Session of the Russian Acoustical Society. – Moscow, August 25–29, 2003
6. Статистический анализ векторно-фазовых характеристик акустических полей и алгоритмы их регистрации [Текст]. / В. И. Клячкин // Акустический журнал. – 2004. – том 50. – №4. – С. 516–523.
7. Стохастическая модель фоновой помехи в оценке погрешности измерений, выполняемых с помощью оптимального фильтра [Текст]. / В. А. Калью, В. И. Хащанский, Ю. Ф. Шлемов // Техн. Акустика. – СПб., 1999. – Т. V. – Вып. 3-4 (17-18). – С. 23–28.
8. Выбор усреднения при измерении шума медленно движущегося источника в поле помех [Текст]. / В. А. Калью, С. Б. Лунина // Техн. Акустика. – СПб., 1999. – Т. V. – Вып. 3–4 (17–18). – С. 17–21.

9. Помехоустойчивость гидроакустического комбинированного приемника [Текст]. / В. А. Щуров, А. В. Щуров // Акустический журнал. – 2002. – том 48. – №1. – С. 110–119.
10. Гордиенко, В. А. Векторно-фазовые измерения в гидроакустике. Некоторые аспекты использования потока акустической мощности для целей обеспечения единства гидроакустических измерений в условиях морских полигонов [Текст] / В. А. Гордиенко, В. Н. Некрасов. – Под общ. ред. П.А. Красовского. – М.: ВНИИФТРИ, 2007. – 451 с. : ил.
11. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 832 с. : ил.
12. Щуров, В. А. Векторная акустика океана [Текст] / В. А. Щуров. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 307 с.
13. Метод динамических синхронных измерений параметров гидроакустических полей и обработка информации [Текст]. / В. К. Маслов, А. М. Трохан // Труды ВНИИФТРИ. – М.: 2004. – вып.47(139). –С.84–131.
14. Г. Ван Трис. Теория обнаружения, оценок и модуляции [Текст]. В 3 ч. Ч.1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции : [пер. с англ.] / под. ред. проф. В.И. Тихонова. – М.: Сов. радио, 1972. – 744с.
15. Клячкин В. И., Селезнев И. А. Оценка эффективности алгоритма адаптивной обработки шумовых сигналов, принимаемых протяженной бортовой антенной [Текст] // Научно-технический сборник «Гидроакустика» . – СПб.: ФГУП ЦНИИ "Морфизприбор", 2003. – вып. 4. – С. 13–21
16. Смартышев М. Д. О совместной работе нескольких приемных гидроакустических антенн [Текст] // Научно-технический сборник «Гидроакустика» . – СПб.: ФГУП ЦНИИ «Морфизприбор», 2003. – вып. 4. – С. 46–49
17. Жуков В. Б. Об уровне бокового поля приемной гидроакустической антенны в полосе частот [Текст] // Научно-технический сборник «Гидроакустика» . – СПб.: ФГУП ЦНИИ "Морфизприбор", 2003. – вып. 4. – С. 21–26
18. Леховицкий Д. И., Атаманский Д. В., Кириллов И. Г. [Электронный ресурс]: Электрон. статья (1 файл 847 Кб) // Разновидности «сверхразрешающих» анализаторов пространственно-временного спектра случайных сигналов на основе обеляющих адаптивных решетчатых фильтров. – М.: ЦНТИ «Элерон», 2003. – Загл. с титул. экрана. – Свободный доступ из сети Интернет. – <http://www.eleron.net/rus/articles/Article2LK.pdf>
19. Василенко, Г. И. Восстановление изображений [Текст] / Г. И. Василенко, А. М. Тараторин. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с. : ил.
20. Бычков, В. Б. Оценивание мощности нестационарного многокомпонентного акустического сигнала методом максимального правдоподобия [Текст]. / В. Б. Бычков, А. Ф. Курчанов, В. К. Маслов // Измерительная техника. – 2001. – №8. – С.65–67.
21. Акустика океана [Текст]. / Под ред. Л. М. Бреховских. – М.: Наука 1974. – 693 с.
22. Маркус, М. Обзор по теории матриц и матричных неравенств [Текст] / М. Маркус, Х. Минк. – М.: Наука, 1972. – 232 с.