

УДК 542.34: 534.87

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОЙ ПРИЕМНОЙ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ

И.А. Селезнев¹, Г.М. Глебова^{1,2},
Г.А. Жбанков^{1,2}, А.М. Харахашьян²

Акционерное общество «Концерн «Океанприбор»¹
Научно-исследовательский институт физики
Южного федерального университета²

При проектировании и исследовании алгоритмов пассивной локации с использованием бортовых систем требуется знание характеристик шумов, исходящих от вибрирующих конструкций носителя. В связи с недостаточным объемом теоретических и экспериментальных данных о характеристиках векторно-скалярного шумового поля в работе используется компьютерное моделирование. Такой подход дал возможность проанализировать характеристики алгоритмов обнаружения в зависимости от различных параметров сигнально-помеховой ситуации – отношения сигнал/шум на входе приемной системы, направления прихода сигнала от локального источника, а также с учетом энергетических, пространственно-корреляционных и статистических характеристик структурной помехи. Результаты моделирования работы алгоритмов обнаружения представлены для линейной эквидистантой антенной решетки, установленной в непосредственной близости от несущих конструкций, в условиях однолучевого распространения. Оценка эффективности работы алгоритмов обнаружения выполнялась путем анализа пространственных спектров, которые рассчитывались с использованием метода Бартлетта, имеющего стандартное разрешение. В работе представлены пространственные спектры на выходе приемной системы при работе с различными компонентами акустического поля: для скалярной компоненты, при совместной обработке скалярной и векторной компоненты, а также для случая, когда формируется потоковая компонента поля. Анализ особенностей структурной помехи для скалярной и векторно-скалярных компонент акустического поля позволил выявить и обосновать наиболее эффективный алгоритм обработки сигналов среди рассмотренных. Расчет отношения сигнал/помеха на выходе приемной системы при обработке сигналов с использованием различных компонент акустического поля показал высокую эффективность алгоритма, использующего потоковую компоненту векторно-скалярного поля.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное решение задач пассивной локации источников звука, основанное на использовании векторно-скалярных приемных систем, отражено в большом количестве зарубежных и отечественных работ. Так, в работах [1–3] показано, что измерение не только скалярной, но и векторной компоненты акустического поля приводит к увеличению отношения сигнал/помеха на выходе приемной системы в 2–5 раз. А в работах [4–6] показано, что при работе векторно-скалярной приемной системы на фоне шумов моря и при использовании потоковой компоненты поля отношение сигнал/помеха может быть увеличено в 10 раз и более. Такой

эффект достигается за счет того, что для шумов моря скалярная и векторная компоненты акустического поля некоррелированы. Вследствие этого даже при конечном времени наблюдения поток мощности шума значительно меньше, чем мощность шума на датчике давления [7–9].

Исследование алгоритмов для бортовых систем также требует знания характеристик векторно-скалярного акустического поля шумов, которое обусловлено вибрирующей конструкцией носителя. В данной работе для расчета акустического поля шумов носителя используется подход, изложенный в работах [10, 11], который заключается в том, что поле создается совокупностью сигналов от источников, расположенных случайным образом на по-

верхности пластины. Соответствие данного подхода строгой теории [12], разработанной для реальных инженерных конструкций и позволяющей рассчитать различные векторно-скалярные характеристики поля шумов, показано в работе [13]. Компьютерное моделирование позволило наиболее полно учесть энергетические, пространственно-корреляционные и статистические характеристики векторно-скалярного шумового поля. Целью настоящей работы является демонстрация в рамках численного эксперимента особенностей шумов носителя и по-

¹ 197376, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., д. 48. Тел.: (812) 3208040, 3208042. E-mail: mfp@mail.wplus.net

² 344090, Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194. Тел.: +7 (863) 2433676. E-mail: iphys@sfnu.ru

строение алгоритма пространственной фильтрации, обеспечивающего эффективное их подавление.

■ Постановка задачи

Прием сигналов осуществляется линейной векторно-скалярной антенной, установленной в непосредственной близости от борта (на расстоянии l), колебания элементов которого создают акустическое поле помех. Антенна установлена горизонтально вдоль борта носителя и состоит из M одинаковых модулей с равными расстояниями между соседними элементами. Каждый модуль включает датчик давления и два ортогональных векторных приемника, оси которых лежат в горизонтальной плоскости и параллельны осям X и Y . Геометрия рассматриваемой задачи и система координат, в которой выполняется расчет акустического поля на приемных элементах, схематично представлены на рис. 1. Направление на источник θ_0 отсчитывается от оси X , направление движения судна, на борту которого установлена антенна, параллельно оси X .

Для синтеза методов обнаружения и оценки параметров сигналов широко используется спектральное представление сигналов. После узкополосной фильтрации сигналы, принимаемые модулями антенны, можно представить в виде:

$$\mathbf{U}^* = (\mathbf{P}, \mathbf{V}_x, \mathbf{V}_y), \quad (1)$$

где $\mathbf{P}, \mathbf{V}_x, \mathbf{V}_y$ – векторы размерностью M . Для звукового давления $P^* = (P_1, P_2, \dots, P_M)$, а для векторных компонент $\mathbf{V}_x^* = (V_{x1}, V_{x2}, \dots, V_{xM})$ и $\mathbf{V}_y^* = (V_{y1}, V_{y2}, \dots, V_{yM})$, символ “*” означает эрмитово сопряжение. Обычно векторные компоненты измеряют в эквивалентных единицах давления плоской звуковой волны путем формального умножения значений колебательной скорости на волновое сопротивление среды ρc .

В гидроакустике, как правило, измеряемые сигналы представляют собой стационарные (квазистационарные) случайные процессы, распределенные по нормальному закону [14, с. 223]. Для гауссовых процессов с нулевым математическим ожиданием статистика измерений полностью определяется матрицей ковариаций, которая рассчитывается как произведение вектора-столбца на комплексно-сопряженную вектор-строку $\mathbf{K} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{U}^*$. Для векторно-скалярной антенны матрица ковариаций \mathbf{K} размером $3 \cdot M \times 3 \cdot M$ имеет блочный вид:

$$\mathbf{K}_{PV} = \begin{pmatrix} \mathbf{P} \cdot \mathbf{P}^* & \mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_x^* & \mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_y^* \\ \mathbf{V}_x \cdot \mathbf{P}^* & \mathbf{V}_x \cdot \mathbf{V}_x^* & \mathbf{V}_x \cdot \mathbf{V}_y^* \\ \mathbf{V}_y \cdot \mathbf{P}^* & \mathbf{V}_y \cdot \mathbf{V}_x^* & \mathbf{V}_y \cdot \mathbf{V}_y^* \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Каждый из трех диагональных блоков этой матрицы размерностью $M \times M$ описывает ковариационные зависимости между одноименными компонентами векторно-скалярного поля, а недиагональные блоки – их взаимную ковариацию.

В данной работе анализируются характеристики векторно-скалярной приемной системы при различных способах формирования матрицы ковариаций. При первом способе используются измерения от всех приемных элементов векторно-ска-

лярной антенны. Матрица ковариаций имеет вид (2), будем называть этот способ формирования выходных сигналов приемных модулей векторно-скалярным и обозначим его через индекс “PV”. Второй способ основан на измерении потока мощности ($\mathbf{W} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{V}^*$), матрица ковариаций (2) преобразуется таким образом, что в ней присутствуют только элементы $\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_r^*$ ($r = x, y$):

$$\mathbf{K}_w = \mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_x^* \oplus \mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_y^*. \quad (3)$$

Здесь и в дальнейшем “W” означает обработку с использованием потоковых компонент акустического поля, “ \oplus ” соответствует прямой сумме квадратных матриц $\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_x^*$ и $\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_y^*$. Для сравнения эффективности векторно-скалярного и потокового подхода со стандартным подходом, использующим измерения только от приемников давления, рассматривается случай, когда

$$\mathbf{K}_p = \mathbf{P} \cdot \mathbf{P}^*, \quad (4)$$

в дальнейшем “P” означает обработку с использованием скалярных компонент акустического поля.

При моделировании полагалось, что число осреднений, обусловленное накоплением измерений как по частоте, так и по времени, таково, что сигнал от полезного источника и шум можно считать некоррелированными, поскольку они создаются

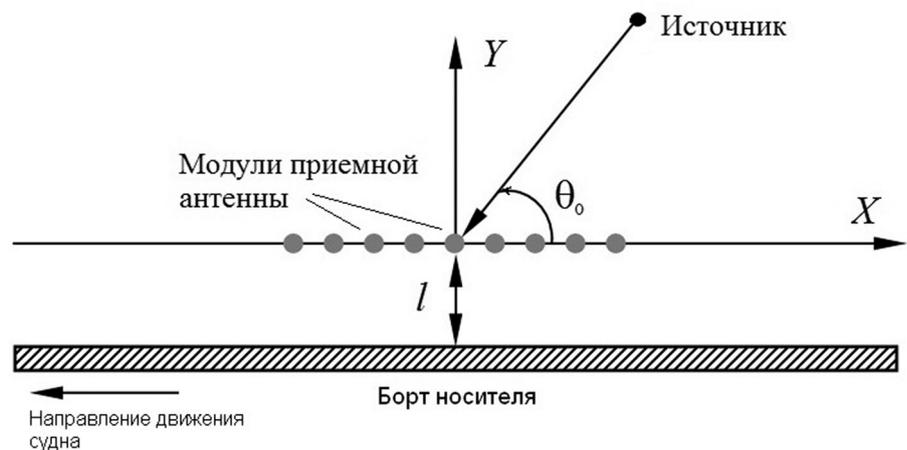


Рис. 1. Общий вид рассматриваемой задачи в плоскости XY

независимыми друг от друга источниками. Как следствие среднее значение матрицы ковариаций или ее оценка представляет собой сумму средних значений сигнальной матрицы и матрицы помех при любом способе формирования матрицы ковариаций сигналов, принимаемых векторно-скалярной антенной:

$$\hat{K}_{S+N,J} = \hat{K}_{S,J} + \hat{K}_{N,J}. \quad (5)$$

Первый индекс (N, S, S+N) определяет сигнально-помеховую ситуацию, когда на вход приемной антенны поступают сигналы только от структурной помехи (N), или только сигнал от локального источника (S), или сумма сигналов от помехи и локального источника (S+N). Второй индекс (J) может принимать значения P, PV, W, что соответствует формированию матрицы ковариаций с использованием различных компонент акустического поля: скалярной, векторно-скалярной или потоковой. Далее рассматривается структурная матрица помех, обусловленная работой механизмов носителя, на борту которого установлена антенна.

■ Модель сигнала и помехи

На *m*-ом модуле антенны измеряемые сигналы можно записать в виде:

$$U_m = P_m, \quad U_{m+M} = V_{mx}, \quad U_{m+2M} = V_{my}, \quad m = 1, \dots, M, \quad (6)$$

здесь P_m и $V_{m,r}$, ($r = x, y$) – звуковое давление и проекции колебательной скорости по ортогональным направлениям x и y . Сигналы от удаленного локального источника представляются плоской волной. Для источника, направление на который соответствует углу θ_0 , спектральный отсчет на приемнике давления *m*-го модуля, полученный в результате Фурье-преобразования входного сигнала, равен:

$$p_m = \sqrt{A}[\exp(jkx_m \cos\theta_0)], \quad m = 1, \dots, M, \quad (7)$$

здесь $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, соответствующая центральной частоте узкополосного фильтра f , $x_m = d(m - (M + 1) / 2)$ – координата *m*-го модуля, d – расстояние между модулями, A – мощность сигнала в точке приема. Используя направляющие косинусы как веса для компонент колебательной скорости, вектор измеряемых величин **U** при приеме сигналов от локального источника представим в виде:

$$U = (1, \cos\theta_0, \sin\theta_0) \oplus P. \quad (8)$$

где \oplus означает произведение Кронекера.

В работе [7] теоретически и экспериментально показано, что представление сигналов в виде (8) справедливо как при распространении сигналов в свободном пространстве, так и в волноводе глубиной H_w , если выполняется соотношение: $H_w / \lambda > 3$.

Структурная помеха, создаваемая носителем, рассчитывается в предположении, что акустическое поле обусловлено вибрациями пластины, шарнирно закрепленной на краях (рис. 2). Источники возмущающих сил, вызывающих вибрации пластины, имеют малую площадь корреляции в масштабах длины волны, в силу чего акустическое давление может быть рассчитано в виде совокупности сигналов от независимых случайных источников с равномерной плотностью распределения по поверхности пластины [10]. Это позволяет воспользоваться энергетическим суммированием по всем источникам, создающим структурную помеху. Аналогично рассчитываются скалярные характеристики шумов моря в основополагающей работе [15], а также векторно-скалярные характеристики

шумов в работах [7, 16]. Среднее значение мощности давления на *m*-ом приемном модуле акустической антенны P_m рассчитывается следующим образом:

$$\langle |P_{N,m}|^2 \rangle = \left\langle \left| \sum_{i=1}^Q a_i \cdot \exp(jk \cdot r_{im} / r_{im}) \right|^2 \right\rangle, \quad (9)$$

здесь a_i – амплитуды сигнала *i*-го источника в точке излучения, r_{im} – расстояние от *i*-го источника шума, находящегося на колеблющейся пластине, до *m*-го модуля приемной антенны. Исходя из предположения о том, что характеристики излучающей системы адекватно описываются источниками, расположенными на расстоянии $d \approx \lambda / 2$ друг от друга [10], число источников, распределенных случайным образом по поверхности пластины, задавалось из условия $Q \geq L_x \cdot L_z / (\lambda / 2)^2$. Размеры вибрирующей пластины по горизонтали и вертикали обозначены через L_x , L_z соответственно.

Полагается, что амплитуды случайных источников a_i распределены по Релею, а начальные фазы – равномерно в интервале $(0 \div 2\pi)$, мнимая и действительная части

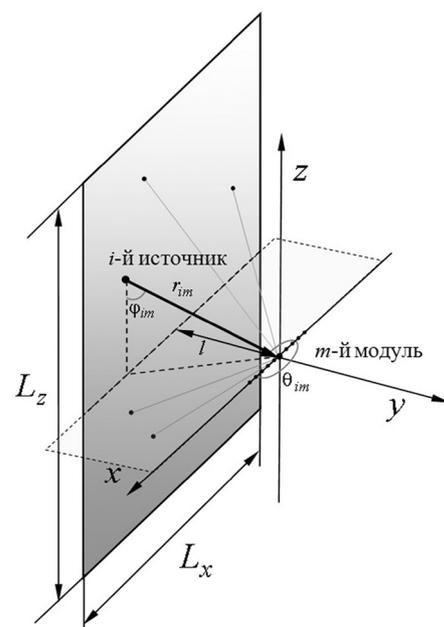


Рис. 2. Представление рассматриваемой задачи в пространстве

такого сигнала распределены по нормальному закону. Для расчета сигнала на векторных приемниках выражение (9) преобразуется с учетом их положения относительно каждого из источников излучения. Для этого сигнал, пришедший от каждого элементарного источника, умножается на $\alpha_{im} = \cos\theta_{im} \sin\varphi_{im}$ или $\beta_{im} = \sin\theta_{im} \sin\varphi_{im}$ для компонент V_x и V_y соответственно, θ_{im} и φ_{im} – азимут и угол возвышения i -го источника излучения (рис. 2).

■ Результаты моделирования и их обсуждение

Моделирование сигналов на входе приемных модулей антенны производится на частоте $f = 3000$ Гц, скорость распространения звука в воде $c = 1500$ м/с. Число модулей в антенне $M = 11$, расстояние между модулями $d = 0,16$ м. Пластина, вблизи которой на расстоянии $l = 0,1$ м находится приемная антенна, имеет размер 100×10 м и расположена вертикально (рис. 2).

Пространственный спектр рассчитывается с использованием метода Бартлетта, имеющего стандартное пространственное разрешение [17, с. 391]:

$$\Phi(\theta) = \mathbf{V}^*(\theta) \cdot \hat{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{V}(\theta), \quad (10)$$

где $\mathbf{V}(\theta)$ – сканирующий вектор, компоненты которого обеспечивают когерентное сложение сигнала, представляющего собой плоскую волну, а $\hat{\mathbf{K}}$ – оценка матрицы ковариации принимаемых сигналов. Пространственный спектр анализировался как при использовании различных компонентов акустического поля, так и при различных сигнально-помеховых ситуациях (при приеме только структурной помехи, или только сигнала от удаленного локального источника, или при суммарном приеме сигнала от локального источника

и структурной помехи). В дальнейшем для пространственного спектра $\Phi_{i,j}(\theta)$ введена индексация (I, J), аналогичная индексации матрицы ковариаций. Индекс I = N, S, S+N определяет сигнально-помеховую ситуацию, а индекс J = P, PV, W соответствует компоненте акустического поля.

При работе со скалярной компонентой поля матрица ковариаций имеет вид (4), а сканирующий вектор равен:

$$\mathbf{V}(\theta) = \begin{pmatrix} \exp(-jkx_1 \cos\theta) \\ \exp(-jkx_2 \cos\theta) \\ \vdots \\ \exp(-jkx_M \cos\theta) \end{pmatrix}. \quad (11)$$

При работе с векторно-скалярными компонентами поля матрица ковариаций имеет вид (2), а сканирующие вектора задаются в виде $(1, \cos\theta, \sin\theta) \oplus \mathbf{V}(\theta)$. При работе с потоковыми компонентами поля пространственный спектр рассчитывается в соответствии с выражением: $\Phi(\theta) = \mathbf{V}^*(\theta) \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_x^* \cdot \mathbf{V}(\theta) \cdot \cos\theta + \mathbf{V}^*(\theta) \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_y^* \cdot \mathbf{V}(\theta) \cdot \sin\theta$.

На рис. 3 представлен пространственный спектр при приеме шумов, создаваемых вибрациями пластины, число источников, создающих структурную помеху, задавалось равным 32000, число осреднений для расчета оценки матрицы ковариаций равно 100. Нормировка производится на максимальное значение

выходного сигнала, при работе со скалярной компонентой поля $\Phi_{N,P}^{\max} = \max(\mathbf{V}^*(\theta) \hat{\mathbf{K}}_{N,P} \mathbf{V}(\theta))$, что позволяет сравнить мощность структурной помехи на выходе приемной системы при использовании различных компонентов поля.

Пространственный спектр структурной помехи для потоковой компоненты $\Phi_{N,W}(\theta)$ имеет равномерный характер. Сектор углов, соответствующий максимальным значениям в выходном сигнале для скалярной $\Phi_{N,P}(\theta)$ и векторно-скалярной $\Phi_{N,PV}(\theta)$ компоненты (примерно $25^\circ-30^\circ$ и $150^\circ-155^\circ$), отражает тот факт, что с вибрирующей поверхности по этим направлениям “собирается” наибольший шум. Как показали дополнительные исследования, положение максимумов в выходном сигнале зависит от геометрических размеров пластины и от расстояния между приемным элементом и пластиной [18, 19], но они всё равно близки к бортовым аспектам. Особое внимание необходимо обратить на то, что использование потоковой компоненты позволяет не только определить направление, с которого идет наибольший шум, но и установить, идет ли шум со стороны вибрирующей пластины или он обусловлен воздействием внешних источников.

Для одиночного 3-компонентного векторно-скалярного модуля, находящегося в центре пластины,

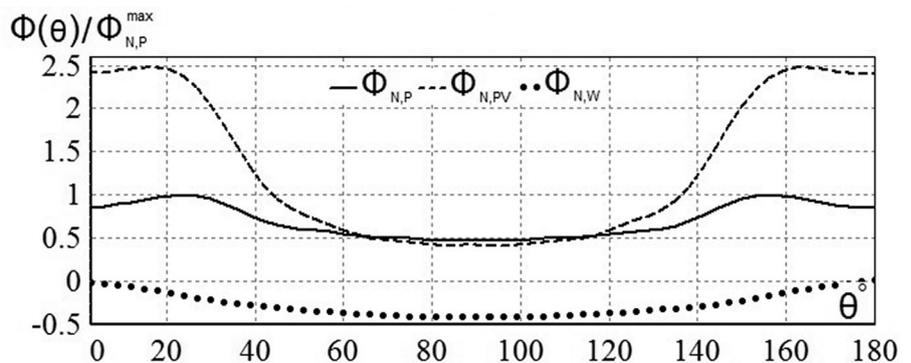


Рис. 3. Пространственный спектр при приеме структурной помехи, рассчитанный с использованием различных способов формирования матрицы ковариаций: $K_{N,P}$, $K_{N,PV}$ и $K_{N,W}$

в табл. 1 приведены значения нормированной матрицы ковариаций (2) и корреляционной матрицы структурной помехи, элементы которой рассчитываются в соответствии с выражением:

$$C_{N,ij} = \frac{\text{Re}(\hat{K}_{N,ij})}{\sqrt{\hat{K}_{N,ii} \cdot \hat{K}_{N,jj}}}$$

Как видно из результатов, полученных компьютерным моделированием, мощность шума, приходящая по потоковым компонентам акустического поля ($\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_x^*$, $\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_y^*$) меньше, чем мощность шума по скалярной компоненте. Интересно также отметить, что мощность шума на компоненте V_y , которая обращена по нормали к пластине, сильно коррелирована с давлением. В табл. 2 представлены экспериментально измеренные значения коэффициента корреляции структурной помехи для потоковой компоненты, ориентированной вдоль борта, $\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_x^* / (|\mathbf{P}| \cdot |\mathbf{V}_x|)$. Приведенные данные получены при измерениях шума одиночным векторно-скалярным модулем, установленным в центральной части борта носителя, в непосредственной близости от него [10]. Экспериментальные измерения показывают, что в широком частотном диапазоне шум,

приходящий по потоковой компоненте, примерно в 10 раз меньше, чем по скалярной компоненте поля, что подтверждает используемую в данной работе модель структурной помехи.

На рис. 4 представлены пространственные спектры при приеме только сигнала от локального источника, который находится по направлению $\theta_0 = 45^\circ$. Так же как и при приеме структурной помехи, нормировка производится на максимальное значение выходного сигнала при работе со скалярной компонентой поля $\Phi_{S,P}^{\max} = \max(\mathbf{B}^*(\theta) \hat{\mathbf{K}}_{S,P} \mathbf{B}(\theta))$.

Из представленных данных видно, что для всех компонент максимум направленности излучения совпадает с истинным направлением на источник, $\theta_0 = 45^\circ$. Максимальное значение выходной сигнал имеет при обработке сигналов с использованием векторно-скалярных компонент поля, минимальное – при работе со скалярной компонентой поля. Такое соотношение выходного сигнала связано с тем, что используется различное число измеряемых компонент акустического поля. Данные, представленные на рис. 4, используются при расчете отношения сигнал/помеха на выходе приемной системы, представляю-

щем больший интерес и зависящем от уровня шумов (рис. 3), который также различен при обработке сигналов по различным компонентам акустического поля.

На рис. 5 представлен пространственный спектр при суммарном воздействии структурной помехи и сигнала от удаленного локального источника, расположенного по направлению $\theta_0 = 45^\circ$. Результаты приводятся для различных отношений сигнал/помеха на входе приемной системы. Следует подчеркнуть, что данное отношение здесь и в дальнейшем указывается для приемника давления. Нормировка производится на максимальное значение выходного сигнала при работе с соответствующей компонентой поля. Например, при работе со скалярной компонентой поля $\Phi_{S+N,P}^{\max} = \max(\Phi_{S+N,P}(\theta))$.

При отношении сигнал/помеха на входе приемной системы, равном 0,1, для всех компонент акустического поля максимум выходного сигнала находится по направлению $\theta = 45^\circ$. Но для скалярной и векторно-скалярной компонент наблюдается ярко выраженный дополнительный локальный максимум по направлению $\theta \approx 145^\circ$, значение которого возрастает с ростом шумовой составляющей. Как следствие при работе со скалярной и векторно-скалярной компонентой боковой лепесток можно идентифицировать как ложную цель. При использовании потоковой компоненты наблюдается только один максимум – по направлению $\theta = 45^\circ$, который соответствует истинному направлению прихода сигнала от локального источника. При отношении сигнал/помеха на входе приемной системы, равном 0,02, только использование потоковой компоненты позволяет обнаружить сигнал. При работе со скалярной или векторно-скалярной компонентой акустического поля

Таблица 1. Значения ковариационной и корреляционной матрицы шумов на одиночном векторно-скалярном приемном элементе

Вид ковариационной матрицы, нормированной на $\mathbf{P} \cdot \mathbf{P}^*$			Модуль нормированной матрицы ковариаций			Корреляционная матрица C_N		
$\mathbf{P} \cdot \mathbf{P}^*$	$\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_x^*$	$\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_y^*$	1.00	0.01	0.22	1.00	0.01	0.64
$\mathbf{V}_x \cdot \mathbf{P}^*$	$\mathbf{V}_x \cdot \mathbf{V}_x^*$	$\mathbf{V}_x \cdot \mathbf{V}_y^*$	0.01	0.49	0.01	0.01	1.00	0.04
$\mathbf{V}_y \cdot \mathbf{P}^*$	$\mathbf{V}_y \cdot \mathbf{V}_x^*$	$\mathbf{V}_y \cdot \mathbf{V}_y^*$	0.22	0.01	0.12	0.64	0.04	1.00

Таблица 2. Экспериментальные значения коэффициента корреляции структурной помехи для потоковой компоненты, ориентированной вдоль борта

f , кГц	1.0	1.25	1.5	2.5	3.15	5.0	6.3	8.0	10.0
$\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_x^* / (\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_x)$	0.1	0.1	0.15	0.15	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05

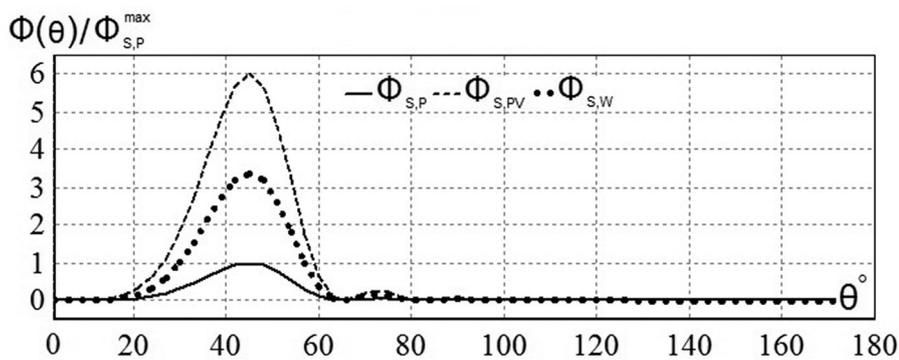


Рис. 4. Пространственный спектр при приеме сигнала от удаленного локального источника, рассчитанный с использованием различных способов формирования матрицы ковариаций: $K_{S,P}$, $K_{S,PV}$ и $K_{S,W}$

структурная помеха подавляет полезный сигнал.

Для рассматриваемой в данной работе модели сигналов и шумов и при обработке сигналов методом Бартлетта выполнен расчет одной из основных характеристик – отношение сигнал/помеха на выходе приемной системы [14, с. 398]:

$$\gamma = \frac{\langle \Phi_{S+N} - \Phi_N \rangle}{\sigma(\Phi_N)} \Big|_{\theta=\theta_0}, \quad (12)$$

здесь $\langle \Phi_{S+N} \rangle$ – среднее значение пространственного спектра при приеме аддитивной смеси полезного сигнала и шума, $\langle \Phi_N \rangle$, $\sigma(\Phi_N)$ – среднее значение и среднеквадратическое отклонение пространственного спектра при приеме только шума. Известно, что для гауссовых сигналов среднеквадратическая ошибка оценки мощности равна среднему значению мощности. Посколь-

ку метод Бартлетта представляет собой линейное преобразование гауссовых сигналов (умножение на сканирующие вектора) с последующим возведением в квадрат, то справедливо следующее равенство: $\sigma(\Phi_N) = \langle \Phi_N \rangle$, которое использовалось в выражении (12) при расчете отношения сигнал/помеха на выходе приемного устройства.

Отношения сигнал/помеха, рассчитанные с использованием различных компонентов акустического поля и в зависимости от направления прихода сигнала от удаленного источника θ_0 , представлены на рис. 6.

Видно, что использование потоковой компоненты наиболее эффективно при приближении источника сигналов к бортовым аспектам вдоль корпуса носителя. На траверсных направлениях ($\theta = 90^\circ$) работа по потоковой и векторно-скалярной компоненте дает примерно одинаковое отношение сигнал/помеха на выходе приемной системы. Но при малых отношениях сигнал/помеха на входе приемной системы уровень бокового фона при работе с векторно-скалярной компонентой настолько велик, что более целесообразно работать с потоковой компонентой. Это наглядно иллюстрируют пространственные спектры, рассчитанные при различных значениях $\theta_0 = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$, отношение сигнал/помеха на входе равно 0,1 (рис. 7).

ВЫВОДЫ

Характер пространственного спектра при приеме структурной помехи сильно зависит от способа формирования матрицы ковариаций, что, в свою очередь, влияет на отношение сигнал/помеха на выхо-

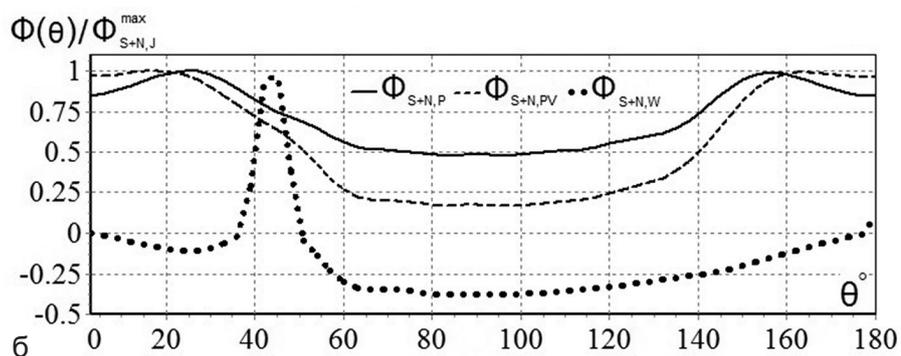
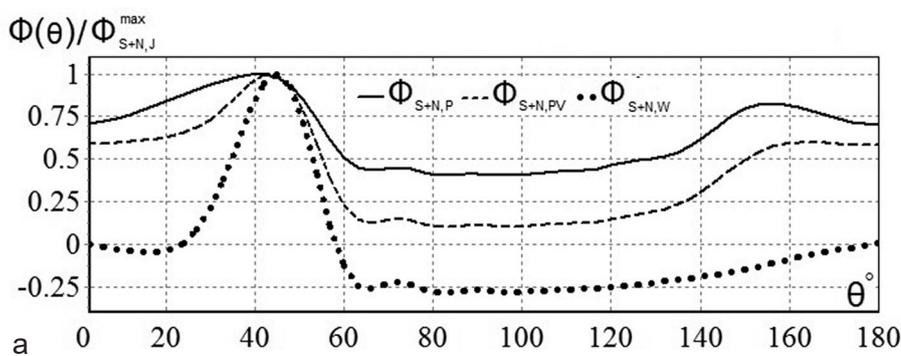


Рис. 5. Пространственный спектр, рассчитанный при приеме сигнала от удаленного локального источника ($\theta_0 = 45^\circ$) на фоне структурной помехи; расчеты выполнены с использованием различных способов формирования матрицы ковариаций: $K_{S+N,P}$, $K_{S+N,PV}$ и $K_{S+N,W}$; отношение сигнал/помеха на входе приемника давления равно: а – 0,1; б – 0,02

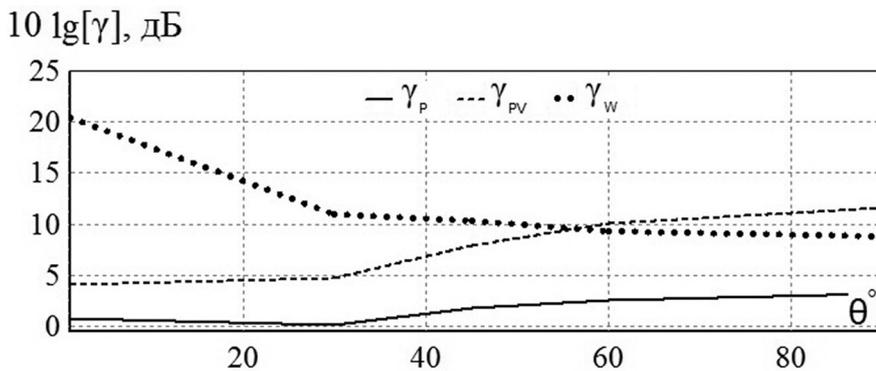


Рис. 6. Отношения сигнал/помеха на выходе приемной системы в зависимости от направления прихода сигнала от локального источника θ_0 ; расчеты выполнены с использованием различных компонент акустического поля

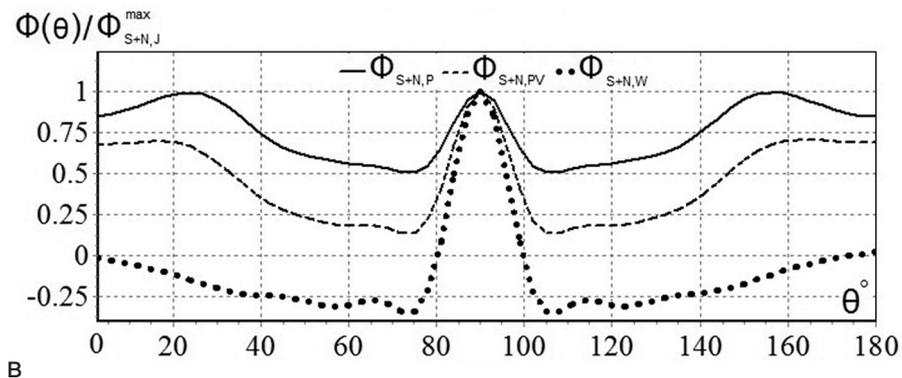
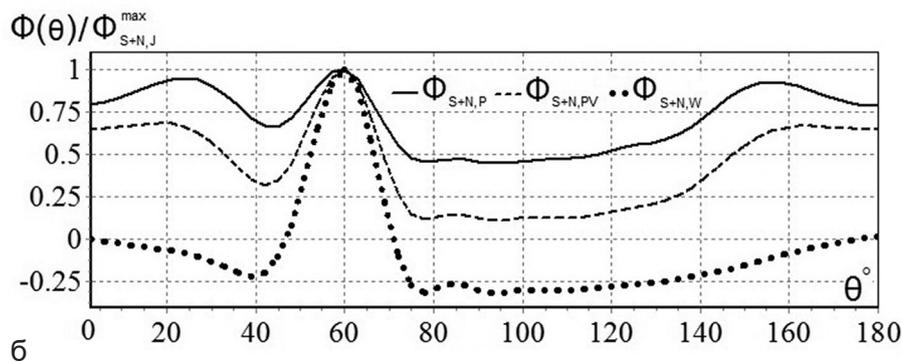
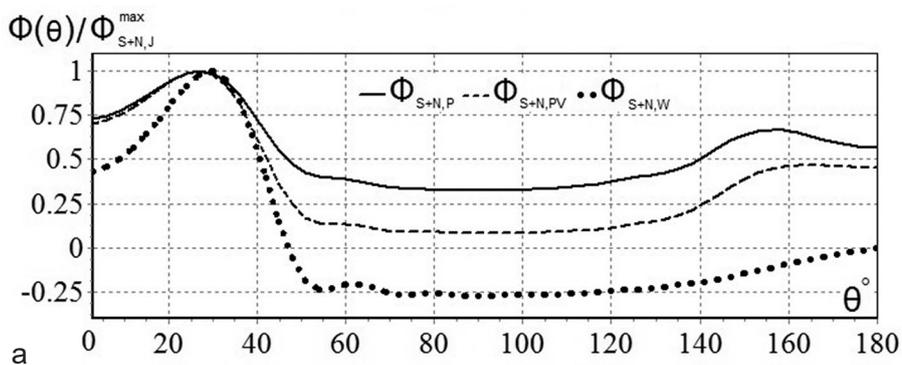


Рис. 7. Пространственный спектр, рассчитанный при суммарном воздействии структурной помехи и сигнала от удаленного локального источника, расчеты выполнены с использованием различных способов формирования матрицы ковариаций: $K_{S+N,P}$, $K_{S+N,PV}$ и $K_{S+N,W}$; а – $\theta_0 = 30^\circ$, б – $\theta_0 = 60^\circ$, в – $\theta_0 = 90^\circ$

де приемной системы. Максимальное отношение сигнал/помеха при расположении источника вблизи от бортовых аспектов наблюдается для алгоритма, работающего с потоковой компонентой акустического поля (рис. 6). По мере смещения источника к траверсным направлениям эффективность этого алгоритма снижается, а эффективность алгоритмов, использующих скалярную, а также векторную и скалярную компоненты, возрастает. Наименьшую эффективность демонстрирует алгоритм, работающий только со скалярной компонентой поля. При нахождении источника на траверсных направлениях работа по потоковой и векторно-скалярной компоненте дает примерно равные отношения сигнал/помеха. Но при малых отношениях сигнал/помеха на входе приемной системы высокий уровень шумов с ярко выраженными боковыми лепестками в выходном отклике для скалярной и векторно-скалярной компонент препятствует правильной оценке направления, в то время как при работе с потоковой компонентой обеспечивается эффективное подавление структурной помехи и однозначное определение координат источника сигналов (см. рис. 5). Этот эффект объясняется тем, что на входе приемной системы шумовая составляющая по потоковой компоненте минимальна, что подтверждается не только результатами моделирования (см. рис. 3), но и экспериментальными данными, полученными в реальных условиях. Следовательно, разработанный алгоритм обработки сигнала, использующий потоковую компоненту поля, является перспективным и представляет интерес для дальнейших исследований как в теоретическом, так и в экспериментальном плане.

ЛИТЕРАТУРА

1. Levin D., Habets E., Gannot Sh. Maximum likelihood estimation of direction of arrival using an acoustic vector-sensor // *J. Acoust. Soc. Am.* 2012. Vol. 131, No 2. P. 1240–1248.
2. Hawkes M., Nehorai A. Acoustic Vector-Sensor Processing in the Presence of a Reflecting Boundary // *IEEE Trans. on Signal Processing.* 2000. Vol. 48, No 11. P. 2981–2933.
3. Аверьянов А.В., Глебова Г.М., Кузнецов Г.Н. Экспериментальное исследование характеристик направленности векторно-скалярной антенны // *Акуст. журн.* 2011. Т. 57, № 5. С. 681–694.
4. Клячкин В.И. Статистический анализ векторно-фазовых характеристик и акустических полей и алгоритмы их регистрации // *Акуст. журн.* 2004. Т. 50, № 4. С. 516–523.
5. Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Селезнев И.А. Анализ характеристик обнаружения сигнала векторно-скалярной приемной системой антенны // *Гидроакустика.* 2014. Вып. 19 (1). С. 68–78.
6. Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Селезнев И.А. Способ повышения помехоустойчивости цилиндрической гидроакустической антенны // *Гидроакустика.* 2015. Вып. 21 (1). С. 28–35.
7. Гордиенко В.А., Ильичев В.М., Захаров Л.Н. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989. 223 с.
8. Щуров В.А., Щуров А.В. Помехоустойчивость комбинированного акустического приемника // *Акуст. журн.* 2002. Т. 48, № 1. С. 110–119.
9. LI FengHua, ZHU LiangMing, CHEN DeSheng. Temporal gain characteristics of energy flux density in vector sound field // *SciSin-Phys Mech Astron.* 2013. 43(s1). P. 99–105.
10. Клячкин В.И. Вероятностные задачи статистической гидроакустики. Ч. 1: Гранично-контактные задачи. СПб.: Наука, 2007. 629 с.
11. Клячкин В.И., Селезнев И.А. Вероятностные задачи статистической гидроакустики. Т. 2. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 656 с.
12. Маслов В.Л., Будрин С.В. Методы управления акустическими полями в инженерных конструкциях. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. 328 с.
13. Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Селезнев И.А., Харахашьян А.М. Векторно-скалярные акустические поля в ближней зоне вибрирующей пластины // *Гидроакустика.* 2015. Вып. 21 (1). С. 37–45.
14. Урик Л.Д. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 445 с.
15. Cron V.F., Sherman C.H. Spatial-correlation function for various noise models // *JASA.* 1962. Vol. 34. P. 1732.
16. Захаров Л.Н., Кирилов В.А., Рожин Ф.В. Пространственно-корреляционные функции компонент колебательной скорости для двух моделей звукового поля // *Акуст. журн.* 1972. Т. 18, № 1. С. 49–52.
17. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов: пер. с англ. М.: Мир, 1988. 488 с.: ил.
18. Глебова Г.М., Мальцева О.А., Харахашьян А.М. Влияние геометрии вибрирующей пластины на направленность акустических шумов в ближней зоне // *Сб. тр. XVI Всерос. конференции-школы молодых исследователей “Современные проблемы математического моделирования”.* Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2015. С. 51–55.
19. Харахашьян А.М. Исследование направленности излучения шумов, создаваемых вибрирующей пластиной // *IV науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики”:* сб. докл. СПб., 2015. С. 114–118.

