

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОГО ПОЛЯ СТРУКТУРНОЙ ПОМЕХИ

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

Для приемных систем, установленных на борту судна, одним из важнейших типов шумов, дающим значительный вклад в суммарное шумовое поле, является структурная помеха, создаваемая вибрациями элементов корпуса. Разработка, анализ и выбор эффективных алгоритмов обработки сигналов, базирующихся на измерении двух компонент поля, требует знания характеристик векторно-скалярного акустического поля шумов, на фоне которых выполняется обнаружение цели. Такие характеристики обнаружения приемных систем, как вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги, рассчитываются с использованием плотности вероятности сигналов и шумов. Поэтому особый интерес представляют статистические характеристики компонент векторно-скалярного поля. В работе представлены результаты экспериментального исследования характеристик векторно-скалярного шумового поля на приемном элементе, установленном на борту носителя и состоящем из скалярного датчика и трех ортогональных векторных датчиков. Анализируются энергетические и статистические характеристики структурной помехи – как для скалярной и векторных компонент поля, так и для мультипликативной компоненты – потока мощности. Показано, что экспериментальные результаты совпадают с результатами компьютерного моделирования, полученными при расчете характеристик акустического поля методом случайных источников. Как следствие, рекомендуется при проектировании векторно-скалярных приемных систем, устанавливаемых на борту, использовать метод случайных источников, который значительно упрощает расчеты. На основе сравнительного анализа среднеквадратических ошибок оценки компонент поля показана высокая эффективность обнаружения локального источника сигналов при использовании мультипликативной компоненты акустического поля – потока мощности.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что векторно-скалярные приемные системы характеризуются повышенной помехоустойчивостью по сравнению со скалярными приемными системами [1–4]. Это обстоятельство вызывает несомненный интерес и требует дальнейшего всестороннего исследования вопросов, связанных с их практическим использованием. Однако для проектирования акустических приемных систем, устанавливаемых на борту носителя, необходима информация, как о скалярных, так и о векторных характеристиках шумов, исходящих от вибрирующих конструкций носителя. Экспериментальные данные, описывающие характеристики акустического поля, вызванного шумами носителя, практически отсутствуют, а классические методы расчета параметров вибрационных и акусти-

ческих полей пластин для приемников, расположенных на небольшом волновом расстоянии от пластины, встречаются со значительными математическими трудностями. В данной работе для расчета векторно-скалярного акустического поля используется подход, обоснованный в работе [5], где утверждается, что шумы носителя образованы совокупностью сигналов от случайных источников, равномерно распределенных по поверхности пластины (модель случайных источников). В работе [6] показано совпадение характеристик такого метода расчета и классического подхода [7] для энергетических параметров векторно-скалярного акустического поля, что является достаточно убедительным доказательством правомер-

¹ 197376, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 48. Тел.: +7 (812) 3208040, 3208042. E-mail: mfp@mail.wplus.net

² 344090, Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194. Тел.: +7 (863) 243-36-76. E-mail: iphys@sfedu.ru

ности использования метода случайных источников. В данной работе проводится компьютерное моделирование с использованием метода случайных источников, анализируются энергетические и статистические характеристики структурной помехи, выполняется их сравнение с экспериментальными данными.

■ Модель измерений

Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям, выполненным в работе [5], «гипотеза однородной изотропности возмущающих сил рассматривается как удовлетворительное приближение для бортовых мест размещения приемной антенны». Из [5] также следует, что источники возмущающих сил имеют малый радиус корреляции в масштабах длины волны. На основании этого акустическое давление в точке наблюдения может быть рассчитано в виде совокупности сигналов от случайных источников, имеющих направленность монопольного типа, которые равномерно распределены на поверхности пластины. При моделировании структурной помехи в соответствии с моделью случайных источников параметры приемной системы задавались в соответствии с характеристиками экспериментальной системы.

На рис. 1 представлена система координат при расчете акустического поля, создаваемого колебаниями прямоугольной пластины. Измерение векторно-скалярных компонент акустического поля проводится в точке А, совмещенной с началом системы координат и удаленной от пластины на расстояние l . В точке $P(x_i, y_i, z_i)$ находится i -й источник излучения, положение которого в сферической системе координат определяется тройкой величин r_i , φ_i и θ_i (расстояние между точкой наблюдения и точкой излучения, азимут и угол наклона соответственно).

Полагается, что случайные амплитуды источников S_i распределены по закону Рэлея, а начальные фазы – равномерно в интервале $(0 - 2\pi)$. Мнимые и действительные части таких сигналов распределены по нормальному закону. Мощность акустического давления в точке наблюдения А равна $P^2(A) = \sum_{i=1}^{\infty} S_i^2 / r_i^2$.

Измерения выполняются 4-компонентным векторным приемником, состоящим из датчика давления и трех ортогональных векторных датчиков V_x , V_y и V_z , оси которых параллельны осям координат в выбранной системе (рис. 1). В этом случае для расчета сигналов на векторных приемниках необходимо умножить скалярные составляющие, обусловленные вибрациями i -й точки пластины, на

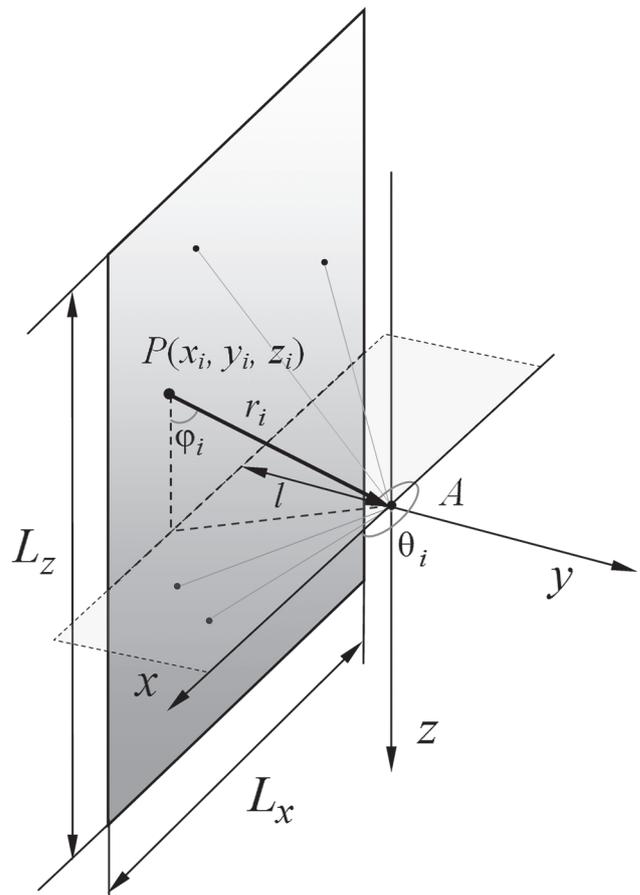


Рис. 1. Система координат, используемая при расчете параметров структурной помехи по методу случайных источников

$\cos\theta_i \cdot \sin\varphi_i$, $\sin\theta_i \cdot \cos\varphi_i$ и $\cos\varphi_i$ для векторных датчиков V_x , V_y и V_z соответственно. Значения векторных компонент поля выражены в эквивалентных единицах звукового давления путем формального умножения значений колебательной скорости на импеданс среды ρc . Сигналы, принимаемые скалярным (P) и векторными датчиками (V_x, V_y, V_z), можно представить в виде вектора: $U^* = (P^*, V_x^*, V_y^*, V_z^*)$.

Используя метод расчета векторно-скалярных компонент принимаемого сигнала в виде совокупности случайных источников, можно рассчитать не только мощности скалярных и векторных компонент, но и матрицу ковариаций как на одиночном векторно-скалярном приемном модуле, так и на приемных элементах антенны. Для гауссовых процессов с нулевым математическим ожиданием матрица ковариаций содержит полную информацию об энергетических, статистических, а для антенны и пространственно-корреляционных характеристиках наблюдаемого процесса [8]. Матрица ковариаций рассчитывается как произведение вектора-столбца на комплексно-сопряженную вектор-строку $K = U \cdot U^*$.

$$K = \begin{pmatrix} P \cdot P^* & P \cdot V_x^* & P \cdot V_y^* & P \cdot V_z^* \\ V_x \cdot P^* & V_x \cdot V_x^* & V_x \cdot V_y^* & V_x \cdot V_z^* \\ V_y \cdot P^* & V_y \cdot V_x^* & V_y \cdot V_y^* & V_y \cdot V_z^* \\ V_z \cdot P^* & V_z \cdot V_x^* & V_z \cdot V_y^* & V_z \cdot V_z^* \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Каждый из четырех диагональных элементов этой матрицы соответствует мощности сигналов на скалярных и векторных приемных элементах, а недиагональные элементы описывают ковариационные зависимости между компонентами векторно-скалярного поля.

■ Характеристики векторно-скалярных компонент акустического поля

Одно из основных теоретических утверждений заключается в том, что сигналы, принимаемые акустическими датчиками давления и колебательной скорости, распределены по нормальному закону. Это утверждение важно, так как существенно используется не только при моделировании и анализе характеристик структурной помехи, но и при построении оптимальных алгоритмов обнаружения, которые требуют знания законов распределения как сигналов от обнаруживаемой цели, так и шумов.

Далее сравниваются характеристики структурной помехи, которые получены экспериментально на векторно-скалярной антенне, установленной на борту носителя, движущегося со скоростью 4 узла, и характеристики, полученные с использованием компьютерного моделирования по методу случайных источников. На рис. 2 представлены построенные по экспериментальным данным плотности вероятности $\Psi(u)$ давления и колебательной скорости – черные кривые. Серые кривые отображают теоретически рассчитанную плотность вероятности для нормального закона распределения со значениями средней величины и дисперсии, полученными из экспериментальных данных. Обработка сигналов выполняется на частоте 1631 Гц, длина временной выборки при расчете коэффициентов Фурье с использованием ДПФ равна 0,02 с.

Гипотеза о принадлежности экспериментально наблюдаемых выборок нормальному распределению была проверена по критерию согласия Колмогорова [9]. При расчете основные параметры нормального распределения – среднее значение и дисперсия – задавались в соответствии с экспериментальными результатами. Расчеты показали, что гипотеза о принадлежности экспериментально наблюдаемых выборок нормальному распределению не отвергается при

вероятности ошибки первого рода (вероятности отклонения верной гипотезы), равной 0,05, 0,05, 0,01, 0,01 для компонент поля P , V_x , V_y и V_z соответственно. Статистическая достоверность того, что эмпирическое распределение соответствует нормальному закону распределения, составляет соответственно 0,95, 0,95, 0,99, 0,99 для компонент поля P , V_x , V_y и V_z .

В табл. 1 приведено значение мощности для векторных приемных элементов, нормированное на мощность сигнала на скалярном приемнике. Размер пластины, создающей структурную помеху, при проведении эксперимента неизвестен. Поэтому при моделировании он выбирался из того факта, что измеренная мощность шума на векторном приемнике, расположенном вдоль оси OX, превышает шум на приемнике, расположенном вдоль оси OZ. В том случае, когда размер пластины по оси OZ несколько меньше размера пластины по оси OX, отношение мощностей сигналов на векторных приемниках V_x и V_z совпадает с экспериментальными данными.

Наилучшее соответствие экспериментальным данным достигается для пластины, у которой размер равен 2 м вдоль оси OX и 1,5 м вдоль оси OZ. При моделировании учитывались также конструктивные особенности векторных приемных элементов, реализованных по измерениям градиентов давления по сигналам с двух соседних близко расположенных скалярных элементов [10]. В экспериментальном модуле расстояние между соседними приемниками,

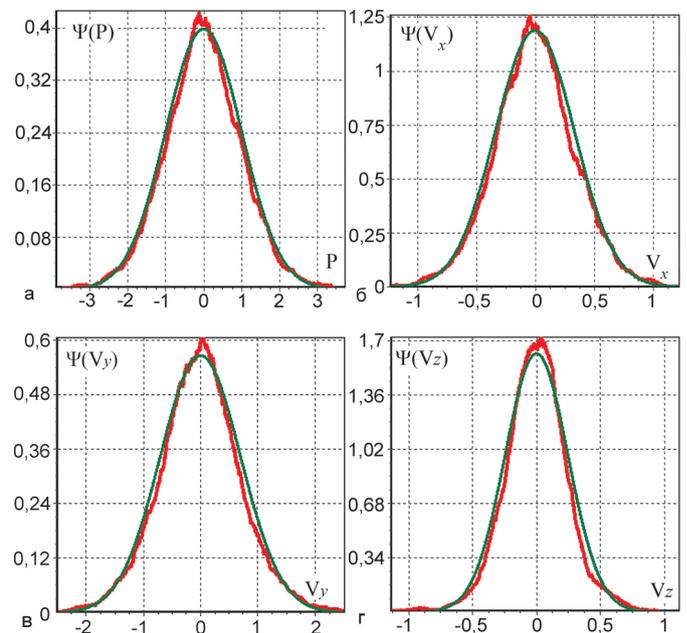


Рис. 2. Плотности вероятности сигнала на приемнике давления (а) и векторных приемных элементах V_x (б), V_y (в) и V_z (г), построенные по экспериментальным данным (красные кривые), и теоретические плотности вероятности (зеленые кривые), частота 1631 Гц

расположенными по оси OX, OY и OZ, составляет 0,10, 0,12 и 0,04 м соответственно. Расчеты для этой модели векторных приемников соответствуют строке «конструктивный» приемник. В табл. 1 также приведены результаты моделирования для случая, когда векторные приемники имеют идеальные характеристики направленности дипольного типа (строка «идеальный» приемник). Полагалось, что приемный модуль находится над геометрическим центром пластины. Для корректного сравнения результатов, полученных различными методами расчета, здесь и далее все данные нормированы на среднее значение мощности давления.

Таблица 1. Мощность сигнала на векторных приемниках

Приемник	V_x^2	V_y^2	V_z^2
Экспериментальный	0,19	0,56	0,15
Конструктивный	0,28	0,52	0,20
Идеальный	0,24	0,54	0,22

Рассчитанные мощности сигналов на приемных элементах векторно-скалярного модуля близки к экспериментальным оценкам. Представляет также интерес определение корреляционных зависимостей между различными компонентами акустического поля. В табл. 2 приводятся результаты для измеренной ковариационной матрицы (1) и для ковариационной матрицы, рассчитанной по модели случайных источников для векторно-скалярных компонент структурной помехи на одиночном модуле. Дополнительно приведены значения для матрицы взаимных корреляций, рассчитанных в соответствии со следующим выражением: $\rho_{ij} = \frac{\text{Re } K_{ij}}{\sqrt{K_{ii} \cdot K_{jj}}}$.

Таблица 2. Ковариационные и корреляционные матрицы

Приемник	Матрица							
	Ковариационная				Корреляционная			
Экспериментальный	1,00	0,14	0,29	0,11	1,00	0,16	0,26	0,15
	0,14	0,19	0,04	0,02	0,16	1,00	0,07	0,05
	0,29	0,04	0,56	0,01	0,26	0,07	1,00	0,10
	0,11	0,02	0,01	0,15	0,15	0,05	0,10	1,00
Конструктивный	1,00	0,12	0,27	0,08	1,00	0,22	0,37	0,17
	0,12	0,28	0,02	0,00	0,22	1,00	0,04	0,01
	0,27	0,02	0,52	0,04	0,37	0,04	1,00	0,12
	0,08	0,00	0,04	0,20	0,17	0,01	0,12	1,00
Идеальный	1,00	0,05	0,72	0,06	1,00	0,09	0,98	0,12
	0,05	0,24	0,02	0,01	0,09	1,00	0,06	0,05
	0,72	0,02	0,54	0,05	0,98	0,06	1,00	0,14
	0,06	0,01	0,05	0,22	0,12	0,05	0,14	1,00

При сравнении представленных результатов можно выделить два факта, отличающие экспериментальные данные и данные для «конструктивного» приемника, с одной стороны, и для «идеального» приемника – с другой стороны. Во-первых, корреляция между сигналами на скалярном и векторном приемнике V_y , направленном по нормали к пластине, для идеального модуля в 3–4 раза больше (сравниваются первые строки корреляционной матрицы). И во-вторых, как следствие, соответствующая потоковая компонента для идеального модуля существенно больше (сравниваются первые строки в матрице ковариаций). Для большей наглядности эти же результаты представлены графически на рис. 3.

Таким образом, видно, что результаты зависят от конструкции векторного приемника, что необходимо учитывать при моделировании структурной помехи и при анализе характеристик обнаружения векторно-скалярной приемной системы.

■ Характеристики потока мощности

Поскольку в ряде работ [2, 3] показано, что алгоритмы обнаружения и оценки параметров, работающие с потоком мощности (потоковой компонентой), имеют повышенную помехоустойчивость, то особый интерес представляют статистические характеристики потока мощности. Для шумов моря, образованных взволнованной поверхностью, сигналы на скалярных и векторных датчиках статистически независимы [11]. Как следствие, среднее значение потока мощности равно нулю, а сам поток распределен по закону Лапласа [12]. Экспериментальные данные, подтверждающие, что потоковая компонента для шумов моря распределена по закону Лапласа, приводятся в работе [13]. Однако в этом случае теоретические

и экспериментальные данные справедливы для шумов, которые создаются, условно говоря, бесконечно большой поверхностью, расположенной симметрично относительно приемной системы. Структурная же помеха образована поверхностью ограниченных размеров. Кроме того, форма поверхности и положение приемной антенны относительно нее могут иметь самую разнообразную геометрию. Ниже приводятся статистические характеристики для потока мощности, полученные по экспериментальным данным. На рис. 4 приведены плотность вероятности потока мощности, построенная по экспериментальным данным, а также теоретические кривые плотности вероятности для распределения Лапласа. Поток мощности рассчитывался как $W_i = PV_i^*$, ($i = x, y, z$), т.е. для трех потоковых компонент, ориентированных по ортогональным осям в выбранной системе координат (см. рис. 1). Необходимо подчеркнуть, что потоки мощности по осям OX и OZ направлены параллельно плоскости пластины, а по оси OY – нормально к ее поверхности. Серые кривые соответствуют теоретически рассчитанной плотности вероятности по закону Лапласа со значениями математического ожидания и дисперсии, полученными по экспериментальным данным, черные – плотностям вероятности

сти, рассчитанным по экспериментальным данным.

Гипотеза о принадлежности экспериментально наблюдаемых выборок распределению Лапласа также была проверена по критерию Колмогорова. При расчете основные параметры нормального распределения – среднее значение и дисперсия – задавались в соответствии с экспериментальными результатами. При заданной вероятности отклонения верной гипотезы, равной 0,01, гипотеза о принадлежности экспериментально наблюдаемых выборок распределению Лапласа не отвергается. Статистическая достоверность того, что эмпирическое распределение соответствует распределению Лапласа, составляет более 0,99. Аналогичные результаты получены и при моделировании для двух моделей векторного модуля: конструктивного и идеального. Статистическая достоверность того, что рассчитанные плотности распределения соответствуют распределению Лапласа, превышает 0,95 для всех трех потоковых компонент поля.

Таким образом, получено экспериментальное подтверждение того, что поток мощности по всем трем ортогональным компонентам с высокой степенью достоверности распределен по закону Лапласа, что, в свою очередь, свидетельствует о статистической независимости сигналов, принимаемых датчиками давления и колебательной скорости.

Как известно, одной из основных характеристик систем обнаружения является отношение сигнал/помеха на выходе приемного устройства.

Для сравнения характеристик обнаружения с использованием датчика давления и одиночного векторно-скалярного модуля воспользуемся классическим соотношением [14]:

$$(s/n)_{out}^2 = \frac{(T_{s+n} - T_n)^2}{\sigma^2(T_n)} \Big|_{\theta=\theta_0}, \quad (2)$$

здесь T_{s+n} – значение выходного сигнала, обусловленное сигналом от локального источника и шумом, T_n – значение выходного сигнала, обусловленное только шумом. С учетом того, что принимаемые сигналы и шум аддитивны, это выражение преобразуется к виду:

$$(s/n)_{out}^2 = \frac{T_s^2}{\sigma^2(T_n)} \Big|_{\theta=\theta_0}. \quad (3)$$

Для приемных антенн расчет выполняется при значении параметра θ , которое равно истинному θ_0 , т.е. совпадает с координатами обнаруживаемого источника. В нашем случае для скалярного приемного элемента, не имеющего направленности, в числителе стоит величина T_s , равная мощности сигнала на выходе приемного устройства, при приеме сигнала только от обнаруживаемого локального источника.

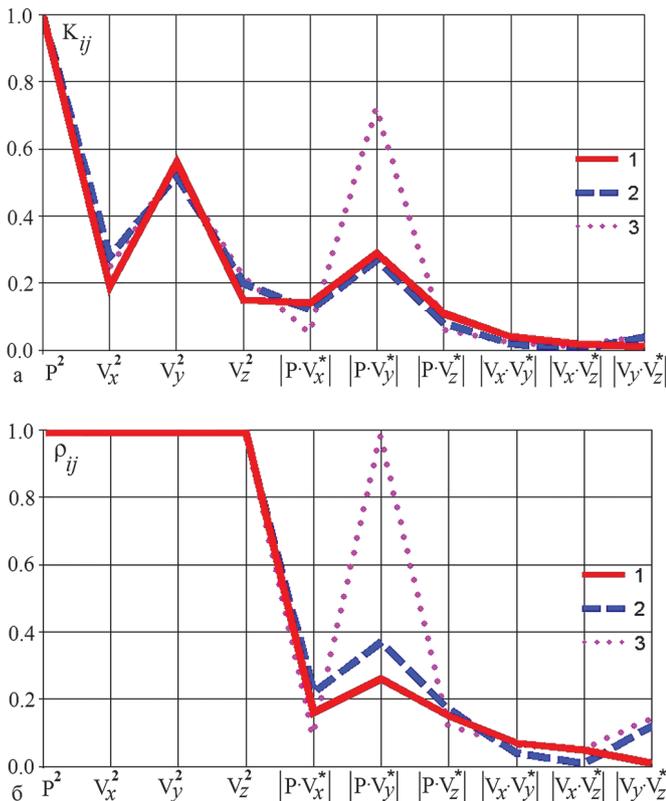


Рис. 3. Значения элементов ковариационной матрицы (а) и корреляционной матрицы (б) для приемников: 1 – экспериментальный, 2 – конструктивный, 3 – идеальный

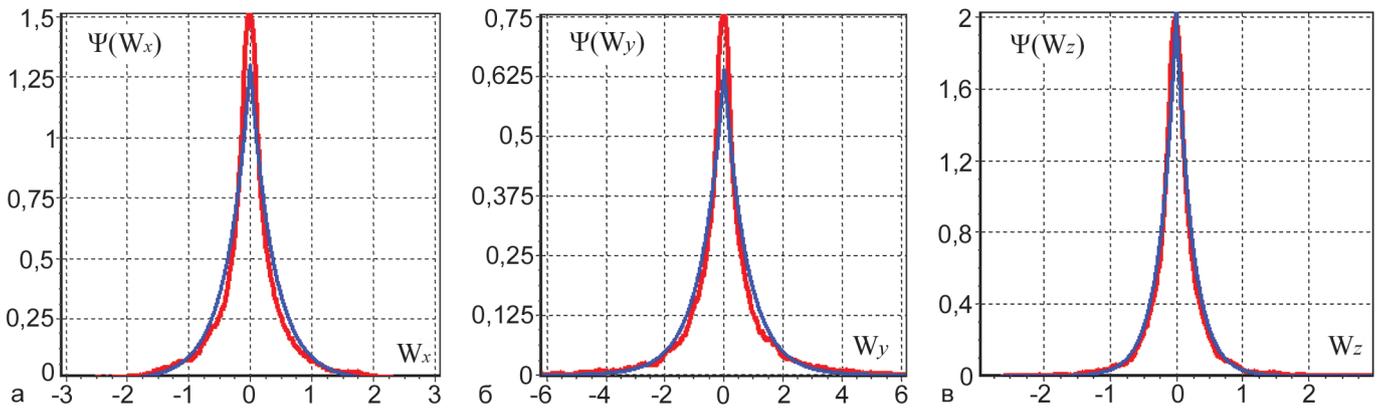


Рис. 4. Плотность вероятности для потока мощности: W_x (а), W_y (б), W_z (в) на частоте 1631 Гц, рассчитанная по экспериментальным данным (красные кривые), и теоретические плотности вероятности (синие кривые)

В общем случае для векторно-скалярного модуля, имеющего три ортогональных векторных датчика, также можно выполнить пространственное сканирование [15] с использованием потоковых компонент. Такой же результат может быть получен, если обнаружение выполняется по одной из компонент потока мощности, для которой направление на локальный источник совпадает с осью этого приемника.

Из приведенного соотношения (3) видно, что отношение сигнал/помеха на выходе обнаружителя тем выше, чем меньше дисперсия мощности помехи, на фоне которой принимается полезный сигнал. Сигнал от локальной цели когерентен по скалярной и векторной компонентам. Следовательно, числитель в выражении (3) принимает одинаковое значение как при работе со скалярной, так и при работе с потоковой компонентой акустического поля. Поэтому при сравнении обнаружителей, работающих по различным компонентам, можно сравнивать значение знаменателя в выражении (3): отношение сигнал/помеха на выходе обнаружителя тем выше, чем меньше дисперсия мощности помехи, на фоне которой принимается полезный сигнал.

Особый интерес представляет изменение этих величин при накоплении информации по времени. Как известно [8], для нормально распределенных сигналов дисперсия мощности этого сигнала убывает обратно пропорционально числу осреднений $\approx 1/N$. Для величин, распределенных по Лапласу, этот закон не выполняется. Поэтому на рис. 5 представлены зависимости дисперсии мощности сигнала на скалярном приемнике и мощности потоковых компонент от числа осреднений для экспериментальных данных, а также для конструктивного и идеального векторно-скалярного модуля. Графики представлены в логарифмическом масштабе.

Как видно из приведенных результатов, скорость убывания дисперсии для всех потоковых

компонент W_x , W_y и W_z значительно выше, чем для мощности давления. Подчеркнем также, что экспериментальные и теоретические данные достаточно хорошо совпадают. Отметим, что при $N = 148$ время наблюдения не превышает 3 с. В течение такого промежутка времени сигнально-помеховую ситуацию можно считать квазистационарной, что важно при работе в реальных условиях. Полученные данные свидетельствуют о том, что алгоритмы обработки, построенные на измерении потока мощности, должны работать более эффективно, чем алгоритмы, использующие только измерение скалярной компоненты поля. Выполненный в работе [16] анализ пространственных спектров и отношения сигнал/помеха на выходе бортовой приемной системы показал преимущество алгоритма, использующего потоковую компоненту векторно-скалярного поля.

ВЫВОДЫ

При синтезе алгоритмов обнаружения с использованием векторно-скалярных приемных антенн, установленных на борту носителя, необходимо знать характеристики структурной помехи, которые изучены недостаточно.

Сравнительный анализ основных энергетических и статистических характеристик векторно-скалярного поля структурной помехи, полученных экспериментально и рассчитанных с использованием модели случайных источников, показал их достаточно убедительное совпадение. Поэтому при проектировании векторно-скалярных бортовых приемных систем можно использовать расчет характеристик структурной помехи по методу случайных источников.

Экспериментально и теоретически показано, что сигналы, создаваемые структурной помехой, на скалярных и векторных датчиках статистически неза-

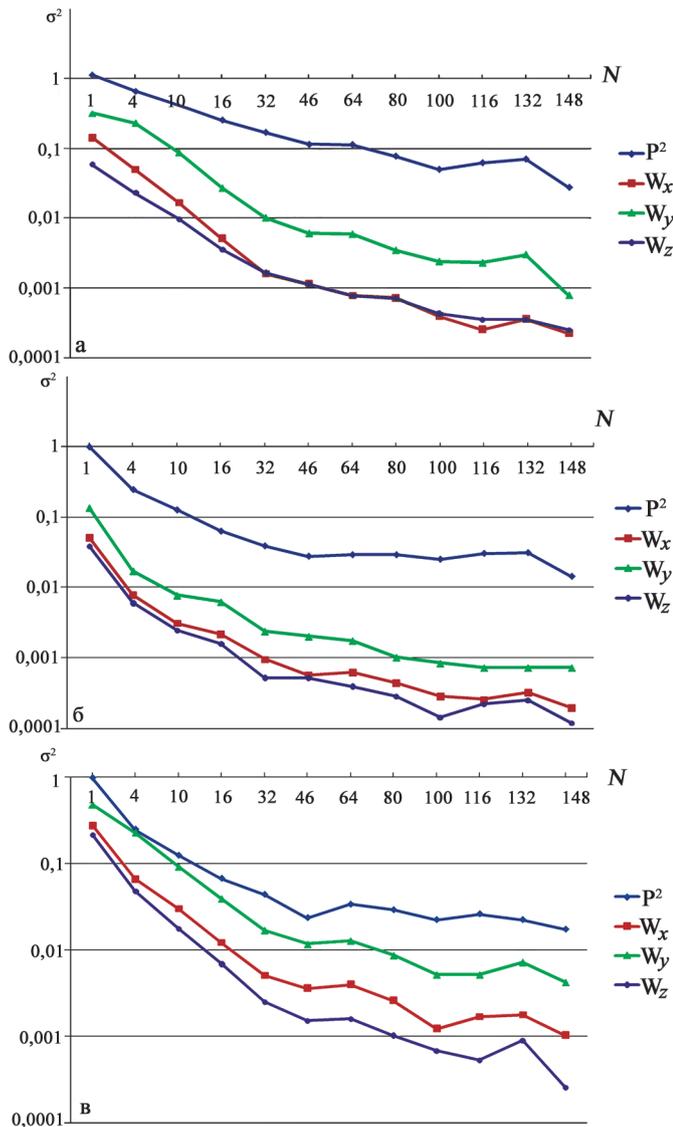


Рис. 5. Зависимость дисперсии от числа осреднений для мощности давления и для трех ортогональных компонент потока мощности: экспериментальные данные (а); расчет по методу случайных источников для конструктивного векторно-скалярного модуля (б); расчет для идеального векторно-скалярного модуля (в)

висимы, а поток мощности имеет плотность распределения Лапласа. Статистические характеристики этого распределения таковы, что при осреднении по времени дисперсия для потоковых компонент акустического поля убывает быстрее, чем дисперсия мощности давления. Как следствие, при накоплении информации за непродолжительное время (несколько секунд) основная характеристика – отношение сигнал/помеха на выходе приемного устройства, работающего по потоку мощности, – может на два порядка превосходить эту характеристику для скалярной приемной системы. Наибольший эффект достигается для приемных систем, у которых векторные приемники имеют дипольную характеристику направленности.

Таким образом, исследование статистических характеристик акустического поля структурной помехи, выполненное в данной работе, показало целесообразность не только создания и использования векторно-скалярных приемных систем, но и эффективность синтеза алгоритмов, работающих по потоку мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щуров В.А., Щуров Ф.В. Помехоустойчивость гидроакустического комбинированного приемника // Акуст. журн. 2002. Т. 48, № 1. С. 110–119.
2. Глебова Г.М., Аверьянов А.В., Кузнецов Г.Н. Экспериментальное исследование характеристик направленности векторно-скалярной антенны // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 5. С. 681–694.
3. Глебова Г.М., Жбанков Г.Н., Селезнев И.А. Анализ характеристик обнаружения векторно-скалярной приемной системой // Гидроакустика. Вып. 19(1). СПб.: Наука, 2014. С. 68–79.
4. Глебова Г.М., Жбанков Г.Н., Селезнев И.А. Способ повышения помехоустойчивости цилиндрической гидроакустической антенны // Гидроакустика. Вып. 21(2). СПб.: Наука, 2015. С. 28–36.
5. Клячкин В.И. Вероятностные задачи статистической гидроакустики. Т.1. СПб.: Наука, 2007. 629 с.
6. Глебова Г.М., Жбанков Г.Н., Харахашьян А.М., Селезнев И.А. Векторно-скалярные акустические поля в ближней зоне вибрирующей пластины // Гидроакустика. Вып. 21(2). СПб.: Наука, 2015. С. 37–45.
7. Маслов В.Л., Будрин С.В. Методы управления акустическими полями в инженерных конструкциях. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. 328 с.
8. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
9. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Постовалов С.Н., Чимитова Е.В. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей: Компьютерный подход. Новосибирск: НГТУ, 2011. 888 с.
10. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
11. Захаров Л.Н., Кириш 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.
12. Воробьев С.Д., Сизов В.И. Векторно-фазовая структура и векторно-фазовый метод описания и анализа случайных акустических полей // Акуст. журн. 1992. Т. 38, № 4. С. 654–660.
13. Селезнев И.А., Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Мальцев А.М., Харахашьян А.М. Вероятностные характеристики обнаружения сигналов одиночным векторно-скалярным модулем // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2 (22). С. 44–49.
14. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. М.: Судостроение, 1978. 445 с.
15. Глебова Г.М., Шимко О.Е. Анализ разрешающей способности одиночного векторно-скалярного гидроакустического модуля // Гидроакустика. Вып. 17(1). СПб.: Наука, 2013. С. 37–45.
16. Селезнев И.А., Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Харахашьян А.М. Характеристики векторно-скалярной приемной бортовой системы // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 2 (24). С. 52–59.