

# ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СКАЛЯРНО-ВЕКТОРНЫХ ПРИЕМНИКОВ ЗВУКА В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ ЛОКАЛЬНЫХ РАЙОНОВ

Ю.В. Матвиенко, Ю.А. Хворостов, В.П. Кулешов

Приведены методы решения задачи обнаружения шумящих объектов пассивными системами контроля подводной обстановки, использующими комбинированные скалярно-векторные приемники звука. Показана перспектива увеличения эффективности этих систем, основанная на возможности определения и контроля углового прихода энергии шумоизлучения объектов, а также определения фазовой структуры наблюдаемых сигналов и использования ее для уменьшения действующих помех. Описан проведенный эксперимент по контролю движения источника широкополосного шума в мелководной акватории и проанализированы особенности его пеленгования такой системой в широком диапазоне углов прихода сигналов.

**Ключевые слова:** пассивная система контроля подводной обстановки, скалярно-векторный приемник звука, вектор потока акустической энергии, фазовая структура звукового поля, обнаружение и пеленгация подводного источника шума.

## Введение

Системы контроля подводной обстановки в локальных районах могут быть построены на основе наблюдения акустических шумовых полей в акватории и выделения энергии широкополосного шума, создаваемого нарушителем. При несанкционированном появлении объекта в охраняемой акватории вызываемые им изменения шумовой обстановки могут фиксироваться акустическими датчиками. Под локальными понимают, например, районы размещения подводных комплексов добычи углеводородов, пункты стоянок или базирования кораблей, районы размещения важных объектов подводной и прибрежной инфраструктуры, которые должны быть защищены от диверсионных угроз. При создании технических средств охраны таких акваторий не ставятся глобальные задачи достижения максимально возможной дальности с использованием сложных многоэлементных антенн с согласованными методами обработки. Более важными для таких систем являются требования компактности, мобильности и обеспечения решения задач назначения при дальностях порядка 5–10 км.

Задачи подобного рода могут решаться активными средствами. Однако активными средствами потенциально можно только зафиксировать факт появления объекта на относительно небольших дистанциях, но невозможно получить представление о его особенностях, что, соответственно, исключает возможность его идентификации. Более перспективными являются пассивные системы со скалярно-векторными приемниками (СВП) звука, совмещающими в одном корпусе обычные приемники звукового давления с приемниками колебательной скорости. Приемник колебательной скорости имеет три ортогональных пространственных канала, ориентированных в рабочей среде так, что один канал служит для измерения вертикальной компоненты, а два других – для измерения горизонтальных компонент вектора колебательной скорости.

Применение СВП в компактных мобильных системах контроля подводной обстановки особенно целесообразно за счет ряда их уникальных возможностей. Ключевой из них является возможность определения углового положения источника шумового сигнала из точки установки приемника. При малых габаритах (значительно меньше длины вол-

ны средней частоты принимаемого шума) они могут обеспечивать угловое разрешение в несколько градусов и при этом сохраняют направленные свойства в широком низкочастотном диапазоне. Системы с СВП потенциально позволяют обнаруживать несанкционированное проникновение объектов в охраняемых районах, контролировать траекторию их перемещения и, по спектральному составу принимаемых сигналов, решать задачи идентификации. В настоящее время ведутся активные работы по созданию таких систем [1]. Размещение на охраняемой акватории нескольких СВП в точках с известными координатами и общая обработка наблюдаемых данных может обеспечить решение задач контроля обстановки.

Эффективность применения СВП в системах контроля определяется эффективностью решения задач обнаружения и определения углового положения источника шумовых сигналов.

Достоинства и недостатки СВП для решения задачи обнаружения подвергнуты тщательному анализу во многих публикациях [2–6]. Бесспорным является вывод о более высокой помехоустойчивости приемных трактов с СВП в сравнении со скалярными приемниками давления – гидрофонами [4]. Количественная оценка этого выигрыша представляется разными авторами по-разному, но всегда определяется структурой действующей помехи, значение которой может быть снижено за счет возможности управления характеристикой направленности приемника [5–6].

Известные методы решения задачи обнаружения при приеме шумовых сигналов неизвестной структуры в системах, использующих СВП, принципиально не отличаются от систем с гидрофонами, основанных на применении энергетического приемника-интегратора и сравнении его выходного сигнала со сформированным порогом. Особенностью обнаружителей с СВП, как показано в [7], является то, что законы распределения энергетических параметров звукового поля, определенные через давление и колебательную скорость, соответствуют распределению Лапласа. Однако при использовании СВП классическая статистическая модель обнаружения может быть дополнена, поскольку приемники обладают рядом уникальных возможностей.

Новый подход к решению задачи обнаружения при применении СВП, основанный на определении частотного и углового спектров плотности потока акустической мощности и энергетическом пороге, был предложен в работе [8]. В таком обнаружителе обеспечивается подавление изотропной помехи, а представленные в работе экспериментальные результаты подтверждают эффективность метода.

В развитие последнего метода подчеркнем особенности СВП, использование которых может значительно увеличить их эффективность именно при обнаружении слабых шумовых сигналов. Во-первых, это возможность определения углового положения источника сигнала из одной точки в широкой полосе частот и учет обстоятельства, что шум от обнаруживаемого источника в диапазоне его частот излучения приходит в точку приема с одного направления. Во-вторых, возможность контроля фазы сигнала между давлением и компонентами колебательной скорости, которая используется для определения структуры формирующихся акустических полей в точке приема, знание которой можно использовать для подавления части помех и разделения наблюдаемых частотных каналов на информативные и помеховые. При этом очевидно, что процедура решения задачи обнаружения движущегося источника широкополосного шума таким приемником не сводится только к контролю и пороговому обнаружению информативного параметра звукового поля, но должна учитывать всю информацию от СВП, доступную на заданном временном интервале.

Рассмотрим далее особенности обработки при обнаружении и пеленговании источника шумового сигнала системой с СВП.

### **1. Применение временного углового распределения энергии для обнаружения шумового сигнала**

Определение углового положения источника сигнала из одной точки в широкой полосе частот с привлечением дополнительных сведений при принятии решений об обнаружении сигнала, включающих контроль устойчивости расчетных угловых характеристик по наблюдаемому частотному диапазону и закономерному изменению угловых характеристик во времени на основе предполагаемой модели движения объекта, рассмотрено в работах [9–11]. В них методы решения задачи обнаружения основаны на анализе время-углового распределения энергии всех частотных составляющих принимаемого шумового сигнала.

При обработке принятого сигнала, основанной на условии относительной стабильности угловых характеристик вектора плотности потока акустической мощности (далее вектор интенсивности) от источника широкополосного шума, по наблюдаемому частотному диапазону формируется угловое распределение суммарных уровней потоков энергии, приходящих в узкие назначенные угловые сектора всей горизон-

тальной плоскости. Пороговый обнаружитель выделяет угловые сектора, в которых уровень энергии превышает среднее значение по всему горизонту. Кроме того, прием слабых сигналов источника обычно идет на фоне случайных помех достаточно высокого уровня, действующих как в спектральной полосе шумов источника, так и вне ее и отличающихся от полезных сигналов различными угловыми приходами. Поэтому задача обнаружения на основе сравнения энергий угловых секторов со средней энергией по горизонту решается с использованием предварительной нормализации входного принятого сигнала за счет подавления спектральных компонент высокого уровня.

Обработка реализуется с использованием быстрого преобразования Фурье, которое служит для получения спектров комплексных амплитуд звукового давления  $P(\omega)$  и трех ортогональных компонент вектора колебательной скорости  $V_i(\omega)$ ,  $i=x,y,z$ .

Далее по спектрам выполняется расчет энергетических параметров, определяются три текущие компоненты вектора интенсивности потока энергии  $I_i(\omega)$ :

$$I_i(\omega) = P(\omega) \times V_i^*(\omega) = \text{Re } I_i(\omega) + j \text{Im } I_i(\omega)$$

и формируются их развертки во времени – трехмерные энергетические сонограммы, изображающие модули компонент в координатах «время–частота».

Следующий шаг – расчет массива направлений приходящих потоков энергии для каждой частоты. Сначала для частот выполняется осреднение реальных частей горизонтальных компонент вектора интенсивности потоков:

$$\bar{I}_X(\omega) = \langle \text{Re } I_X(\omega) \rangle \quad \text{и} \quad \bar{I}_Y(\omega) = \langle \text{Re } I_Y(\omega) \rangle,$$

затем рассчитываются направления прихода потоков  $\beta(\omega)$  в локальной системе координат СВП (углы против часовой стрелки относительно оси канала X) по формуле:

$$\beta(\omega) = \arctg \frac{\bar{I}_Y(\omega)}{\bar{I}_X(\omega)}$$

с учетом знаков числителя и знаменателя дроби.

Далее формируется мгновенное угловое распределение энергии для всех частот наблюдаемого диапазона путем суммирования в узких назначенных угловых секторах энергий потоков  $\bar{I}(\omega)$ :

$$\bar{I}(\omega) = \sqrt{[\bar{I}_X(\omega)]^2 + [\bar{I}_Y(\omega)]^2},$$

направления прихода которых попадают в один и тот же сектор. В итоге от классической энергетической

сонограммы «время–частота» переходим к сонограмме время-углового распределения с изображением принимаемой энергии в координатах «частота–угол прихода в горизонтальной плоскости», определенной с заданным усреднением. В сонограмме время-углового прихода потока энергии выделяется доминирующий угловой сектор с максимальной величиной секторной энергии, принимается решение о наличии источника широкополосного шума по уровню превышения и устойчивости превышения величины энергии доминирующего углового сектора порогового значения – средней энергии секторов горизонта, а также по соответствию временной изменчивости ориентации доминирующего углового сектора предполагаемой динамике движения источника. По ориентации доминирующего сектора принимается решение об угловом направлении на источник.

Итогом обработки являются показатель превышения энергии доминирующего углового сектора над средним по горизонту, взвешенная оценка принятого направления на источник шума и параметры спектрального состава сигнала, формирующие совокупную энергию по принятому направлению.

На конечном этапе отслеживаются изменения сформированных оценок во времени и принимается окончательное решение об обнаружении источника с определением пеленга на него и спектрального состава его шума.

Применение изложенного алгоритма для обработки реальных данных, рассмотренного в работе [11], показало его хорошую эффективность.

## 2. Учет фазовой структуры звукового поля для обнаружения шумового сигнала

В случае применения СВП энергетические параметры контроля звукового поля, определенные через компоненты вектора интенсивности потока энергии, более информативны, поскольку при идентичности сигнальных составляющих несут различные помеховые, что связано с различной пространственной зависимостью помеховых составляющих в каналах СВП. Фактически увеличение отношения сигнал/помеха на выходе системы обработки сигналов СВП формируется не только за счет когерентного сложения и накопления энергии сигнала, но и дополнительно за счет уменьшения влияния действующей помехи. Последнее реализуется или увеличением времени обработки в случае, если структура помехи близка к изотропной, или формированием направленного приема для подавления анизотропной помехи с ярко выраженным пространственным положением.

Уменьшение влияния действующих помех может быть получено с использованием дополнительной информации о структуре звукового поля движущегося источника широкополосного шума путем расчета и учета фазовых характеристик сигнала на всех частотах (разности фаз между давлением и компонентами колебательной скорости). Векторно-фазовые методы акустики уже достаточно давно освоены и открывают новые возможности для исследования звуковых полей [12, 13]. Анализ динамики фазовой структуры в широком частотном диапазоне, может быть использован при обнаружении слабых сигналов. Оценки дополнительных возможностей предварительной фильтрации принимаемого сигнала за счет анализа его фазовой структуры основаны на работах Щурова В.А. и Дзюбы В.П. В их работах [2, 5, 12] анализируются фазовые соотношения между давлением и компонентами колебательной скорости, установлена их связь со структурой акустического поля, сформированного в точке приема, – уровнями действующих изотропных и анизотропных помех, соотношения энергий бегущих и стоячих волн. При этом процедуры обработки основаны на том, что знание фазовой структуры позволяет представить энергию звукового поля в виде суперпозиции трех составляющих [5]:

1) энергии изотропного (диффузного) шума, который имеет нулевой средний вектор интенсивности потока энергии в горизонтальной плоскости и является помехой приему сигналов от шумящего объекта. Источники этого шума формируют случайные, статистически не связанные сигналы звукового давления и горизонтальных компонент колебательной скорости с равномерной плотностью распределения фаз/разности фаз в пределах  $0-2\pi$ .

2) потока энергии плоских бегущих волн (анизотропная энергия поля), которые имеют отличный от нуля средний вектор интенсивности потока энергии и формируют сигналы звукового давления и горизонтальных компонент колебательной скорости с разностью фаз  $0/\pi$  в зависимости от направления прихода волны. Источником бегущих волн является звук от шумоизлучения сосредоточенных объектов. Отношение горизонтальных компонент вектора интенсивности потока энергии, кроме того, характеризует направление на источники сигналов.

3) энергии стоячих волн, которые имеют нулевой средний вектор потока энергии в горизонтальной плоскости и сложную пространственную структуру в зависимости от количества источников и лучей распространения звука от них, а также углов прихода лучей. Стоячие волны формируют сигналы звукового давления и горизонтальных компонент колеба-

тельной скорости частиц водной среды с разностью фаз  $\pi/2$ . Источник энергии стоячих волн – звук от шумоизлучения сосредоточенных объектов при многолучевом распространении.

На основе такого представления задачу обнаружения шумового источника следует решать по совокупности энергий бегущих и стоячих волн от него, определенных условием когерентности звукового давления и горизонтальных компонент колебательной скорости. Это обеспечивает повышение помехоустойчивости приемной системы за счет подавления значительной части диффузной (изотропной) помехи и дает возможность разделения сформированных частотных каналов на информативные и помеховые. При этом определение направления на источник следует проводить по потокам энергии бегущих волн.

Поэтому для обнаружения шумовых источников в качестве информативного энергетического параметра обнаружения целесообразно использовать известную функцию частотной когерентности, а алгоритм обработки данных в каждом частотном канале для трех компонент вектора интенсивности потока энергии дополнить вычислением нормированных функций когерентности  $\gamma_i^2(\omega)$  по формуле:

$$\gamma_i^2(\omega) = \frac{\langle |I_i(\omega)|^2 \rangle}{\langle |P(\omega)|^2 \rangle \cdot \langle |V_i(\omega)|^2 \rangle}.$$

Для дальнейшей обработки выделяются информативные частотные каналы  $\omega_k$ , в которых хотя бы для одной компоненты вектора интенсивности потока энергии значения функций когерентности превышают задаваемый порог. Частотные каналы с низким уровнем когерентности по определению считаются помеховыми. По выделенным информативным частотным каналам значение функций когерентности становится параметром, по которому ведется дальнейшее обнаружение. При этом функции когерентности дают количественные оценки структуры наблюдаемого шумового поля с подавлением диффузной (изотропной) помехи. На основании оценок выполняется частотная фильтрация энергетических параметров, служащих при дальнейшей обработке для формирования время-углового распределения прихода энергии по алгоритму, описанному в предыдущем разделе, с целью определения направления на шумящий источник и принятия решения об его обнаружении и пеленге.

В целом алгоритм обнаружения источника широкополосного шума реализуется путем последовательного учета названных особенностей СВП. В обработке обеспечивается выделение частотных каналов

с высокой когерентностью, в которых преобладает энергия бегущих звуковых волн и выделение потоков энергии от источника в определенном угловом секторе, значение которого в течение процесса обнаружения должно соответствовать предполагаемой динамике движения источника.

### 3. Анализ экспериментальных данных

Проверка предложенных выше методов была выполнена при обработке реальных данных. В проведенном эксперименте приемная система с СВП была установлена в мелком море с глубиной места около 100 м и вела запись шумов акватории в течение времени движения источника широкополосного шума.

Источник перемещался в акватории по достаточно прямолинейной траектории с равномерной скоростью около 3 м/с в течение 2 часов. В ходе эксперимента угловая ориентация СВП практически оставалась неизменной, контролировалась компасом системы – курс оси канала X приемника составлял  $335^\circ$ , при этом источник наблюдался в широком секторе ожидаемых углов прихода энергии.

На рис. 1 приведены сонограммы шумовой энергии в акватории при перемещении источника в течение всего времени его движения, определенные по квадрату давления (а) и Y - ой компоненте вектора интенсивности (б).

На сонограммах отмечается отчетливая интерференционная картина, симметричная относительно траверсного времени  $t_0 = 14:30:30$ , которая, очевидно, связана с симметричным доплеровским сдвигом частот относительно траверса движущегося источника. Как видно из рисунка, обнаружение источника за счет превышения энергетических порогов реализуется достаточно легко. Например, при пороге в 95 дБ уверенная зона обнаружения по обеим сонограммам лежит в интервале времени 14:10÷14:50.

Однако из анализа фазовой структуры принимаемых сигналов, изображенных в виде сонограмм в координатах «время–частота» на рис. 2 и сделанных на их основе расчетах сонограмм нормированных функций когерентности (рис. 3) можно увидеть, что диапазон времени, в течение которого ведется прием когерентных сигналов, существенно увеличивается. Например, при пороговом значении нормированной функции когерентности, равном

0,7, по выделенным информативным частотным каналам источник обнаруживается в течение всего времени нахождения на акватории. При этом фазовая картина показывает, что от точки старта уверенный прием идет по каналу Y, в диапазоне низких (менее 200 Гц) частот прием имеет низкие значения когерентности и значительную шумовую помеху, а на максимальных дистанциях прием наиболее информативен в диапазоне 300–500 Гц.

По каналу X в течение времени наблюдения фаза симметрична относительно времени минимума характеристики направленности (ХН) по каналу Y и близка к нулевым значениям (преобладание бегущих волн). С увеличением дальности (более ранний период относительно времени 14:10) распределение фазы канала X становится фактически слу-

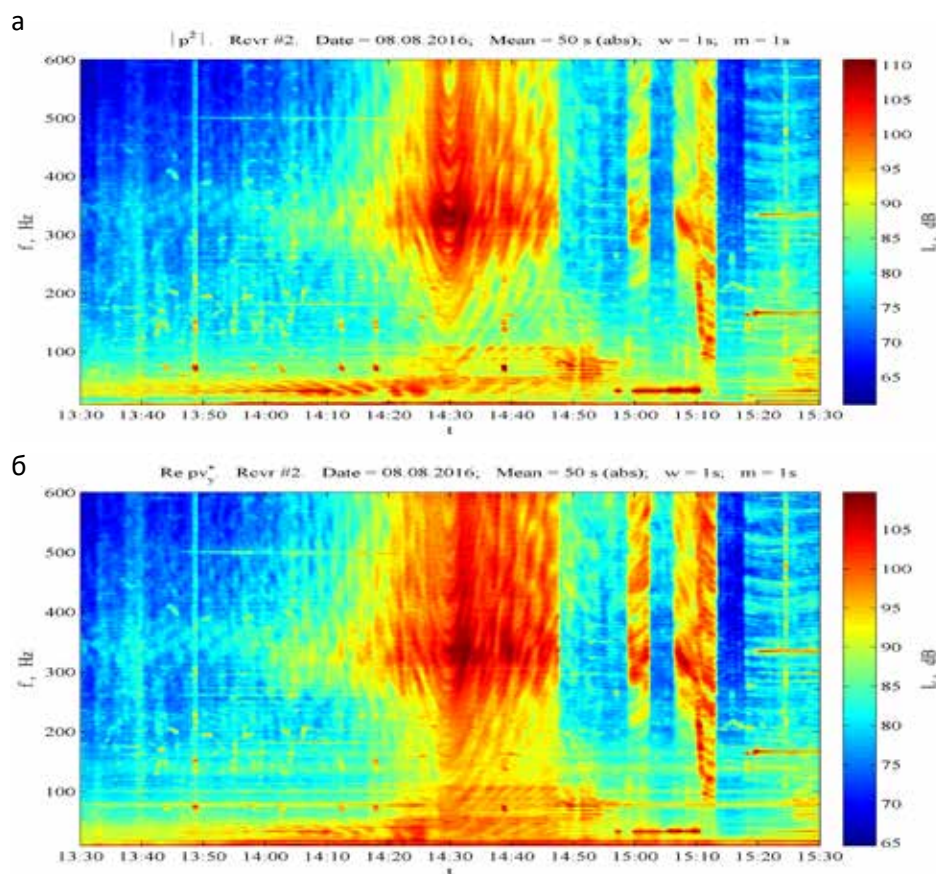


Рис. 1. Энергетические сонограммы наблюдаемого шумового поля

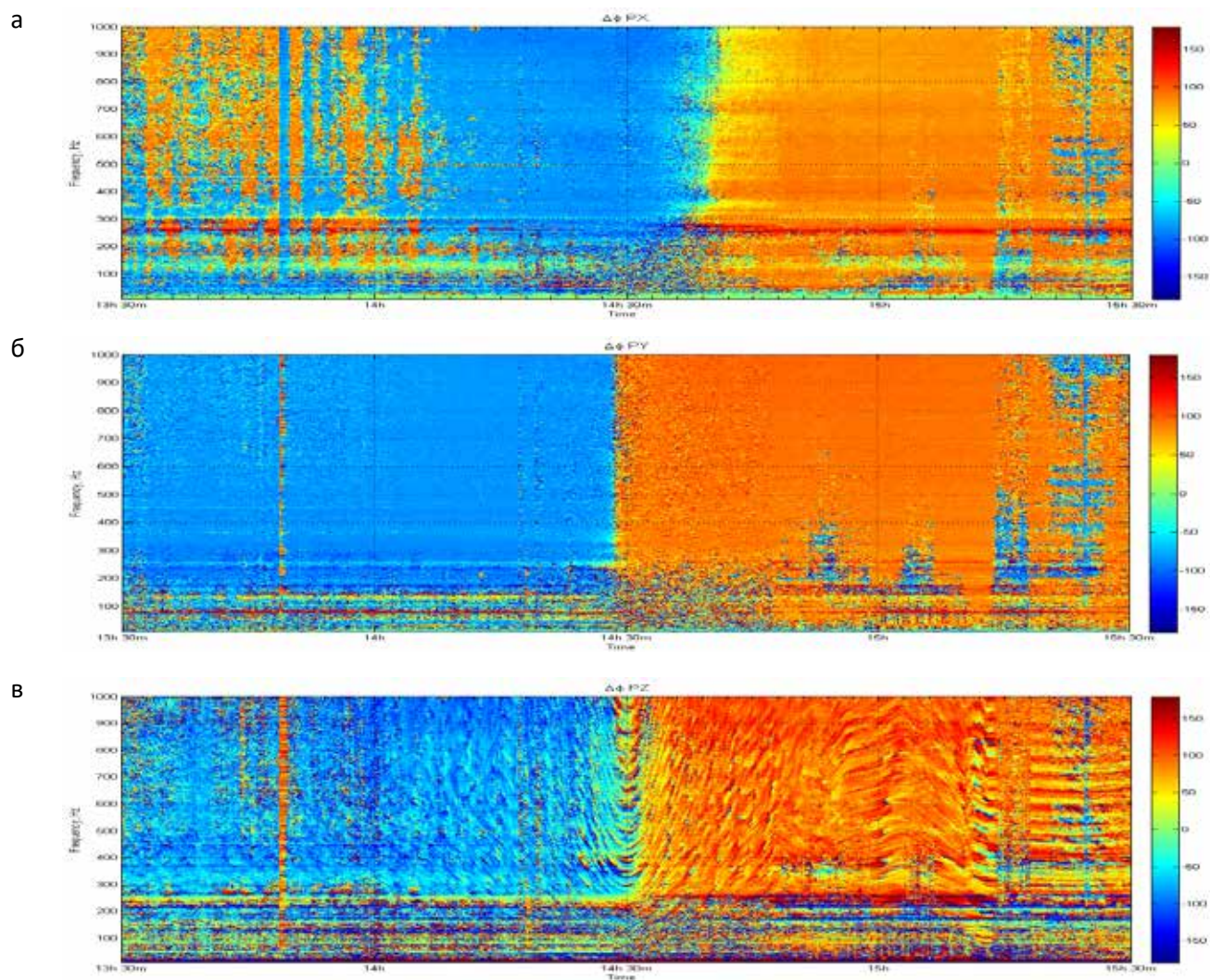


Рис. 2. Фазовые сонограммы между давлением и компонентами колебательного ускорения в координатах «частота-время»: а –  $\Delta\varphi_{px}$ ; б –  $\Delta\varphi_{py}$ ; в –  $\Delta\varphi_{pz}$

чайным и обусловлено низкой чувствительностью канала. При этом за счет ориентации канала Y прием источника на больших дистанциях ведется в зоне максимальной чувствительности канала, его фаза близка к нулевым значениям, что позволяет уверенно решать задачи обнаружения на всех дистанциях эксперимента с использованием нормированной функции когерентности, определенной через звуковое давление и Y-ю компоненту колебательной скорости.

Кроме того, характер изменения фазы по каналам СВП и возможность определения моментов времени, в которых происходит изменение фазы на  $180^\circ$ , позволяет определить предполагаемую прямолинейную траекторию движения источника шума относительно известной угловой ориентации приемника. Эти данные могут быть полезны для оценки характеристик пеленгования. Для этого рассмотрим более подробно

полученные фазовые зависимости. На рис. 4 приведены зависимости фазы от текущего времени в горизонтальных каналах приемника для одной из частот, изображенных на сонограмме рис. 2.

Изменение фазы на  $180^\circ$  указывает на переход угла прихода сигналов от источника через минимумы характеристик направленности соответствующих каналов СВП. Определяя моменты времени  $t_x$  изменений фазы на  $180^\circ$  в канале X и  $t_y$  в канале Y, можно определить положение нормали к треку движения источника относительно углового положения приемника.

Схема движения источника поясняется рис. 4.

Далее можно ориентировочно рассчитать траверсное расстояние, время и дальности для характерных участков контроля источника, оценить работу СВП в режиме его пеленгования.

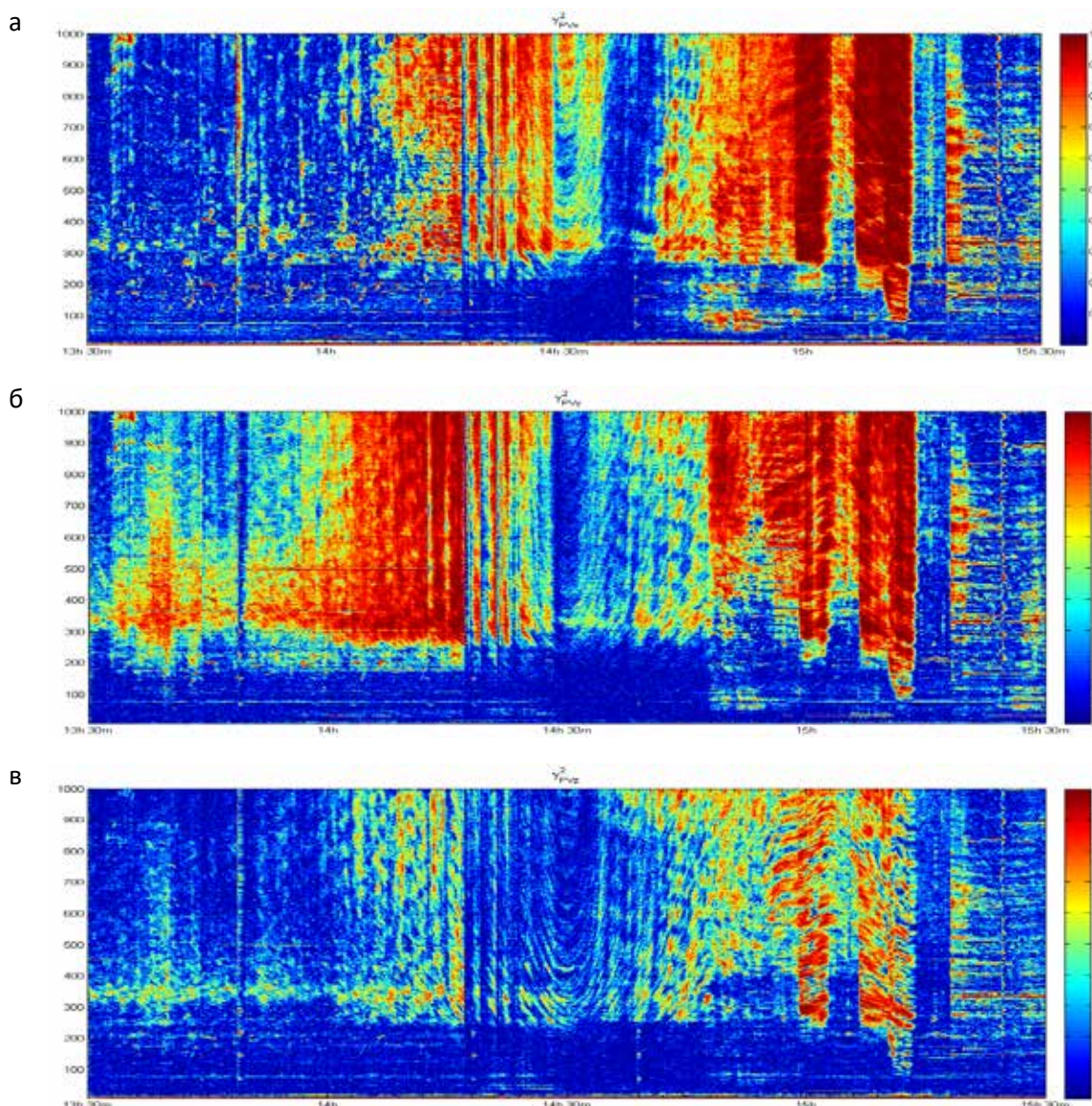


Рис. 3 Функции когерентности для компонент вектора интенсивности: а)  $-\gamma_{P_{V_x}}^2$ , б)  $-\gamma_{P_{V_y}}^2$ , в)  $-\gamma_{P_{V_z}}^2$

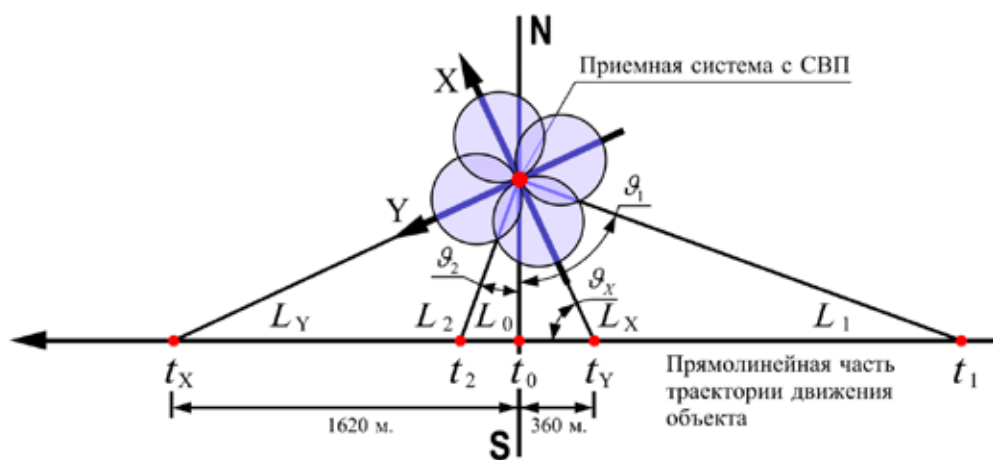


Рис. 4. Схема прямолинейного галса эксперимента

Из рисунка 5 устанавливаем, что  $t_x=14:39:30$  – время перехода источника через минимум характеристики направленности канала X,  $t_y=14:28:30$  – время перехода через минимум характеристики направленности канала Y. Тогда общий прямолинейный путь источника при скорости 3 м/с от зоны минимума характеристики направленности в канале Y к зоне минимума в канале X составляет 1980 м, в том числе соответствующие расстояния от траверсной точки – 360 м и 1620 м. Этих данных достаточно для определения угла наклона оси канала X к нормали траектории движения источника, который равен  $\vartheta_x=65^\circ$ , и через него определяем траверсное расстояние, которое составляет  $L_0=770$  м.

Учитывая, что источник шума перемещался прямолинейным галсом с постоянной скоростью, исходя из пространственного расположения оси канала X –  $335^\circ$ , возникает возможность вычислить курс движения источника шума, который составляет  $270^\circ$  и абсолютно совпадает с заданными условиями проведения эксперимента (рис. 5).

Углы прихода  $\vartheta_1=70^\circ$  и  $\vartheta_2=20^\circ$  относительно нормали к траектории соответствуют нахождению источника в зонах равной чувствительности каналов X и Y. По пройденному пути можно установить моменты времени равной пространственной чувствительности по каналам X и Y, которые составят соответственно  $t_1=14:18:30$  и  $t_2=14:31:00$ . В это время источник находится на дальностях  $L_1=2250$  м и  $L_2=820$  м. Можно ожидать, что в этих точках точность пеленгования должна быть высокой, причем за счет меньшей дальности и соответственно большего отношения сигнал/шум, при  $t_2=14:31:00$  точность должна быть максимальной за все время наблюдения. В моменты времени  $t_x=14:39:30$  и  $t_y=14:28:30$  определены также дальности источника при его нахождении в зонах максимальной чувствительности каналов X и Y и, соответственно, минимальной в каналах Y и X, которые составляют  $L_x=850$  м,  $L_y=1820$  м. В эти моменты времени должна наблюдаться пониженная точность пеленгования.

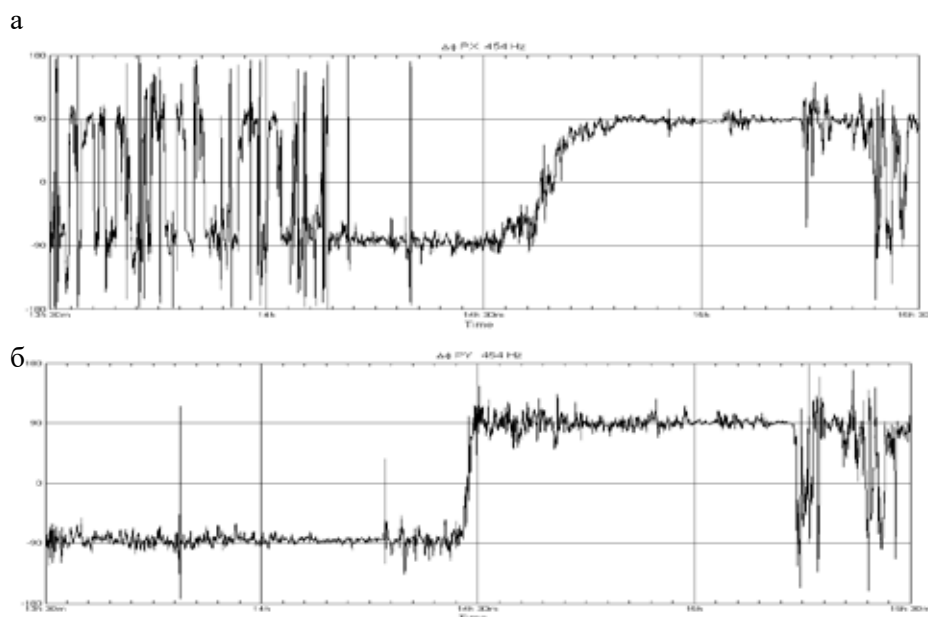


Рис. 5. Зависимость фазы на частоте 454 Гц между давлением и компонентами колебательного ускорения в течение всего времени эксперимента: а –  $\Delta\varphi_{px}$ ; б –  $\Delta\varphi_{py}$

Приведенные оценки подтверждаются расчетами пеленга источника приемной системой, выполненными в различных частотных диапазонах и представленными на сонограммах рис. 6. Цветовая палитра рисунка устанавливает энергетический уровень сигналов.

Из рисунка видно, что диапазон изменения пеленга достаточно большой и проявляется значительная зависимость точности пеленга от текущего его значения (направления на источник относительно осей каналов СВП). Большая ошибка формируется при приеме сигнала в угловых секторах, центры которых совпадают с направлением ортогональных осей горизонтальных каналов приемника, когда один из каналов обладает малой чувствительностью и дает значительную ошибку измерения уровня полезного сигнала.

Пеленгование остается достаточно удовлетворительным на временном интервале графика движения  $14:05 \div 14:50$ . Для времени, предшествующего 14:05, большой рост дисперсии пеленга обусловлен дальнейшим падением угловой чувствительности по каналу X и общим уменьшением отношения сигнал/шум из-за большей дальности.

В целом при практическом применении пеленг в каждый момент времени определяется осреднением расчетных пеленгов по выделенным частотным каналам, что уменьшает дисперсию в зоне уверенного пеленгования (в нашем случае от 14:05 до 14:50).



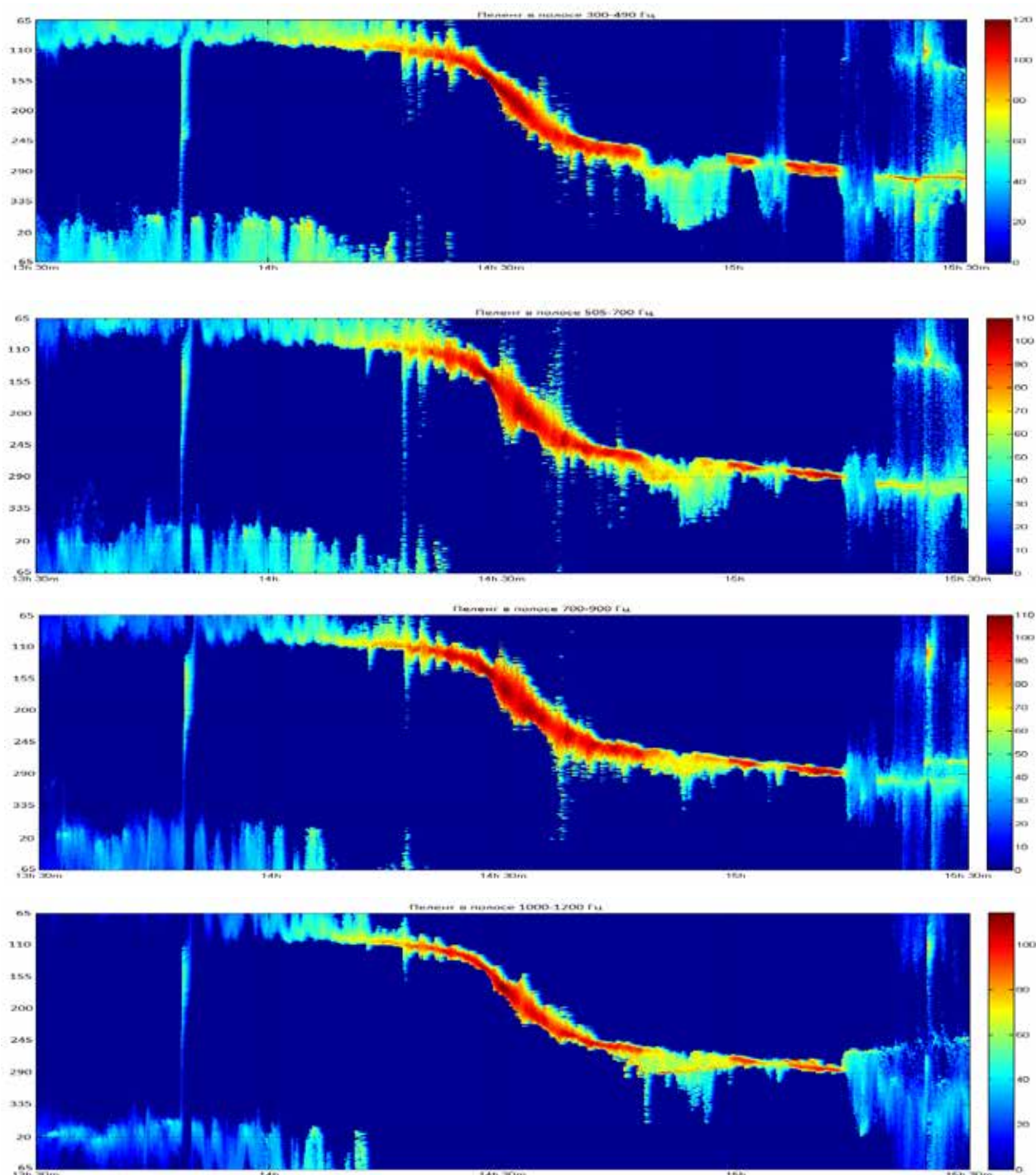


Рис. 6. Пеленг относительно севера на источник шума в течение времени наблюдения в различных частотных диапазонах, сверху вниз: 300÷490 Гц; 505÷700 Гц; 700÷900 Гц; 1000÷1200 Гц

## Заключение

Предложенный алгоритм решения задач обнаружения, выделения спектральных компонент информативного шума и пеленгования на основе расчета угловых характеристик прихода энергии широкополосного источника и учета фазовой структуры акустического поля в точке проверен при анализе экс-

периментальных данных по контролю перемещения источника широкополосного шума в мелководной акватории и подтвердил хорошие возможности скалярно-векторных приемников при их применении в системах контроля подводной обстановки локальных районов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В., Глушенко М.Ю., Кузькин В.М., Переселков С.А. Экспериментальные исследования системы обнаружения малошумных подводных целей в мелководных акваториях // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 3 (41). С. 44–49.
2. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 307 с.
3. Каришнев Н.С., Кузнецов Г.Н., Луньков А.А. Обнаружение и оценка координат шумового источника в мелком море с использованием скалярной или скалярно векторной антенны и согласованной фильтрации // Гидроакустика. 2014. № 20. С. 74–80.
4. Смарышев М.Д. О помехоустойчивости комбинированного акустического приемника // Акуст. журн. 2005. Т. 51, № 4. С. 558–559.
5. Дзюба В.П. Скалярно-векторные методы в теоретической акустике. Владивосток: Дальнаука, 2006. 194 с.
6. Гордиенко В.А., Гордиенко Е.Л., Краснописцев Н.А., Некрасов В.Н. Помехоустойчивость гидроакустических приемных систем, регистрирующих поток акустической мощности // Акуст. журн. 2008. Т. 54, № 5. С. 774–785.
7. Селезнев И.А., Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Мальцев А.М., Харахашьян А.М. Вероятностные характеристики обнаружения сигналов одиночным скалярно-векторным модулем // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2 (22). С. 44–49.
8. Захаров К.Л. Частотно-угловые характеристики гидроакустического сигнала при использовании векторно-фазового метода // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление: электронное научное издание. 2014. Т. 10, № 3 (24). Ст. 7. – URL: [www.gypravlenie.ru](http://www.gypravlenie.ru).
9. Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В. Способ обнаружения подводного источника широкополосного шума: патент 201901778 РФ. № 2699923; заявл. 23.01.2019; опубл. 11.09.2019, Бюл. № 24.
10. Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В. Способ обнаружения подводного источника широкополосного шума: патент 2019121077 РФ. № 2715431; заявл. 03.07.2019; опубл. 28.02.2020, Бюл. № 4.
11. Матвиенко Ю.В., Каморный А.В., Хворостов Ю.А. Об одном подходе к решению задачи обнаружения подводного источника шумовых сигналов // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2 (26). С. 37–43.
12. Щуров В.А. Движение акустической энергии в океане. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2019. 204 с.
13. Гордиенко В.А., Ильичев В.И., Захаров Л.Н. Векторно-фазовые методы в акустике. М: Наука, 1989. 223 с.

## Об авторах

**МАТВИЕНКО Юрий Викторович**, д.т.н., главный научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

**Научные интересы:** подводная робототехника, гидроакустическая навигация, гидроакустические комплексы и системы

Тел.: +79089821389

E-mail: [ymat33@yandex.ru](mailto:ymat33@yandex.ru)

ORCID: 0000-0002-4486-3719

**ХВОРОСТОВ Юрий Анатольевич**, ведущий конструктор

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

**Научные интересы:** акустика океана, прикладная гидроакустика, векторно-скалярные гидроакустические системы, локация и обнаружение источников звука

Тел.: +79147036723

E-mail: [oss.dvfu@mail.ru](mailto:oss.dvfu@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-4805-3051

**КУЛЕШОВ Владимир Павлович**, научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

**Научные интересы:** акустика океана, векторно-скалярные гидроакустические системы, обнаружение источников звука

Тел.: 8(423)2312854

E-mail: [986022@mail.ru](mailto:986022@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-4805-3017

## Для цитирования:

Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Кулешов В.П. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СКАЛЯРНО-ВЕКТОРНЫХ ПРИЕМНИКОВ ЗВУКА В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ ЛОКАЛЬНЫХ РАЙОНОВ // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 4 (42). С. 4–15. DOI: 10.37102/1992-4429\_2022\_42\_04\_01. EDN: CAMOFW.



# PECULIARITIES OF APPLICATION OF SCALAR-VECTOR SOUND RECEIVERS IN SYSTEMS FOR CONTROL OF UNDERWATER SITUATION IN LOCAL AREAS

**Yu.V. Matvienko, Yu.A. Khvorostov, V.P. Kuleshov**

The article presents methods for solving the problem of detecting noisy objects by passive systems for monitoring the underwater situation using combined scalar-vector sound receivers. The prospect of increasing the efficiency of these systems is shown, based on the possibility of determining and controlling the angular arrival of the noise emission energy of objects, as well as determining the phase structure of the observed signals and using it to reduce the existing interference. An experiment is described to control the movement of an object of broadband noise in a shallow water area and the features of its direction finding by such a system are analyzed in a wide range of signal arrival angles.

**Keywords:** passive underwater environment monitoring system, scalar-vector sound receiver, acoustic energy flux vector, phase structure of the sound field, detection and direction finding of an underwater noise source.

## References

1. Matvienko Yu.V., Khvorostov Yu.A., Kamorny A.V., Glushenko M.Yu., Kuzkin V.M., Pereselkov S.A. Experimental studies of the system for detecting low-noise underwater targets in shallow waters. *Underwater investigations and robotics*. 2022. N 3 (41). P. 4–14.
2. Shchurov V.A. *Vektornaya akustika okeana*. Vladivostok: Dalnauka, 2003. 307 p.
3. Karishnev N.S., Kuznecov G.N., Lun'kov A.A. Obnaruzhenie i ocenka koordinat shumovogo istochnika v melkom more s ispol'zovaniem skalyarnoj ili skalyarno vektornoj anteny i soglasovannoj fil'tracii. *Gidroakustika*. 2014. No. 20. P. 74–80.
4. Smaryshev M.D. O pomekhoustojchivosti kombinirovannogo akusticheskogo priemnika. *Akust. zhurn.* 2005. Vol. 51, No. 4. P. 558–559.
5. Dzyuba V.P. *Skalyarno-vektornye metody v teoreticheskoy akustike*. Vladivostok: Dalnauka, 2006. 194 p.
6. Gordienko V.A., Gordienko E.L., Krasnopiscev N.A., Nekrasov V.N. Pomekhoustojchivost' gidroakusticheskikh priemnykh sistem registriruyushchih potok akusticheskoy moshchnosti. *Akust. zhurn.* 2008. Vol. 54, No. 5. P. 774–785.
7. Seleznev I.A., Glebova G.M., Zhibankov G.A., Mal'cev A.M., Harahash'yan A.M. Veroyatnostnye karakteristiki obnaruzheniya signalov odinochnym skalyarno-vektornym modulem. *Underwater investigations and robotics*. 2016. No. 2 (22). P. 44–49.
8. Zaharov K.L. Chastotno-uglovyye karakteristiki gidroakusticheskogo signala pri ispol'zovanii vektorno-fazovogo metoda. *Elektronnoe nauchnoe izdanie «Ustojchivoe innovacionnoe razvitiye: proektirovanie i upravlenie»*, www.rypravlenie.ru. 2014. Vol. 10, No. 3 (24). P. 7.
9. Matvienko Yu.V., Hvorostov Yu.A., Kamornyj A.V. Sposob obnaruzheniya podvodnogo istochnika shirokopolosnogo shuma: patent 201901778 RF. N 2699923; zayavl. 23.01.2019; opubl. 11.09.2019, Byul. No. 24.
10. Matvienko Yu.V., Hvorostov Yu.A., Kamornyj A.V. Sposob obnaruzheniya podvodnogo istochnika shirokopolosnogo shuma: patent 2019121077 RF. № 2715431; zayavl. 03.07.2019; opubl. 28.02.2020, Byul. No. 4.
11. Matvienko Yu.V., Kamornyj A.V., Hvorostov Yu.A. Ob odnom podhode k resheniyu zadachi obnaruzheniya podvodnogo istochnika shumovykh signalov. *Underwater investigations and robotics*. 2018. No. 2 (26). P. 37–43.
12. Shchurov V.A. *Dvizhenie akusticheskoy energii v okeane*. Vladivostok: TOI DVO RAN, 2019. 204 p.
13. Gordienko V.A., Il'ichev V.I., Zaharov L.N. *Vektorno-fazovyye metody v akustike*. M: Nauka, 1989. 223 p.

### Recommended citation:

Matvienko Yu.V., Khvorostov Yu.A., Kuleshov V.P. PECULIARITIES OF APPLICATION OF SCALAR-VECTOR SOUND RECEIVERS IN SYSTEMS FOR CONTROL OF UNDERWATER SITUATION IN LOCAL AREAS. *Underwater investigations and robotics*. 2022. No. 4 (42). P. 4–15. DOI: 10.37102/1992-4429\_2022\_42\_04\_01. EDN: CAMOFW.

**About the authors**

**MATVIENKO Yurii Viktorovich**, Dr.Sci., Chief Researcher  
Institute of Marine Technology Problems FEB RAS  
**Address:** 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5a  
**Scientific interests:** underwater robotics, hydroacoustic navigation, hydroacoustic complexes and systems  
**Phone:** +79089821389  
**E-mail:** ymat33@yandex.ru  
**ORCID:** 0000-0002-4486-3719

**KHVOROSTOV Yurii Anatolyevich**, Lead Designer  
Institute of Marine Technology Problems FEB RAS  
**Address:** 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5a  
**Scientific interests:** ocean acoustics, applied hydroacoustics, vector-scalar hydroacoustic systems, location and detection of sound sources  
**Phone:** +79147036723  
**E-mail:** oss.dvfu@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0002-4805-3051

**KULESHOV Vladimir Pavlovich**, Research  
V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS  
**Address:** 690041, Vladivostok, Baltiyskaya str., 43  
**Scientific interests:** ocean acoustics, vector-scalar hydroacoustic systems, detection of sound sources  
**Phone:** 8(423)2312854  
**E-mail:** 986022@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0002-4805-3017

