

ИССЛЕДОВАНИЕ АСПЕКТОВ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОГО ПРИЁМНИКА В РЕЖИМЕ ШУМОПЕЛЕНГОВАНИЯ

А. И. Машошин, В.С. Мельканович

Целью работы является рассмотрение аспектов практического применения комбинированных (векторно-скалярных) приёмников (КП) в распределённых гидроакустических системах подводного наблюдения при их функционировании в режиме шумопеленгования. Оценена помехоустойчивость КП в изотропном поле помех. Осуществлён выбор наиболее информативного частотного диапазона для обнаружения малошумных подводных объектов (МПО). Оценены ширина характеристики направленности КП и среднеквадратическая погрешность пеленгования локального источника при применении алгоритмов пространственной обработки Бартлетта и Кейпона. Приведён алгоритм обнаружения и классификации МПО, основанный на обнаружении и анализе вально-лопастных звукоядров дискретных составляющих в инфразвуковом диапазоне частот. Показано, что этот алгоритм также позволяет обнаруживать МПО при воздействии на вход КП шумов посторонних объектов. Рассмотрен алгоритм обнаружения МПО в звуковом диапазоне частот в условиях воздействия на вход КП мощной локальной помехи, заключающийся в корректировке спектрально-корреляционной матрицы сигналов на выходе приёмных каналов КП путём уменьшения значения её старшего собственного числа.

Ключевые слова: комбинированный (векторно-скалярный) приёмник, шумопеленгование, пространственная обработка, алгоритмы обнаружения и классификации.

Введение

Одним из трендов современной гидроакустики является создание скрытно развёртываемых распределённых гидроакустических систем подводного наблюдения (РСПН), предназначенных для обнаружения малошумных подводных объектов-нарушителей (МПО) в режимах мультистатической гидролокации и шумопеленгования. Основой РСПН являются автономные излучающие и приёмные гидроакустические станции (АГС) в виде заякоренных либо дрейфующих радиогидроакустических буёв. Первые используются в стационарных зональных либо рубежных системах [1], вторые – при поиске МПО противолодочными самолётами [2].

К АГС предъявляется ряд специфических требований, в частности:

- приёмные АГС должны быть способны принимать сигналы как в низком звуковом и ин-

фразвуковом диапазонах частот при работе в режиме шумопеленгования, так и в звуковом диапазоне частот при работе в режимах моно- и мультистатической гидролокации;

- они должны иметь малые габариты, обеспечивающие их скрытную постановку с любых плавсредств.

Для удовлетворения этих требований приёмные АГС целесообразно создавать на базе комбинированных (векторно-скалярных) приёмников (КП), которые могут иметь малые размеры и обладают направленными свойствами вне зависимости от частоты [3–18].

За рубежом КП широко применяются в серийно выпускаемых РСПН различного назначения уже на протяжении многих десятков лет. Достаточно сказать, что абсолютное большинство зарубежных авиационных радиогидроакустических буёв изготавливаются с использованием КП [2]. В России по не вполне

понятным причинам применение КП ограничивается областью научных исследований.

Однако в последние годы отношение к применению КП в серийно выпускаемой гидроакустической технике в России постепенно меняется. Учитывая это, необходимо активизировать исследования, направленные на практическое использование КП в серийных образцах гидроакустической аппаратуры. Для этого нужно исходить из понимания того, что при использовании в АГС комбинированные приёмники должны обеспечивать обнаружение, классификацию, определение координат и параметров движения МПО как в режиме шумопеленгования в широком диапазоне частот, в том числе в низком звуковом и инфразвуковом, так и в режимах моно- и мультистатической гидролокации в звуковом диапазоне частот.

При этом решение этих задач должно осуществляться в условиях наличия мешающих локальных источников, обусловленных как надводным судоходством, так и постановкой приборов гидроакустических помех объектом-нарушителем.

Многие из перечисленных задач в той или иной степени рассмотрены в опубликованных работах [3–18]. Однако имеются недостаточно изученные вопросы. В частности:

- остались разночтения в определении помехоустойчивости КП;
- практически во всех работах рассматривается обнаружение и пеленгование одиночного шумящего источника на фоне шумов моря;
- также не удалось найти работы, рассматривающие работу КП в режиме гидролокации, особенно в условиях гидроакустического противодействия со стороны нарушителя;
- неизвестны работы по классификации обнаруженных объектов по данным от КП.

Целью предлагаемой работы является рассмотрение отдельных вопросов практического применения КП в режиме шумопеленгования. В последующей статье будет предложено аналогичное исследование применительно к режиму гидролокации.

1. Выбор частотного диапазона для обнаружения подводных объектов в режиме шумопеленгования

Диапазон частот, в котором целесообразно обнаруживать МПО, должен удовлетворять ряду условий:

- он должен обеспечивать максимальную дистанцию обнаружения МПО. Для этого в нём должен иметь место повышенный уровень шумоизлучения МПО;

- он должен быть информативным для классификации МПО;
- в нём не должен наблюдаться повышенный уровень окружающих шумов;
- он должен позволять реализовывать пассивные методы определения дистанции до обнаруженного МПО.

На сегодняшний день в результате принятых мер в спектрах шумоизлучения современных МПО отсутствуют дискретные составляющие в звуковом диапазоне частот, обусловленные вибрацией механизмов внутри корпуса. Также в звуковом диапазоне существенно снижен уровень сплошной части спектра. Ввиду этого основными (причём неустраняемыми) источниками шумоизлучения МПО являются звук вращения гребного винта (водомёта) и сопровождающая его вибрация корпуса [19–21]. Всё это происходит в инфразвуковом диапазоне частот (ниже 20 Гц). В силу нелинейности процесса звук вращения винта проявляется в виде вально-лопастного звукоряда дискретных составляющих (ДС) в спектре шумоизлучения МПО [19, 20]. Частота первой гармоники звукоряда соответствует скорости вращения гребного вала, частоты остальных гармоник кратны частоте первой гармоники. Количество гармоник в зависимости от формы винта и скорости его вращения может быть любым, но не может быть меньше количества лопастей гребного винта. Поскольку уровень шумоизлучения винта в основном определяется скоростью его вращения и количеством лопастей, на МПО в отличие от надводных кораблей и судов устанавливаются низкооборотные винты большого диаметра с большим количеством лопастей [27].

Таким образом, повышенное шумоизлучение МПО наблюдается в инфразвуковом диапазоне частот. К тому же этот диапазон наиболее информативен для классификации, поскольку всё сказанное об инфразвуковом шумоизлучении МПО характерно и для надводных кораблей, однако количество лопастей у гребного винта надводных кораблей, как правило, меньше, а скорость его вращения существенно выше [19]. Кроме того, винты надводных кораблей вращаются в режиме кавитации, что проявляется в виде протяжённого вально-лопастного звукоряда ДС. В спектре шумоизлучения других морских объектов ДС в спектре шумоизлучения в инфразвуковом диапазоне частот отсутствуют. Всё это создаёт предпосылки для надёжной классификации МПО.

Недостатком использования инфразвукового диапазона частот является то, что окружающий шум в нём создаётся шумами удалённого судоходства и сейсмическими шумами, в силу чего его уровень

зависит от района. Естественно, он выше вблизи суходоходных трасс и в сейсмически активных районах. Ввиду этого, прежде чем принимать решение о развёртывании РСПН в том либо ином районе, нужно изучить присущий ему уровень инфразвуковых шумов.

Что касается пассивного определения дистанции до обнаруженного объекта, то существует универсальный энергетический метод [22], который не обладает высокой точностью, но позволяет оценивать дистанцию в любых условиях с использованием любой приёмной антенны, но при условии известного уровня шумоизлучения источника. Проведённые исследования показали, что уровни шумоизлучения всех современных иностранных МПО лежат в достаточно узком диапазоне значений, что создаёт предпосылки применения энергетического метода.

Для применения других известных методов необходимы приём шумоизлучения объекта в широком диапазоне частот либо совместная обработка информации от разнесённых станций РСПН [18].

Приём в широком (не менее 1 кГц) диапазоне частот позволяет применять методы, основанные на использовании многолучевого распространения сигнала (например, [23]).

2. Оценка помехоустойчивости комбинированного приёмника

Для практического применения КП данный вопрос имеет принципиальное значение, поскольку без знания реальной помехоустойчивости нельзя рассчитать дальности обнаружения объектов различных классов и тем самым спрогнозировать эффективность разрабатываемой РСПН. В 1990-е годы на основе заявленной группой учёных необоснованно высокой помехоустойчивости КП была поставлена опытно-конструкторская работа по обнаружению МПО, которая была выполнена, но на испытаниях показала дальность обнаружения на 2 порядка меньше заявленной дальности. Этот факт подтверждает необходимость выяснить реальную помехоустойчивость КП.

Помехоустойчивость КП рассматривалась в работах [3–18] с получением оценок в широком диапазоне значений. На наш взгляд, наибольшее доверие вызывают оценки, полученные выдающимися отечественными учёными в области гидроакустических антенн Е.Л. Шендоровым [6] и М.Д. Смаришевым [4, 8, 9, 12, 15].

Как известно, помехоустойчивость приёмника при обнаружении локального источника сигнала за-

висит как от характеристик самого приёмника, так и от структуры поля помех. Разница в оценках помехоустойчивости в разных работах часто объясняется тем, что разные авторы имеют в виду разные характеристики поля помех, причём не всегда их оговаривая.

Рассчитаем коэффициент помехоустойчивости КП в поле изотропных помех, называемый коэффициентом концентрации, по формуле [19, с. 58]:

$$\kappa = \frac{4 \cdot \pi}{\int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} W(\alpha, \psi, \alpha_0, \psi_0) \cdot \cos(\psi) \cdot d\alpha \cdot d\psi}, \quad (1)$$

где $W(\alpha, \psi, \alpha_0, \psi_0)$ – характеристика направленности КП, т.е. частотно независимый нормированный отклик КП на плосковолновой сигнал, пришедший с направления (α, ψ) (α – пеленг, ψ – угол места) при компенсации КП в направлении (α_0, ψ_0) , вычисляемая в виде:

$$W(\alpha, \psi, \alpha_0, \psi_0) = \frac{\mathbf{D}^*(\alpha_0, \psi_0) \cdot \mathbf{K}(\alpha, \psi) \cdot \mathbf{D}(\alpha_0, \psi_0)}{\mathbf{D}^*(\alpha_0, \psi_0) \cdot \mathbf{K}(\alpha_0, \psi_0) \cdot \mathbf{D}(\alpha_0, \psi_0)} \quad (2)$$

$\mathbf{D}(\alpha, \psi)$ – вектор размерности 4×1 частотно независимых характеристик направленности всех четырёх каналов КП, ориентированных в направление (α, ψ) [3]:

$$\mathbf{D}(\alpha, \psi) = \{1, \cos \alpha \cdot \cos \psi, \sin \alpha \cdot \cos \psi, \sin \psi\}. \quad (3)$$

* – знак эрмитова сопряжения;

$\mathbf{K}(\alpha, \psi)$ – нормированная частотно независимая корреляционная матрица (КМ) размерности 4×4 , вычисляемая по формуле:

$$\mathbf{K}(\alpha, \psi) = \mathbf{D}(\alpha, \psi) \cdot \mathbf{D}^*(\alpha, \psi). \quad (4)$$

Подставляя (2), (3), (4) в (1) и проведя вычисления, получим $\kappa = 3$ (4,8 дБ), т.е. коэффициент помехоустойчивости КП в изотропном поле помех равен 4,8 дБ. Ранее этот результат был получен в работе [15].

3. Оценка направленных свойств комбинированного приёмника

Оценим ширину характеристики направленности КП и обеспечиваемую им точность пеленгования с применением пространственной обработки, в качестве которой будем рассматривать так называемый пеленгационный рельеф [24], реализуемый в гидроакустических системах подводного наблюдения и позволяющий наблюдать несколько локальных источников одновременно. Согласно [24]:

$$PR(\alpha, \psi) = \int_{f_n}^{f_g} S_{out}(f, \alpha, \psi) df, \quad (5)$$

где $PR(\alpha, \psi)$ – пеленгационный рельеф, т.е. распределение энергии смеси сигналов и помех, поступающих на вход КП, по горизонтальным и вертикальным углам наблюдения;

f_n, f_g – нижняя и верхняя граничные частоты рабочего диапазона частот;

$S_{out}(f, \alpha, \psi)$ – выходной эффект пространственной обработки, т.е. энергетический спектр смеси сигналов и помех в направлении (α, ψ) , вычисляемый по формуле [24]:

$$S_{out}(f, \alpha, \psi) = \mathbf{W}^*(\alpha, \psi) \cdot \tilde{\mathbf{K}}_{s+n}(f) \cdot \mathbf{W}(\alpha, \psi), \quad (6)$$

где $\mathbf{W}(\alpha, \psi)$ – частотно независимый управляющий вектор размерности 4×1 , обеспечивающий компенсацию КП в направлении (α, ψ) ;

$\tilde{\mathbf{K}}_{s+n}(f)$ – накопленная спектрально-корреляционная матрица (КМ) размерности 4×4 смеси сигналов локальных источников и помехи (шумов моря) на выходе каналов КП:

$$\tilde{\mathbf{K}}_{s+n}(f) = \overline{\hat{\mathbf{G}}(f) \cdot \hat{\mathbf{G}}^*(f)}. \quad (7)$$

$\hat{\mathbf{G}}(f)$ – вектор размерности 4×1 оценок комплексных спектров смеси сигналов и помех на выходе приёмных каналов КП:

$$\hat{\mathbf{G}}(f) = \{\hat{G}_1(f), \hat{G}_2(f), \hat{G}_3(f), \hat{G}_4(f)\}. \quad (8)$$

Горизонтальная черта в (7) символизирует накопления КМ во времени.

Для построения вектора $\mathbf{W}(\alpha, \psi)$ будем использовать 2 известных алгоритма пространственной обработки [24]:

– оптимальный для обнаружения слабых сигналов линейный аддитивный алгоритм Бартлетта, для которого

$$\mathbf{W}_B(\alpha, \psi) = \mathbf{D}(\alpha, \psi); \quad (9)$$

– адаптивный алгоритм пространственной обработки Кейпона, обладающий свойством сверхразрешения, позволяющим сужать характеристику направленности в направлении на сильный источник. Для алгоритма Кейпона [24]

$$\mathbf{W}_C(f, \alpha, \psi) = \frac{\tilde{\mathbf{K}}_{s+n}^{-1}(f) \cdot \mathbf{D}(\alpha, \psi)}{\mathbf{D}^*(\alpha, \psi) \cdot \tilde{\mathbf{K}}_{s+n}^{-1}(f) \cdot \mathbf{D}(\alpha, \psi)}, \quad (10)$$

где $\tilde{\mathbf{K}}_{s+n}^{-1}(f)$ – обращённая КМ $\tilde{\mathbf{K}}_{s+n}(f)$.

Подстановка (9) и (10) в (6) приводит к выражениям для вычисления выходного эффекта простран-

ственной обработки КП при применении рассматриваемых алгоритмов:

– для алгоритма Бартлетта

$$S_{out/B}(f, \alpha, \psi) = \mathbf{D}^*(\alpha, \psi) \cdot \tilde{\mathbf{K}}_{s+n}(f) \cdot \mathbf{D}(\alpha, \psi); \quad (11)$$

– для алгоритма Кейпона

$$S_{out/C}(f, \alpha, \psi) = \left(\mathbf{D}^*(\alpha, \psi) \cdot \tilde{\mathbf{K}}_{s+n}^{-1}(f) \cdot \mathbf{D}(\alpha, \psi) \right)^{-1} \quad (12)$$

Для оценки направленных свойств КП выполнялось моделирование по следующей методике. Имитировался изотропный шум моря в виде независимого белого шума единичного уровня на выходе каждого канала КП. Далее моделировался шум локального источника в той же полосе частот, который, будучи умноженным на соответствующую характеристику направленности при $\alpha = 180^\circ$ и $\psi = 0^\circ$, суммировался с шумом моря на выходе соответствующего канала КП. Отношение уровней шума локального источника и шума моря на выходе приёмника давления варьировалось, что позволило выполнять моделирование при разных входных отношениях сигнал/помеха (ОСП).

На рис. 1 в качестве иллюстрации приведено сечение пеленгационных рельефов при вертикальном угле $\psi = 0^\circ$ при наблюдении одного источника с ОСП 10 дБ, расположенного по направлению $\alpha = 180^\circ$ и $\psi = 0^\circ$, при использовании алгоритмов Бартлетта и Кейпона.

Ширина характеристики направленности КП не зависит от частоты, но зависит от используемого алгоритма пространственной обработки и входного ОСП. На рис. 2 приведены результаты моделирования ширины характеристики направленности КП на уровне половины мощности в зависимости от вели-

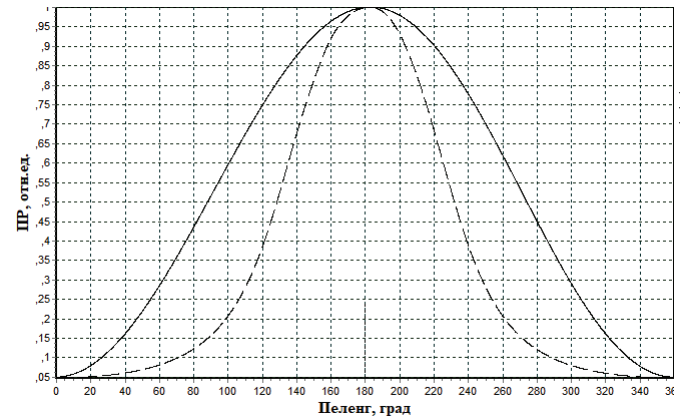


Рис. 1. Пеленгационный рельеф при воздействии на вход КП шумового сигнала одного источника с ОСП 10 дБ, построенный с использованием алгоритмов Бартлетта (сплошная линия) и Кейпона (штриховая линия)

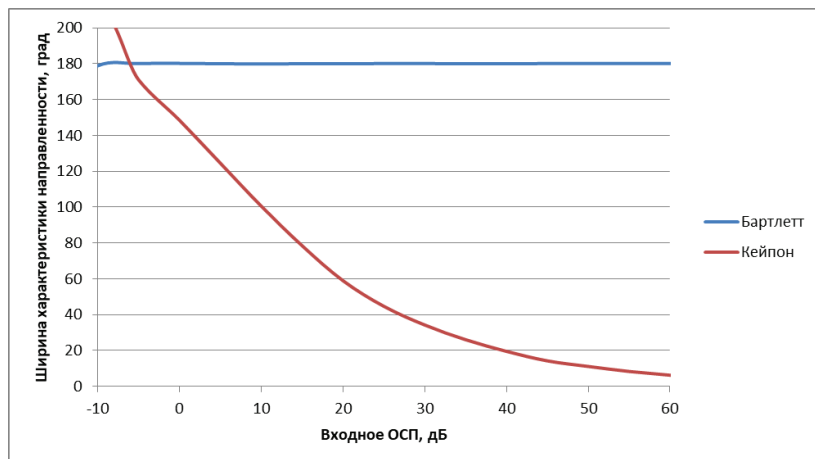


Рис. 2. Зависимость ширины характеристики направленности КР от величины входного ОСП при применении алгоритмов Бартлетта и Кейпона

чины входного ОСП при применении алгоритмов Бартлетта и Кейпона.

На рис. 3 демонстрируется полученная путём моделирования зависимость среднеквадратической погрешности пеленгования максимальным методом одиночного источника шума от входного ОСП и количества накоплений корреляционной матрицы при использовании алгоритма Бартлетта. Алгоритм Кейпона начиная с двух накоплений КМ обеспечивает аналогичную точность пеленгования. При одном накоплении характеристика направленности при использовании алгоритма Кейпона не формируется. Необходимо заметить, что, поскольку моделировались стационарные сигналы и помехи, можно предположить, что на практике точность пеленгования может оказаться несколько хуже.

Для повышения точности пеленгования разрабатываются различные методы, в основном связанные с трассовой обработкой пеленгов обнаруженных объектов [16].

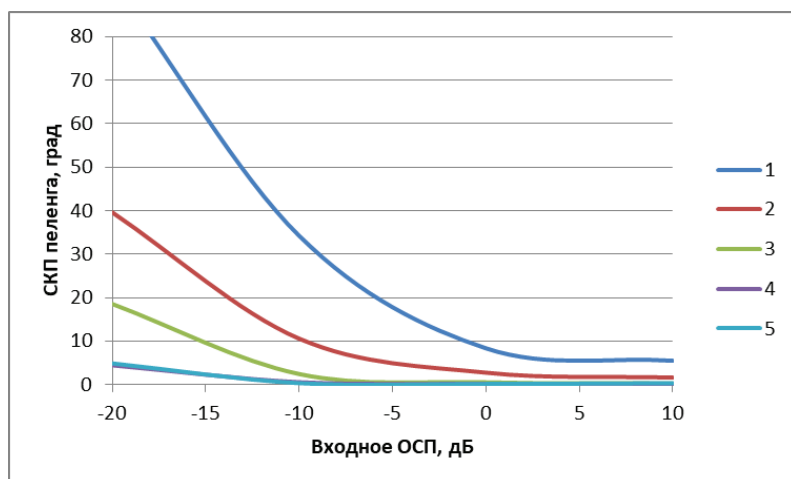


Рис. 3. Зависимость среднеквадратической погрешности пеленгования максимальным методом одиночного источника шума от входного ОСП при использовании алгоритма Бартлетта. Параметром графика является и количество накоплений пеленгационного рельефа

4. Алгоритм обнаружения, пеленгования и классификации МПО в инфразвуковом диапазоне частот

Для построения алгоритма, оптимизированного для обнаружения МПО в инфразвуковом диапазоне частот, будем исходить из двух выше описанных обстоятельств:

- спектр шумоизлучения МПО в инфразвуковом диапазоне частот содержит вально-лопастной звукоряд ДС [19, 20];
- в силу зависимости точности пеленгования при использовании алгоритма Кейпона от ОСП точность пеленгования в узких полосах ДС будет выше, чем в широкой полосе, и соответственно для наиболее точного пеленгования нужно использовать ДС с наибольшим ОСП.

В результате алгоритм имеет вид, аналогичный алгоритму узкополосного пеленгования, применяемого в гидроакустических станциях с гибкими протяжёнными буксируемыми антеннами [26].

Алгоритм функционирует циклически с периодом, равным набору реализаций на выходе каналов КР для выполнения спектрального анализа. На каждом цикле выполняются следующие операции:

1) По формуле (9) при $\psi = 0^\circ$ вычисляются энергетические спектры шумов в диапазоне $0 \dots 20$ Гц с разрешением не хуже 0.1 Гц, полученные с горизонтальных направлений α , перебираемых с шагом $5^\circ \dots 10^\circ$.

2) В спектре, полученном с конкретного направления, ищется вально-лопастной звукоряд ДС. При его обнаружении определяются количество ДС в звукоряде, частота первой гармоники (называемой основанием звукоряда), частоты и относительные уровни каждой ДС.

3) Для направлений, в которых обнаружен звукоряд ДС, проверяется наличие звукоряда с тем же осно-

ванием в соседних направлениях. Если идентичный звукоярд из не менее чем трёх ДС обнаружен не менее чем в трёх соседних направлениях, принимается решение об обнаружении объекта.

4) С использованием данных всех направлений, в которых обнаружен звукоярд с идентичным основанием, с использованием сплайнов строится зависимость уровня каждой гармоники от угла α . В результате для каждой гармоники определяется направление α , в котором её уровень максимален.

5) Максимальные значения всех гармоник сравниваются между собой. Если одна из гармоник по уровню существенно превышает остальные гармоники, направление её максимума принимается за пеленг обнаруженного объекта. В противном случае пеленг объекта определяется как средневзвешенное направление максимумов нескольких наибольших по уровню гармоник.

6) Осуществляется классификация обнаруженного объекта на основе частоты вращения гребного вала и количества лопастей гребного винта, определяемого по соотношению уровней гармоник звукояра [19, 20].

7) Осуществляется трассирование данных по обнаруженному объекту во времени с уточнением пеленга и определением его изменения во времени [16], а также с набором данных для определения дистанции и глубины объекта.

5. Особенности работы алгоритма при наличии мешающих локальных источников шумоизлучения в инфразвуковом диапазоне частот

В инфразвуковом диапазоне частот мешающими локальными источниками шумоизлучения могут выступать:

- техногенные объекты (надводные корабли, нефтедобывающие платформы);
- естественные локальные шумы (русла рек, подводные вулканы).

Негативная роль мешающих источников проявляется в следующем:

- уменьшается ОСП для обнаружения МПО;
- появляется ошибка смещения пеленга;
- если мешающим источником является надводный корабль, в принимаемом спектре сигнала в направлении на МПО могут наблюдаться два звукояра ДС [19].

При этом негативное влияние мешающего источника тем больше, чем меньше угловое расстояние между источниками шумоизлучения.

Положительным фактором является наличие в инфразвуковых спектрах МПО и надводных кораблей звукояров с уникальными характеристиками, по которым они уверенно различаются. В качестве примера на рис. 4 изображён спектр шума на выходе КП, полученный в реальном эксперименте. Применение к этому спектру стандартной программы обработки спектра показывает, что спектр содержит звукояры ДС двух сильно шумящих (что определено по количеству ДС в звукоярах) надводных кораблей. Скорость вращения гребного вала одного из них составляет 3,2 Гц (172 об/мин), винт имеет 3 лопасти. По-видимому, это небольшое рыболовецкое судно. Скорость вращения гребного вала другого корабля равна 7,2 Гц (432 об/мин), винт имеет 4 лопасти.

Учитывая отличительные особенности инфразвукового спектра МПО, описанный выше алгоритм должен позволить его обнаружение и в условиях наличия в районе мешающих локальных источников шума без принятия дополнительных мер.

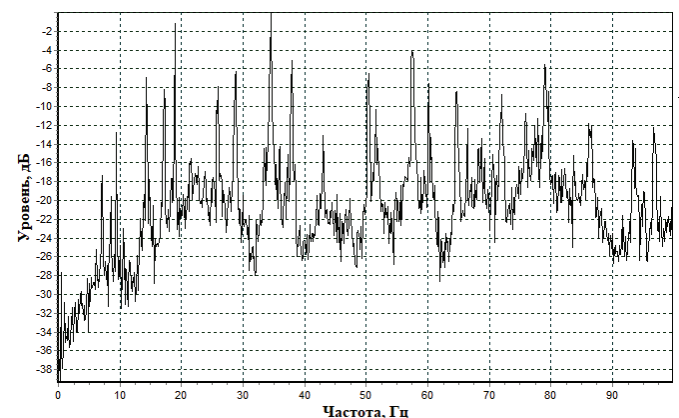


Рис. 4. Спектр шума на выходе сформированного пространственного канала КП, полученный в реальном эксперименте, в котором наблюдаются звукояры ДС двух надводных кораблей

6. Особенности обнаружения малозумных объектов в звуковом диапазоне частот

В районах с повышенным уровнем окружающего шума вследствие интенсивного надводного судоходства либо сейсмической активности обнаружение малозумных объектов в инфразвуковом диапазоне частот может оказаться неэффективным. В результате потребуется осуществлять обнаружение в звуковом диапазоне частот в полосе шириной 1..2 кГц, простирающейся выше частоты 100 Гц, где шумы удалённого судоходства не оказывают существенного влияния на уровень окружающего шума [19].

В звуковом диапазоне характерной особенностью спектра шумоизлучения современных МПО является отсутствие ДС [21], что отличает его от спектров надводных кораблей. В результате основной проблемой при обнаружении малозумных объектов в этом диапазоне частот является необходимость осуществлять обнаружение на фоне локальных шумовых помех, обусловленных как проходящими судами, так и постановкой объектом-нарушителем приборов гидроакустических помех. Ввиду этого остановимся на рассмотрении путей решения этой задачи.

Будем рассматривать те же два алгоритма пространственной обработки – Бартлетта и Кейпона.

Обнаружение объекта осуществляется путём периодического вычисления пеленгационного рельефа по формуле (3) и поиска в нём локального максимума. При обнаружении локального максимума осуществляется его классификация с использованием ОСП, спектра несущей, спектра амплитудной огибающей и корреляционной функции [19]. Если в результате классификации выясняется, что обнаружен сильно шумящий объект, применяется алгоритм подавления (либо ослабления) его шумов в каждом направлении наблюдения.

В качестве такого алгоритма рассмотрим алгоритм, предложенный в работе [27]. Его суть состоит в следующем. Известно, что вся информация о шумах и сигналах локальных и распределённых источников заключена в спектрально-корреляционной матрице (КМ) сигналов на выходе приёмных каналов КП. Эту КМ можно на каждой частоте разложить на $M=4$ (по количеству приёмных каналов) собственных чисел $\lambda_m(f)$ и соответствующих им собственных векторов $V_m(f)$:

$$\tilde{K}_{s+n}(f) = \sum_{m=1}^M \lambda_m(f) \cdot V_m(f) \cdot V_m^*(f) \quad (13)$$

Если говорить упрощённо, то каждому локальному источнику в КМ соответствует своё собственное число, характеризующее уровень сигнала источника, и собственный вектор, определяющий направление его прихода. Следовательно, изменяя значения собственных чисел, можно изменить уровни локальных источников на выходе приёмных каналов.

В качестве примера на рис.5 приведены пеленгационные рельефы Бартлетта и Кейпона, полученные при обработке в полосе 100...2000 Гц записи, зафиксированной в реальных условиях, в которой на вход КП воздействуют сигналы двух локальных источников – сильного по пеленгу 170° и слабого по пеленгу 130°.

Поскольку уровни источников различаются примерно на 20 дБ, пеленгационные рельефы позволяют

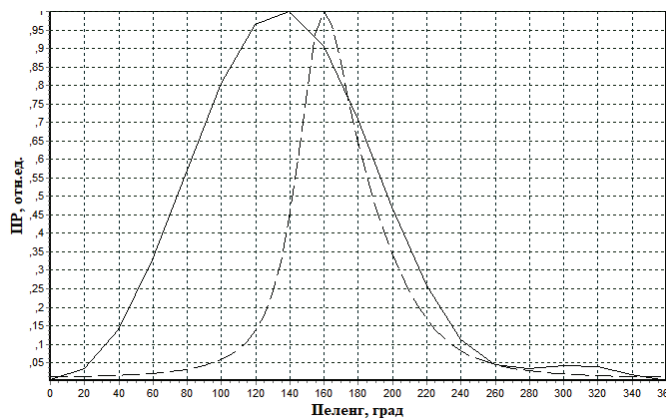


Рис. 5. Пеленгационные рельефы Бартлетта и Кейпона, полученные при обработке в полосе 100...2000 Гц записи, зафиксированной в реальных условиях, в которой на вход КП воздействуют сигналы двух локальных источников – сильного по пеленгу 170° и слабого по пеленгу 130°

обнаружить только один источник. Обратим внимание на то, что максимумы двух пеленгационных рельефов смещены, чего не наблюдается при воздействии на вход КП одного локального сигнала (рис. 1). Таким образом, смещение максимумов даёт основание полагать, что на входе КП присутствует несколько локальных сигналов.

Чтобы в рассматриваемом эксперименте обнаружить второй источник, к корреляционной матрице на каждой частоте была применена стандартная процедура выделения собственных чисел и комплексных собственных векторов.

Значения собственных чисел на разных частотах различались, но соотношение между ними на каждой частоте примерно сохранялось. Если принять за 100% значение наибольшего (старшего) собственного числа, то значение второго по величине собственного числа составляло примерно 10%, а третьего и четвертого примерно по 1%. Такое соотношение значений собственных чисел позволяет сделать вывод, что на вход КП воздействуют два локальных сигнала (сильный и слабый) и распределённая помеха.

Для обнаружения слабого локального сигнала значение старшего собственного числа было уменьшено в 100 раз, остальные собственные числа оставлены без изменения. Затем по формуле (11) была сформирована откорректированная КМ и заново построены пеленгационные рельефы. Результат приведён на рис. 6.

Как видим, оба пеленгационных рельефа демонстрируют наличие двух максимумов, соответствующих двум локальным источникам. При этом наблюдается значительное смещение максимумов по пеленгу. Если наибольший по уровню максимум в пеленгационном рельефе Бартлетта направлен на сла-

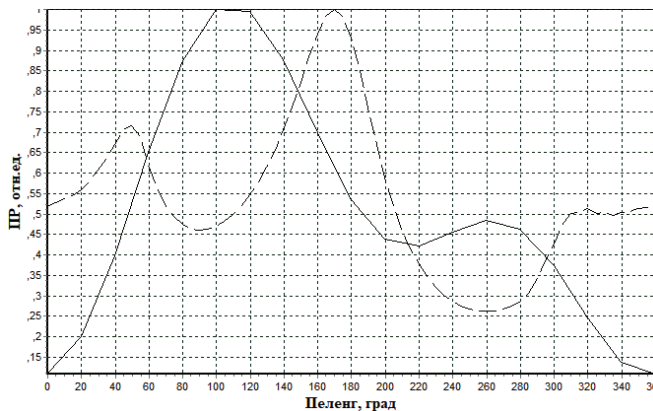


Рис. 6. Пеленгационные рельефы Бартлетта и Кейпона, полученные при обработке той же записи, что и на рис.5, после уменьшения в спектрально-корреляционной матрице значения старшего собственного числа

бый источник, то наибольший по уровню максимум в пеленгационном рельефе Кейпона ориентирован на сильный источник. Наименьшие по уровню максимумы в обоих пеленгационных рельефах направлены на пеленги, смещённые на 100° относительно другого источника. Это является платой за реализацию сложной пространственной обработки при предельно малом количестве приёмных каналов. Над разрешением этого вопроса предстоит поработать.

Заключение

1. Комбинированные (векторно-скалярные) приёмники (КП) в силу независимости направленности от частоты и малых габаритов должны стать основой для создания скрытно развёртываемых распределённых гидроакустических систем подводного наблюдения.

2. В работе рассматривается несколько аспектов практического применения КП, в частности показано:

- помехоустойчивость КП в изотропном поле помех равна 4,8 дБ;
- наиболее информативным для обнаружения малозумных МПО частотным диапазоном является инфразвуковой диапазон;
- ширина характеристики направленности КП на уровне половины мощности при применении алгоритма Бартлетта составляет 180° , при использовании алгоритма Кейпона уменьшается с ростом входного отношения сигнал/помеха (ОСП), составляя 55° при ОСП 20 дБ;
- среднеквадратическая погрешность пеленгования локального источника при применении

как алгоритма Бартлетта, так и алгоритма Кейпона уменьшается с увеличением входного ОСП и ростом количества накоплений корреляционной матрицы. При входном ОСП 0 дБ и 5-ти накоплениях корреляционной матрицы среднеквадратическая погрешность пеленгования составляет 1° ;

- наиболее целесообразным алгоритмом обнаружения и классификации МПО является алгоритм, основанный на обнаружении и анализе вально-лопастных звукоядов дискретных составляющих в инфразвуковом диапазоне частот;
- этот алгоритм также позволяет обнаруживать МПО при воздействии на вход КП шумов посторонних объектов;
- для обнаружения МПО в звуковом диапазоне частот в условиях воздействия на вход КП мощной локальной помехи целесообразно применять процедуру корректировки спектрально-корреляционной матрицы сигналов на выходе приёмных каналов КП, заключающейся в уменьшении значения её старшего собственного числа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пешехонов В.Г., Брага Ю.А., Машошин А.И. Сетецентрический подход к решению проблемы освещения подводной обстановки в Арктике // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2012, №3. С. 219–227.
2. Бородавкин А.Н., Богомолов А.П., Дурнев И.Н., Титков И.В. Радиогидроакустические системы морской авиации. Санкт-Петербург, 2022. 287 с.
3. Гордиенко В.А., Ильичев В.И., Захаров Л.Н. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989. 224 с.
4. Песоцкий А.В., Смаришев М.Д. Сопоставительная оценка эффективности приемных антенн, состоящих из комбинированных приемников, в свободном поле и вблизи плоского экрана // Акуст. журн. 1989. Т. 35, № 3. С. 495–498.
5. Скреби́н Г.К. Комбинированные гидроакустические приёмники. СПб: Элмор, 1997. 200 с.
6. Шендеров Е.Л. О помехоустойчивости приёмной антенны, состоящей из приемников звукового давления и приёмников колебательной скорости // Гидроакустика. 2002. Вып. 3. С. 24–40.
7. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 308 с.
8. Смаришев М.Д. О помехозащищённости гидроакустического комбинированного приемника // Акуст. журн. 2005. Т. 51, № 4. С. 558–559.
9. Смаришев М.Д. Сравнительная оценка помехоустойчивости антенн, состоящих из комбинированных приемников, в анизотропном поле помех // Гидроакустика. 2006. Вып. 6. С. 18–24.
10. Дзюба В.П. Скалярно-векторные методы теоретической акустики. Владивосток: Дальнаука, 2006. 195 с.
11. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
12. Баскин В.В., Смаришев М.Д. Помехоустойчивость плоской антенны, состоящей из комбинированных приемников // Акуст. журн. 2008. Т. 54, № 4. С. 629–636.

13. Гордиенко В.А., Гордиенко Е.Л., Краснопигцев Н.В., Некрасов В.Н. Помехоустойчивость гидроакустических приемных систем, регистрирующих поток акустической мощности // Акуст. журн. 2008. Т. 54, № 5. С. 774–785.
14. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., Злобина Д.В., Косарев Г.В. Оценка помехоустойчивости комбинированного приёмника в звуковом поле мелкого моря // Подводные исследования и робототехника. 2017. №2 (24). С. 41–51.
15. Смаришев М.Д. Об использовании комбинированных приёмников и антенн в корабельной гидроакустике // Гидроакустика. 2016. № 25 (1). С. 5–16.
16. 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.
17. 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. 4–12. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_01. EDN: CUYKTZ
18. 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.
19. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 445 с.
20. Александров И.А. О физической природе звука вращения гребного винта в режиме кавитации // Акуст. журн. 1962. Т. 8, № 4. С. 34.
21. Охрименко С.Н., Мнакацян А.А., Рубанов И.Л. Некоторые особенности шумоизлучения объектов, обнаруживаемых при помощи гидроакустических средств // Научный вестник ОПК России. 2023. Вып.2. С. 51–56.
22. Гриненков А.В., Машошин А.И. Оценка точности определения дистанции до подводного источника шума на предельной дистанции его обнаружения // Гидроакустика. 2024. №57 (1). С. 59–70.
23. Кузькин В.М., Матвиенко Ю.В., Переселков С.А. Применение интерферометрической обработки для локализации малошумных источников звука // Подводные исследования и робототехника. 2019. №. 4 (30). С. 49–57.
24. Малышкин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. В 2-х томах. Т. 2. Адаптивные методы. Санкт-Петербург, 2011. 374 с.
25. Акустика океана / под ред. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974. 694 с.
26. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004. 412 с.
27. Малышкин Г.С., Мельканович В.С. Классические и быстрые проекционные адаптивные алгоритмы в гидроакустике. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2022. 268 с.

Сведения об авторах

МАШОШИН Андрей Иванович, д.т.н., профессор, начальник научно-исследовательского центра АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»
Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30
Области научных интересов: гидроакустика, разработка систем управления АНПА
E-mail: aimashoshin@mail.ru
Тел. (моб.): +79217632345
ORCID: 0000-0002-4785-966X

МЕЛЬКАНОВИЧ Виктор Сергеевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»
Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30
Области научных интересов: гидроакустика
E-mail: vmelkanovich@mail.ru
Тел.(моб.): +79112670573,
ORCID: 0009-0006-4402-1411



Для цитирования:

Машошин А. И., Мельканович В.С. ИССЛЕДОВАНИЕ АСПЕКТОВ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОГО ПРИЁМНИКА В РЕЖИМЕ ШУМОПЕЛЕНГОВАНИЯ // Подводные исследования и робототехника. 2025. № 3 (53). С. 4–14. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_53_03_01. EDN: DCGERL.

INVESTIGATION OF A VECTOR-SCALAR RECEIVER PRACTICAL APPLICATION IN PASSIVE MODE

A.I. Mashoshin, V.S. Melkanovich

The purpose of the work is to consider aspects of the practical application of combined (vector-scalar) receivers (CP) in distributed hydroacoustic underwater surveillance systems when they operate in the passive mode. The noise immunity of the CP in an isotropic noise field is evaluated. The choice of the most informative frequency range was made for detecting low-noise underwater objects (LNUO). The width of the directional characteristic of the CP and the root-mean-square error of the bearing of the local source are estimated when using the Bartlett and Capon spatial processing algorithms. An algorithm for detecting and classifying LNUO is presented, based on the detection and analysis of roller-blade sound patterns of discrete components in the infrasound frequency range. It is shown that this algorithm also makes it possible to detect LNUO when the input of the CP is exposed to the noise of extraneous objects. An algorithm for detecting LNUO in the audio frequency range under conditions of exposure to powerful local interference at the input of the CP is considered, which consists in correcting the spectral correlation matrix of signals at the output of the receiving channels of the CP by reducing the value of its highest eigenvalue.

Keywords: combined (vector-scalar) receiver, noise reduction, spatial processing, detection and classification algorithms.

References

1. Peshekhonov V.G., Braga Yu.A., Mashoshin A.I. A network-centric approach to solving the problem of underwater lighting in the Arctic). From the Southern Federal University. Technical sciences. 2012, No. 3, pp. 219-227.
2. Borodavkin A.N., Bogomolov A.P., Durnev I.N., Titkov I.V. Radio-acoustic systems of naval aviation. VUNC Navy "Naval Academy". St. Petersburg. 2022. 287 p.
3. Gordienko V.A., Ilyichev V.I., Zakharov L.N. Vector-phase methods in acoustics. Moscow: Nauka, 1989.
4. Pesotsky A.V., Smaryshev M.D. Comparative evaluation of the effectiveness of receiving antennas consisting of combined receivers in a free field and near a flat screen. Acoustic. journal. 1989. Vol. 35, No. 3. Pp. 495-498.
5. Skrebnev G.K. Combined sonar receivers. St. Petersburg: Elmore, 1997. 200 p.
6. Shenderov E.L. On the noise immunity of a receiving antenna consisting of sound pressure receivers and oscillatory velocity receivers. Hydroacoustics. 2002. Issue 3. pp. 24-40.
7. Shchurov V.A. Vector acoustics of the ocean. Vladivostok: Dalnauka, 2003. 308 p.
8. Smaryshev M.D. On the noise immunity of a sonar combined receiver. Acoustic. Journal 2005. Vol. 51, No. 4. Pp. 558-559.
9. Smaryshev M.D. Comparative assessment of the noise immunity of antennas consisting of combined receivers in an anisotropic interference field. Hydroacoustics. 2006. Issue 6. Pp. 18-24.
10. Dzyuba V.P. Scalar vector methods of theoretical acoustics. Vladivostok: Dalnauka, 2006. 195 p.
11. Gordienko V.A. Vector-phase methods in acoustics. Moscow: Fizmatlit, 2007. 480 p.
12. Baskin V.V., Smaryshev M.D. Noise immunity of a flat antenna consisting of combined receivers. Acoustic. journal. 2008. Vol. 54, No. 4. Pp. 629-636.
13. Gordienko V.A., Gordienko E.L., Krasnopivtsev N.V., Nekrasov V.N. Noise immunity of sonar receiving systems recording acoustic power flow. Acoustic. Journal, 2008, vol. 54, No. 5. Pp.774-785.
14. Kasatkin B.A., Zlobina N.V., Kasatkin S.B., Zlobina D.V., Kosarev G.V. Evaluation of the noise immunity of a combined receiver in the shallow sea sound field. Underwater research and robotics. 2017. No. 2 (24). Pp. 41-51.
15. Smaryshev M.D. On the use of combined receivers and antennas in shipboard hydroacoustics. Hydroacoustics. 2016. No.25 (1). Pp.5-16.
16. Matvienko Yu.V., Kamorny A.V., Hvorostov Yu.A. On one approach to solving the problem of detecting an underwater source of noise signals. Underwater research and robotics. 2018. No. 2 (26). Pp. 37-43.
17. Matvienko Yu.V., Hvorostov Yu.A., Kamorny A.V., Glushchenko M.Yu., Kuzkin V.M., Perestelkov S. A. Experimental studies of a system for detecting low-noise underwater targets in shallow waters. Underwater research and robotics. 2022. No. 3 (41). Pp. 4-12. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_01. EDN: CUYKTZ
18. Matvienko Yu.V., Hvorostov Yu.A., Kuleshov V.P. Features of the use of scalar-vector sound receivers in underwater monitoring systems in local areas. Underwater research and robotics. 2022. No. 4 (42). Pp. 4-15. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_01. EDN: CAMOFW.
19. Urik R. J. Fundamentals of hydroacoustics, Sudostroenie, 1978.
20. Alexandrov I.A. On the physical nature of the sound of propeller rotation in cavitation mode. Acoustic. Journal. 1962. Vol. 8, No. 4, p.34.
21. Okhrimenko S.N., Mnakatsanyan A.A., Rubanov I.L. Some features of noise emission of objects detected by hydroacoustic means. Scientific Bulletin of the Defense Industry of Russia. 2023. Issue 2. Pp.51-56.
22. Grinenkov A.V., Mashoshin A.I. Evaluation of the accuracy of determining the distance to an underwater noise source at the maximum detection distance. Hydroacoustics. 2024. No. 57 (1). Pp.59-70
23. Kuzkin V.M., Matvienko Yu.V., Perestelkov S.A. Application of interferometric processing for localization of low-noise sound

sources. Underwater research and robotics. 2019. No. 4 (30). pp.49-57.

24. Malyshkin G.S. Optimal and adaptive methods of hydroacoustic signal processing. In 2 volumes. Volume 2. Adaptive methods. JSC Concern Central Research Institute Elektropribor. 2011. 374 p.

25. Acoustics of the ocean, edited by L.M.Brekhovskikh. Moscow: Nauka, 1974. 694 p.

26. Koryakin Yu.A., Smirnov S.A., Yakovlev G.V. Shipboard sonar technology. Current status and current issues. Saint Petersburg: Nauka, 2004. 412 p.

27. Malyshkin G.S., Melkanovich V.S. Classical and fast projection adaptive algorithms in hydroacoustics. St. Petersburg: SSC RF JSC "Concern "Central Research Institute "Elektropribor". 2022. 268 p.



Information about authors

MASHOSHIN Andrey Ivanovich, doctor of science, professor, chief of the research center

JSC «Concern «Elektropribor»

Address: 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30

Scientific interests: in underwater acoustic, AUV control systems

E-mail: aimashoshin@mail.ru

Phone: +79217632345

ORCID: 0000-0002-4785-966X

MELKANOVICH Victor Sergeevich, PhD, leading scientist

JSC «Concern «Elektropribor»

Address: 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30

Scientific interests: in underwater acoustic, AUV control systems

E-mail: vmelkanovich@mail.ru

Phone: +79112670573

ORCID: 0009-0006-4402-1411



Recommended citation:

Mashoshin A.I., Melkanovich V.S. INVESTIGATION OF A VECTOR-SCALAR RECEIVER PRACTICAL APPLICATION IN PASSIVE MODE. Underwater investigations and robotics. 2025. No. 3 (53). P. 4–14. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_53_03_01. EDN: DCGERL.