

# ИССЛЕДОВАНИЕ АСПЕКТОВ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОГО ПРИЁМНИКА В РЕЖИМЕ ГИДРОЛОКАЦИИ

А.И. Машошин, В.С. Мельканович

Целью работы является рассмотрение аспектов практического применения комбинированных (векторно-скалярных) приёмников (КП) в режиме гидролокации в распределённых гидроакустических системах подводного наблюдения. Показано: обнаруживать малозумные подводные объекты (МПО) в режиме гидролокации целесообразно в диапазоне 1,5...2,0 кГц; для обнаружения МПО должны применяться длинные тональные зондирующие сигналы и сложные сигналы, построенные на кодах Костаса; алгоритм обнаружения эхосигналов должен одновременно обнаруживать сигналы приборов помех и других сильно шумящих объектов и осуществлять их подавление, причём все процедуры, включая обнаружение и подавление, должны осуществляться на интервале длительности эхосигнала; обнаружение эхосигналов целесообразно осуществлять одновременно с использованием линейного алгоритма Бартлетта, обеспечивающего наибольшую помехоустойчивость при обнаружении слабых сигналов, и адаптивного алгоритма Кейпона, обладающего свойством сверхразрешения; подавление сильных локальных сигналов, маскирующих эхосигналы, целесообразно осуществлять с использованием известного компенсационного алгоритма с учётом замены накопления корреляционных матриц во времени на накопление по частоте.

**Ключевые слова:** комбинированный (векторно-скалярный) приёмник, гидролокация, адаптивная 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 малозумных 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 инфразвуковом 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].

В работе [4] рассмотрены отдельные аспекты, касающиеся практического применения КП в приёмных АГС при их функционировании в режиме шумопеленгования. Приведём результаты работы [4], относящиеся также к режиму гидролокации:

- помехоустойчивость КП в изотропном поле помех вне зависимости от частоты составляет 4,8 дБ;

- среднеквадратическая погрешность пеленгования локального источника 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°.

Целью предлагаемой работы является рассмотрение отдельных вопросов практического применения КП в режиме гидролокации. Насколько можно судить по доступным источникам, ранее применение КП в режиме гидролокации, по крайней мере в России, не рассматривалось.

### 1. Выбор частотного диапазона для обнаружения подводных объектов в режиме гидролокации

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

- он должен обеспечивать максимально возможную дистанцию обнаружения МПО. Учитывая независимость помехоустойчивости КП от частоты, дистанция обнаружения МПО возрастает при уменьшении частоты вследствие уменьшения пространственного затухания сигнала. Однако при этом должно выполняться одно из основных условий гидролокации: длина волны зондирующего сигнала (ЗС) должна быть существенно меньше геометрических размеров отражающего тела;
- КП на частоте ЗС должен иметь достаточную чувствительность;
- излучающая АГС должна иметь ограниченные размеры и энергопотребление.

В случае обнаружения МПО перечисленным условиям удовлетворяет диапазон частот 1,5...2,0 кГц.

### 2. Особенности обнаружения МПО в режиме гидролокации

Достоинством режима гидролокации по сравнению с режимом шумопеленгования является существенно бо́льшая (практически на порядок) дальность обнаружения МПО.

К недостаткам режима гидролокации следует отнести отсутствие скрытности функционирования РСПН. МПО, обнаружив зондирующие сигналы, излучаемые РСПН, имеет возможность поставить

прибор помех, который будет излучать шум большого уровня в полосе приёма эхосигналов (ЭС) и тем самым будет препятствовать обнаружению эхосигналов. Отсюда следует, что реализуемый в принимающей АГС алгоритм обнаружения ЭС должен одновременно с обнаружением ЭС обнаруживать сигналы приборов помех и других сильно шумящих объектов и осуществлять их подавление.

Чтобы обеспечить эффективное функционировать РСПН в режиме гидролокации, в арсенале излучающих АГС должны быть ЗС с разными характеристиками, в частности:

- тональные сигналы разной длительности, обладающие наибольшей устойчивостью при применении адаптивных алгоритмов подавления шумов приборов помех;
- сложные сигналы, из которых выделяются сигналы Костаса [5], обеспечивающие высокоточное измерение как дистанции до объекта, так и его радиальной скорости.

### 3. Алгоритм обнаружения и определения координат МПО в режиме моностатической гидролокации

Укрупнённый алгоритм имеет вид:

1) С учётом гидроакустических условий в районе и среднего эквивалентного радиуса МПО рассчитывается ожидаемая дистанция обнаружения МПО в режиме моностатической гидролокации  $R_{mro}$ .

2) Исходя из ожидаемой дистанции обнаружения определяется период излучения ЗС  $\Delta T_{zs} = \frac{2 \cdot R_{mro}}{C_{zv}}$ , где  $C_{zv}$  – скорость звука на глубине приёмной антенны.

3) До обнаружения МПО излучающий тракт активно-пассивной АГС излучает длинные тональные ЗС длительности  $T_{zs}$  с периодом следования  $\Delta T_{zs}$ , обеспечивающие высокоточное измерение радиальной скорости и низкоточное измерение дистанции.

4) При устойчивом обнаружении МПО излучающий тракт переходит на излучение сложных сигналов с такой же помехоустойчивостью, обеспечивающих более точное определение дистанции до объекта. В качестве такого сигнала целесообразно использовать многотональный сигнал Костаса [5], позволяющий с высокой точностью измерять как дистанцию, так и радиальную скорость объекта. К тому же этот сигнал более устойчив к адаптивным процедурам по сравнению с такими широкополосными сигналами, как ЛЧМ, ГЧМ, частотно- и фазоманипулированными.

5) Приёмный тракт активно-пассивной АГС циклически обрабатывает входные сигналы, поступающие со всех направлений в полосе частот ЗС, расширенной с учётом максимально возможной радиальной скорости объекта поиска, одновременно осуществляя обнаружение шумовых локальных сигналов большого уровня, излучаемых приборами помех и другими сильно шумящими морскими объектами, и эхосигналов, отражённых от МПО. При обнаружении сильных сигналов локальных источников (ЛИ) приёмный тракт осуществляет их подавление во всех горизонтальных пространственных каналах.

Остановимся подробнее на алгоритмах обработки входных сигналов, реализуемых в приёмном тракте АГС.

Приёмный тракт активно-пассивной АГС циклически обрабатывает входные сигналы длительности  $T_{zs}$  с перекрытием не менее 50...70%. Основная особенность обработки входных сигналов в режиме гидролокации состоит в том, что все процедуры должны быть реализованы на интервале  $T_{zs}$ . Это касается, в том числе, реализации адаптивных алгоритмов пространственной обработки, требующих накопления корреляционных матриц, которое традиционно реализуется путём их осреднения на соседних входных временных реализациях. Поскольку при обработке в режиме гидролокации все процедуры должны реализовываться на интервале длительности одной входной реализации, целесообразно воспользоваться предложением, содержащимся в работе [6], и заменить накопление по времени на накопление скользящим окном по частоте.

В результате на каждом цикле обработки длительностью  $T_{zs}$  реализуются следующие процедуры.

1) Формируются горизонтальные пространственные каналы (ПК) с шагом по пеленгу, равным половине среднеквадратической погрешности пеленгования, ориентированные в вертикальном направлении на угол  $\psi = 0^\circ$ . Формирование целесообразно выполнять одновременно с использованием линейного алгоритма Бартлетта, имеющего наибольшую помехоустойчивость при обнаружении слабых (пороговых) сигналов, и адаптивного алгоритма Кейпона, обладающего свойством сверхразрешения [7], позволяющим достичь наибольшей разрешающей способности при обнаружении относительно сильных сигналов. Алгоритм Бартлетта имеет вид:

$$G_{out/B}(f, \alpha_i, \psi) = \hat{G}^*(f) \cdot \mathbf{D}(\alpha_i, \psi), \quad (1)$$

алгоритм Кейпона:

$$G_{out/C}(f, \alpha_i, \psi) = \frac{\hat{G}^*(f) \cdot \tilde{\mathbf{K}}_{s+n}^{-1}(f) \cdot \mathbf{D}(\alpha_i, \psi)}{\mathbf{D}^*(\alpha_i, \psi) \cdot \tilde{\mathbf{K}}_{s+n}^{-1}(f) \cdot \mathbf{D}(\alpha_i, \psi)}, \quad (2)$$

где  $G_{out/B}(f, \alpha_i, \psi), G_{out/C}(f, \alpha_i, \psi)$  – выходной эффект пространственной обработки, т.е. комплексный спектр (КС) смеси сигналов и помех в направлении  $(\alpha_i, \psi)$ , при применении алгоритмов Бартлетта и Кейпона соответственно;

$\alpha_i$  – пеленг  $i$ -го ПК;

$\hat{G}(f)$  – вектор размерности  $4 \times 1$  оценок КС смеси сигналов и помех на выходе приёмных каналов КП;

$\mathbf{D}(\alpha_i, \psi)$  – вектор размерности  $4 \times 1$ , объединяющий характеристики направленности всех четырёх каналов КП, ориентированных в направлении  $(\alpha_i, \psi)$ :

$$\mathbf{D}(\alpha_i, \psi) = \{1, \cos \alpha_i \cdot \cos \psi, \sin \alpha_i \cdot \cos \psi, \sin \psi\};$$

\* – знак эрмитова сопряжения;

$\tilde{\mathbf{K}}_{s+n}(f)$  – сглаженная скользящим спектральным окном спектрально-корреляционная матрица (КМ) размерности  $4 \times 4$  сигналов на выходе каналов КП, вычисляемая по формуле:

$$\tilde{\mathbf{K}}_{s+n}(f) = \int_{s=-\frac{\Delta f}{2}}^{\frac{\Delta f}{2}} H(f-s) \cdot \hat{G}(f) \cdot \hat{G}^*(f) \cdot ds, \quad (3)$$

$\Delta f$  – ширина спектрального окна сглаживания спектра, подбираемая экспериментально по критерию максимизации выходного отношения сигнал/помеха;  $H(f)$  – сглаживающая функция, интеграл которой в полосе  $\Delta f$  равен единице;

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

2) Формируются пеленгационные рельефы  $PR(\alpha_i, \psi)$  с использованием алгоритмов Бартлетта и Кейпона, т.е. распределение по пеленгам  $\alpha_i$  энергии смеси сигналов и помех, поступающих на вход КП, по горизонтальным и вертикальным углам наблюдения (рис. 1):

$$PR(\alpha_i, \psi) = \int_{f_i}^{f_a} G_{out}^*(f, \alpha_i, \psi) \cdot G_{out}(f, \alpha_i, \psi) df, \quad (4)$$

где  $f_i, f_a$  – нижняя и верхняя граничные частоты зондирующего сигнала, расширенные с учётом возможного эффекта Доплера.

3) В пеленгационных рельефах обнаруживаются локальные источники шума. Если такие источники обнаружены, определяются их пеленги и отношения сигнал/помеха (ОСП). Если ОСП обнаруженных локальных источников превышают заданное пороговое значение, принимается решение об обнаружении сильных локальных источников (ЛИ) шума, мешающих обнаружению ЭС и подлежащих подавлению.

4) Если сильный ЛИ шума обнаружен, осуществляется его подавление во всех пространственных

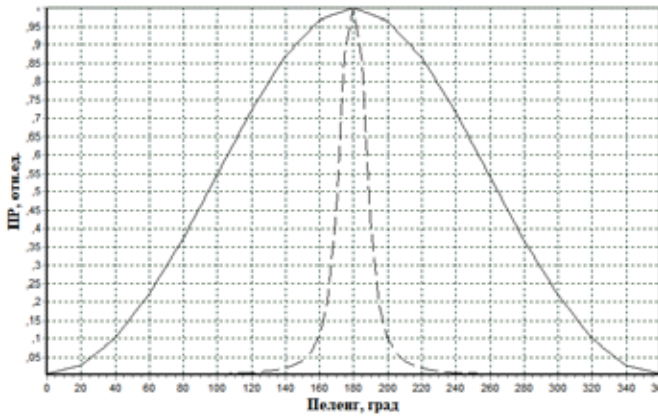


Рис. 1. Пеленгационные рельефы при использовании алгоритмов Бартлетта (сплошная линия) и Кейпона (штриховая линия) при наблюдении одного сильного локального источника по пеленгу 180°

каналов. Для этого используется компенсационный алгоритм, имеющий вид [7]:

$$\hat{G}_{out/cmp}(f, \alpha_i, \psi) = \hat{G}_{out}(f, \alpha_i, \psi) - \tilde{W}^*(f) \cdot \hat{U}(f), \quad (5)$$

где  $\hat{G}_{out/cmp}(f, \alpha_i, \psi)$  – оценка комплексного спектра (КС) сигнала на выходе  $i$ -го ПК, очищенного от шумов ЛИ;  $\hat{G}_{out}(f, \alpha_i, \psi)$  – оценка КС сигнала на выходе  $i$ -го ПК до подавления шумов ЛИ;  $\hat{U}(f)$  – вектор-столбец размерности  $N \times 1$  оценок КС на выходе ПК, ориентированных на каждый ЛИ ( $N$  – количество ЛИ);  $\tilde{W}(f)$  – накопленный управляющий вектор-столбец размерности  $N \times 1$ , вычисляемый в виде:

$$\tilde{W}(f) = \tilde{K}_{li}^{-1}(f) \cdot \tilde{D}_i(f), \quad (6)$$

$\tilde{K}_{li}(f)$  – накопленная квадратная  $N \times N$  КМ сигналов на выходе  $N$  ПК, ориентированных на  $N$  ЛИ шума;  $\tilde{D}_i(f)$  – вектор-столбец накопленных взаимных спектров сигнала на выходе  $i$ -го ПК и сигналов на выходе  $N$  ПК, ориентированных на ЛИ.

Реализация алгоритма (5), как и алгоритма (1), осуществляется в полосе частот ЗС, расширенной с учётом максимально возможной доплеровской частоты. КМ  $\tilde{K}_{li}(f)$  и вектор  $\tilde{D}_i(f)$  вычисляются на интервале длительности ЗС, а затем сглаживаются скользящим спектральным окном, ширина которого подбирается экспериментально.

5) Если сильные локальные источники шума не обнаружены алгоритм (5) не применяется.

6) Осуществляется обнаружение ЭС в каждом пространственном канале. При излучении тонального ЗС обнаружение ЭС состоит в поиске узкополосного максимума в энергетическом спектре с превышением над уровнем флуктуаций фоновой части спектра больше заданного порогового. Энергетический спектр вычисляется по формуле:

$$S_{out/cmp}(f, \alpha_i, \psi) = \hat{G}_{out/cmp}^*(f, \alpha_i, \psi) \cdot \hat{G}_{out/cmp}(f, \alpha_i, \psi) \quad (7)$$

7) При обнаружении ЭС в одном из ПК определяются пеленг, дистанция и радиальная скорость объекта. При этом следует отметить, что для определения пеленга, обнаруженного ЭС на выходе КП, установленного в корпусе АГС, свободно вращающейся вокруг вертикальной оси, необходимо в составе АГС иметь достаточно точный и безынерционный компас, что, учитывая ограниченные габариты АГС, обеспечить достаточно проблематично. Ввиду этого точность определения пеленга на одном цикле локализации будет невысокой. Далее будет показано, что эта проблема может быть решена в режиме мультистатистической гидролокации.

8) Если тональный ЭС устойчиво обнаруживается на нескольких циклах излучения, осуществляется переход на излучение ЗС с той же помехоустойчивостью, но обеспечивающего более точное определение дистанции до объекта. Как было замечено ранее, в качестве такого сигнала целесообразно использовать многотональный сигнал Костаса [5]. Обнаружение сложного ЭС осуществляется путём вычисления взаимной корреляционной функции (ВКФ)  $K(\tau)$  эхосигнала и зондирующего сигнала, преобразованного с учётом измеренной при обнаружении тонального ЭС радиальной скорости объекта:

$$K(\tau) = IFFT\left\{\hat{G}_{out/cmp}^*(f, \alpha_i, \psi) \cdot G_{zs}(f \cdot D(V_{rad}))\right\}, \quad (8)$$

где  $G_{zs}(f)$  – комплексный спектр сложного ЗС;

$D(V_{rad})$  – доплеровский параметр, определяемый в виде

$$D = 1 - \frac{2 \cdot V_{rad}}{C_{36}}, \quad (9)$$

$V_{rad}$  – радиальная скорость обнаруженного объекта, измеренная по тональному ЭС;  $IFFT\{*\}$  – символ операции вычисления обратного быстрого преобразования Фурье.

В вычисленной ВКФ  $K(\tau)$  осуществляется обнаружение наибольшего по величине максимума и определяется его ОСП, которое сравнивается с заданным пороговым значением. При его превышении принимается решение об обнаружении ЭС.

9) При потере контакта с объектом (что наиболее вероятно в условиях воздействия на КП сильного ЛИ) возобновляется излучение длинного тонального сигнала. При устойчивом обнаружении тональных ЭС снова начинается излучение сигналов Костаса.



10) Объект, обнаруженный в режиме гидролокации, с момента обнаружения первого ЭС трассируется во времени, что позволяет повысить точность определения его координат и дополнительно определить параметры движения (курс и скорость).

11) В процессе трассирования осуществляется классификация обнаруженного объекта с использованием характерных признаков разных классов объектов, содержащихся в ЭС [8].

Описанный алгоритм иллюстрируют рис. 2–10, полученные в результате моделирования процесса обработки сигналов на выходе КП. На рис. 2–6 демонстрируются результаты обнаружения тонального ЭС, на рис. 7–10 – ЛЧМ ЭС.

Моделирование выполнялось при следующих исходных данных:

- превышение ЭС над помехой при отсутствии сильного ЛИ 20 дБ;
- превышение шумов ЛИ над шумами моря 30 дБ;
- угловое расстояние между объектом локации и сильным ЛИ шума 20°;
- средняя частота ЭС 1800 Гц;
- приём осуществляется в полосе 1700–1900 Гц;
- в полосе приёма формируется 512 спектральных отсчётов;
- разрешение спектрального анализа 0,4 Гц;

На рис. 2 приведён спектр сигнала на выходе КП, ориентированного на объект локации при приёме тонального эхосигнала при отсутствии воздействия на КП сильных ЛИ.

На рис. 3 изображён пеленгационный рельеф, построенный с использованием алгоритмов Бартлетта и Кейпона при воздействии на КП эхосигнала по пеленгу 130° и сильного ЛИ шума по пеленгу 150°.

На рис. 4 приведён спектр сигнала в направлении прихода ЭС при одновременном воздействии на вход КП сильного ЛИ шума при угловом расстоянии между ЭС и ЛИ 20°. Видно, что тональный эхосигнал маскируется шумом сильного ЛИ.

На рис. 5 изображён спектр сигнала в направлении прихода ЭС после его сглаживания скользящим спектральным окном длиной в 9 спектральных отсчётов.

На рис. 6 показан спектр сигнала в направлении на объект локации после применения алгоритма (5). Видим, что тональный ЭС, имея превышение 12...14 дБ над флуктуациями фоновой части спектра, уверенно обнаруживается.

На рис. 7 демонстрируется спектр ЛЧМ зондирующего сигнала.

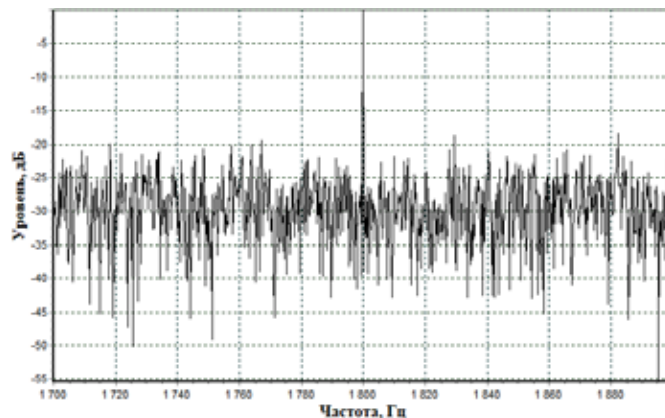


Рис. 2. Спектр сигнала на выходе КП, ориентированного на объект локации, при приёме тонального эхосигнала в ситуации отсутствия ЛИ

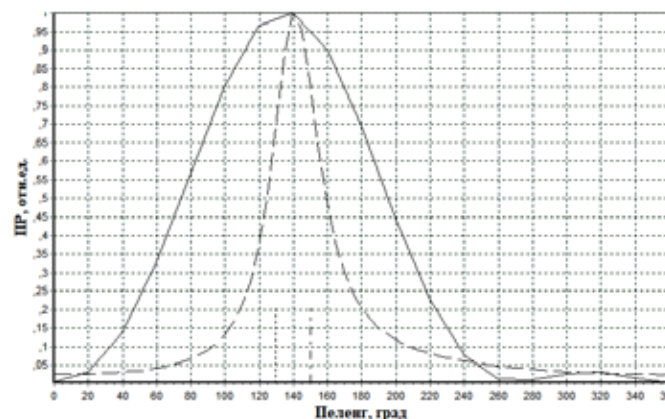


Рис. 3. Пеленгационный рельеф, построенный с использованием алгоритмов Бартлетта и Кейпона при воздействии на КП эхосигнала по пеленгу 130° и сильного ЛИ шума по пеленгу 150°

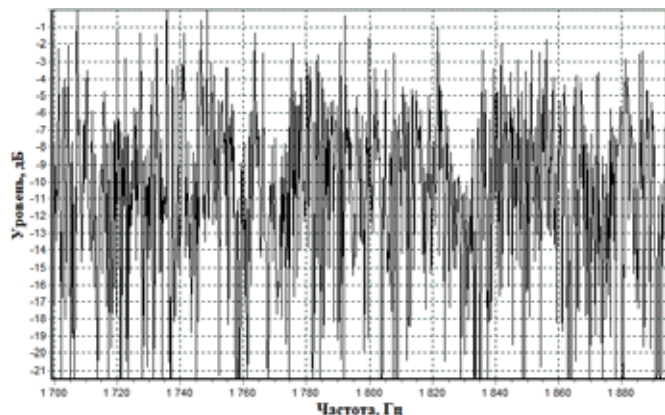


Рис. 4. Спектр сигнала в направлении прихода ЭС при одновременном воздействии на вход КП сильного ЛИ шума при угловом расстоянии между ЭС и ЛИ 20°

На рис. 8 изображена ВКФ ЭС и зондирующего сигнала при отсутствии сильных ЛИ шумов. Заметим, что максимум находится на нулевой задержке вследствие синхронизации при моделировании начала зондирующего и эхо сигналов.

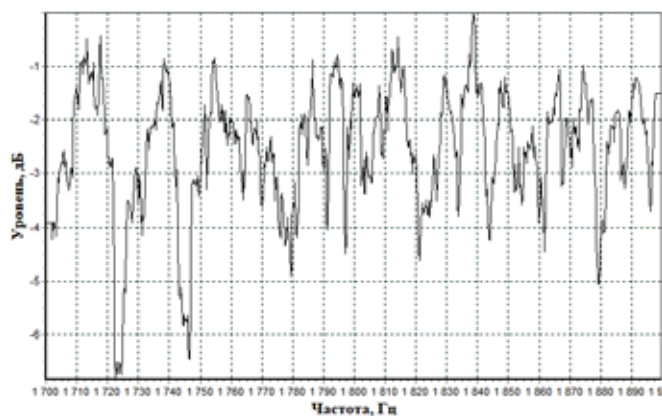


Рис. 5. Спектр сигнала, приведённый на рис. 4, после его сглаживания скользящим спектральным окном длиной в 9 спектральных отсчётов

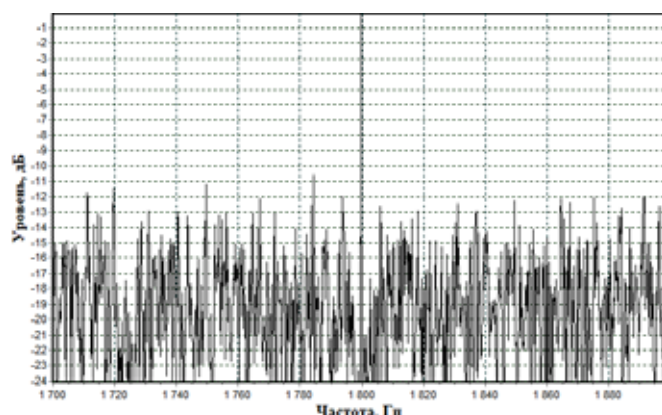


Рис. 6. спектр сигнала в направлении на объект локации после применения алгоритма (5)

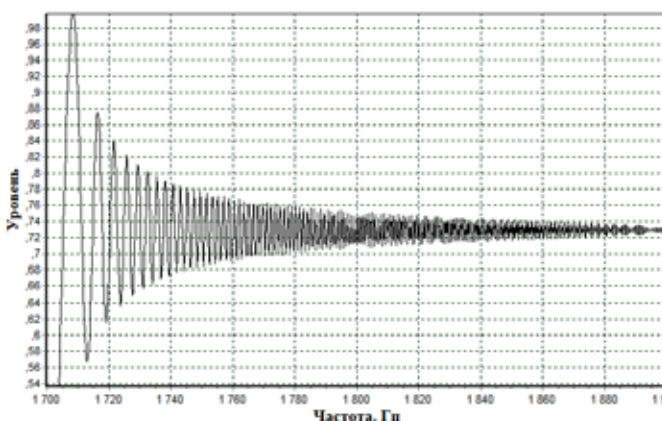


Рис. 7. Спектр ЛЧМ зондирующего сигнала

На рис. 9 изображена ВКФ сигнала в направлении на объект локации и ЗС при одновременном воздействии на вход КП сильного ЛИ шума. Видим, что максимум в ВКФ скрыт сигналом сильного ЛИ шума.

На рис. 10 демонстрируется ВКФ, изображённая на рис. 9 после применения алгоритма (5). В ВКФ

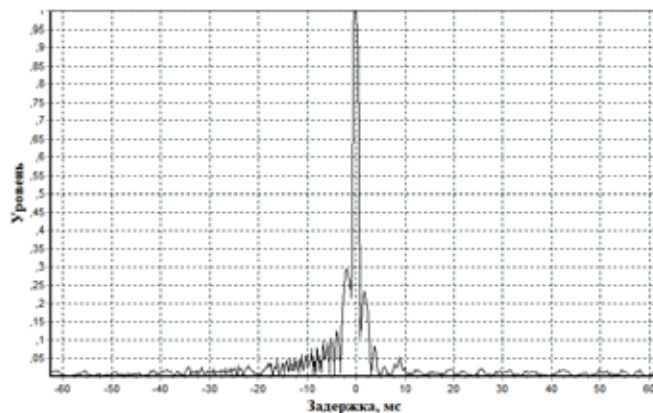


Рис. 8. ВКФ ЭС и зондирующего сигнала при отсутствии сильных ЛИ шумов

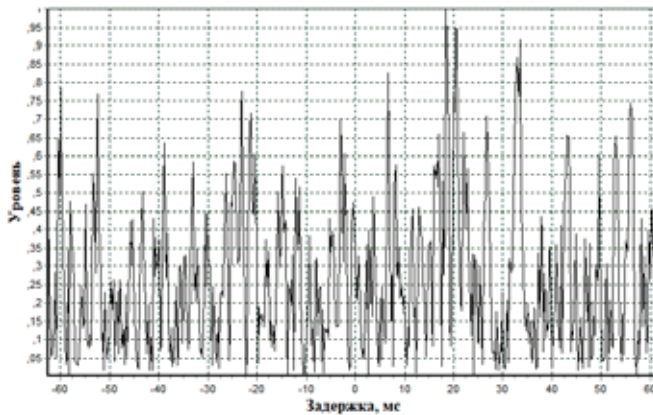


Рис. 9. ВКФ сигнала в направлении на объект локации и ЗС при одновременном воздействии на вход КП сильного ЛИ шума

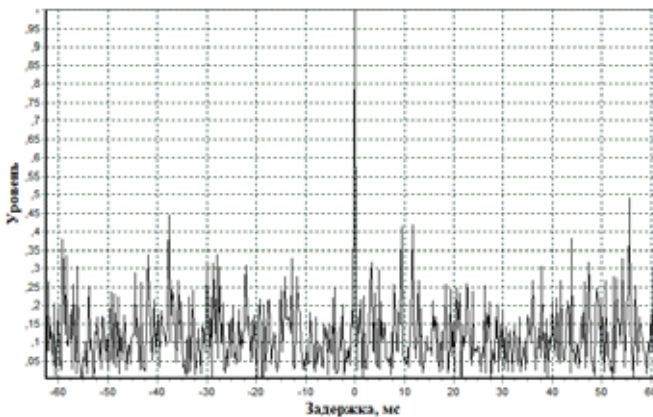


Рис. 10. Спектр сигнала на выходе ПК, ориентированного на объект локации, при приёме тонального эхосигнала в ситуации отсутствия ЛИ

уверенно обнаруживается максимум, свидетельствующий об обнаружении ЭС.

Из рассмотрения рис. 2–10 следует, что алгоритм подавления шумов ЛИ (5) при обнаружении ЭС в режиме гидролокации работает вполне удовлетворительно.

#### 4. Особенности обнаружения объектов в режиме мультистатической гидролокации

Режим мультистатической гидролокации отличается от режима моностатической гидролокации тем, что излучатели и приёмники разнесены в пространстве. Причём в РСПН в этом режиме одновременно функционирует несколько излучателей и несколько приёмников.

Режим мультистатической гидролокации по сравнению с режимом моностатической гидролокации имеет достоинства и недостатки. К достоинствам следует отнести:

- существенно меньший уровень реверберационной помехи на входе приёмного тракта;
- излучающие и приёмные АГС имеют меньшие массогабаритные характеристики;
- определение пеленга обнаруженного эхосигнала может осуществляться без применения компаса, что будет показано далее.

Недостатками мультистатической гидролокации являются:

- необходимость разносить частоты ЗС, излучаемых разными излучателями;
- поскольку расстояние между приёмником и каждым излучателем в процессе обработки ЭС в процессоре принимающей АГС, как правило, неизвестно, определить пеленг и дистанцию обнаруженного объекта, а следовательно, осуществлять его трассирование во времени при обработке в принимающей АГС не представляется возможным. Ввиду этого координаты объекта, обнаруженного в режиме мультистатической гидролокации, определяются на береговом пункте управления, куда доставляются результаты обнаружения объектов от всех принимающих АГС.

Поскольку координаты всех излучающих и принимающих АГС на береговом пункте управления известны (определены при их установке на позицию), алгоритм определения пеленга и дистанции объекта по каждому обнаруженному ЭС имеет вид [9, 10]:

$$P_o = P_{iz} \pm \Delta\varphi,$$

$$R_o = \frac{C_{zv} \cdot \Delta t}{2} \cdot \frac{C_{zv} \cdot \Delta t + 2 \cdot R_{iz}}{C_{zv} \cdot \Delta t + R_{iz} \cdot (1 - \cos \Delta\varphi)}, \quad (10)$$

где  $P_o$ ,  $R_o$  – пеленг и дистанция объекта на текущем цикле локации;  $C_{zv}$  – скорость звука на глубине приёмной антенны;  $\Delta\varphi$  – разность направлений обнаружения ЭС и ЗС;  $\Delta t$  – разность моментов времени обнаружения ЭС и ЗС;

$P_{iz}$ ,  $R_{iz}$  – пеленг и дистанция излучателя, вычисляемые в виде:

$$P_{iz} = \arctg \frac{X_{iz} - X_{rec}}{Y_{iz} - Y_{rec}},$$

$$R_{iz} = \sqrt{(X_{iz} - X_{rec})^2 + (Y_{iz} - Y_{rec})^2}, \quad (11)$$

$X_{iz}$ ,  $Y_{iz}$  – известные декартовы координаты излучающей АГС;

$X_{rec}$ ,  $Y_{rec}$  – известные декартовы координаты принимающей АГС.

### Заключение

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, функционирующих в режимах шумопеленгования и гидролокации.

В работе рассматривается несколько аспектов практического применения КП в режиме гидролокации, в частности, обосновано, что:

- обнаруживать МПО в режиме гидролокации целесообразно в диапазоне 1,5...2,0 кГц;
- для обнаружения МПО должны применяться длинные тональные зондирующие сигналы и сложные сигналы, построенные на кодах Костаса;
- алгоритм обнаружения эхосигналов должен одновременно обнаруживать сигналы приборов помех и других сильно шумящих объектов и осуществлять их подавление. Причём все процедуры, включая обнаружение и подавление, должны осуществляться на интервале длительности эхосигнала;
- обнаружение эхосигналов целесообразно осуществлять одновременно с использованием линейного алгоритма Бартлетта, обеспечивающего наибольшую помехоустойчивость при обнаружении слабых сигналов, и адаптивного алгоритма Кейпона, обладающего свойством сверхразрешения, повышающим разрешающую способность по пространству с ростом отношения сигнал/помеха;
- подавление сильных локальных сигналов, маскирующих эхосигналы, целесообразно осуществлять с использованием известного компенсационного алгоритма.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Пешехонов В.Г., Брага Ю.А., Машошин А.И. Сетецентрический подход к решению проблемы освещения подводной обстановки в Арктике // Известия 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.
4. Машошин А.И., Мельканович В.С. Исследование аспектов практического применения векторно-скалярного приёмника в режиме шумопеленгования // Подводные исследования и робототехника. 2025 (в печати).
5. Костас Дж. П. Свойства сигналов с почти идеальной функцией неопределённости в координатах «дальность-доплеровская частота» // ТИИЭР. 1984. Т. 72. № 8. С. 5–18 (Перевод с английского: Costas J.P. A study of a class of detection waveforms having nearly ideal range-Doppler ambiguity properties // Proceedings of the IEEE. 1984. Vol. 72. No. 8. P. 996–1009).
6. Малышкин Г.С., Мельканович В.С. Классические и быстрые проекционные адаптивные алгоритмы в гидроакустике. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2022. 268 с.
7. Малышкин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. В 2-х томах. Т. 2. Адаптивные методы. Санкт-Петербург, 2011. 374 с.
8. Давыдов В.С. Распознавание в гидролокации. СПб: ЛЭТИ. 2014. 188 с.
9. Конюхов Г.В., Машошин А.И. Алгоритм определения координат и параметров движения подводной цели при бистатической гидролокации // Гирокоспия и навигация. 2025. Т. 33, № 2(129). С. 98–122.
10. Патент № 2830066 Российская Федерация, МПК G01S 15/00 (2006.01). Способ определения координат и параметров движения подводных объектов при мультистатической гидролокации: № 2024117609: заявл. 26.06.2024; опубл. 12.11.2024 / Конюхов Г.В., Машошин А.И.; заявитель Акционерное общество "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор". – 13 с.: ил.

## Сведения об авторах

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

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

## Для цитирования:

Машошин А.И., Мельканович В.С. ИССЛЕДОВАНИЕ АСПЕКТОВ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОГО ПРИЁМНИКА В РЕЖИМЕ ГИДРОЛОКАЦИИ // Подводные исследования и робототехника. 2025. № 4 (54). С. 22–30. DOI: 10.37102/1992-4429\_2025\_54\_04\_02. EDN: IINZTA.





# INVESTIGATION OF A VECTOR-SCALAR RECEIVER PRACTICAL APPLICATION IN ACTIVE 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 (CR) in the active mode in distributed underwater surveillance systems. It is shown that it is advisable to detect low-noise underwater objects (LNUO) in the active mode in the range of 1.5...2.0 kHz; long tonal probing signals and complex signals based on Costas codes should be used to detect LNUO. The echo detection algorithm should simultaneously detect and suppress signals from interference devices and other highly noisy objects, and all procedures, including detection and suppression, should be performed over the echo duration interval. It is advisable to detect echoes simultaneously using the linear Bartlett algorithm, which provides the greatest noise immunity when detecting weak signals, and adaptive the Capon algorithm, which has the property of super-resolution. It is advisable to suppress strong local signals masking echo signals using a well-known compensation algorithm, taking into account the replacement of accumulation of correlation matrices in time with accumulation in frequency.

**Keywords:** combined (vector-scalar) receiver, sonar, adaptive 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. – SFU news. Technical sciences. 2012. No. 3. P. 219–227.
2. Borodavkin A.N., Bogomolov A.P., Durnev I.N., Titkov I.V. Radio hydroacoustic 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 Publ., 1989.
4. Mashoshin A.I., Melkanovich V.S. Investigation of aspects of practical application of a vector-scalar receiver in the noise direction finding mode // Underwater research and robotics. 2025 (in print).
5. Malyshev G.S. Optimal and adaptive methods of hydroacoustic signal processing. In 2 volumes. Volume 2. Adaptive methods. JSC Concern Central Research Institute Electropribor. 2011. 374 p.
6. Malyshev G.S., Melkanovich V.S. Classical and fast projection adaptive algorithms in hydroacoustics. St. Petersburg: SSC RF JSC “Concern “Central Research Institute “Electropribor”. 2022. 268 p.
7. Costas J. P. Properties of signals with an almost ideal uncertainty function in the range-Doppler frequency coordinates // TIHER. 1984. Vol. 72, No. 8. P. 5–18 (Translated from English: Costas J.P. A study of a class of detection waveforms having nearly ideal range-Doppler ambiguity properties // Proceedings of the IEEE. 1984. Vol. 72, No.8. P. 996–1009).
8. Davydov V.S. Recognition in sonar. St. Petersburg: LETI, 2014. 188 p.
9. Konyukhov G.V., Mashoshin A.I. Algorithm for determining the coordinates and motion parameters of an underwater target during bistatic sonar // Gyroscopy and navigation. 2025. Vol.33, No. 2(129). P. 98–122.
10. Patent of the Russian Federation No. 2830066 with priority dated 06/26/2024 under application No. 2024117609. A method for determining the coordinates and motion parameters of underwater objects during multistatic sonar / Konyukhov G.V., Mashoshin A.I. Publ. 12.11.24, bulletin No. 32.

## 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 ACTIVE MODE. Underwater investigations and robotics. 2025. No. 4 (54). P. 22–30. DOI: 10.37102/1992-4429\_2025\_54\_04\_02. EDN: IINZTA.