

ГИБРИДНЫЙ АНПА КОНТРОЛЯ ШУМОВОЙ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ

Ю.В. Матвиенко, В.В. Костенко, С.А. Переселков, Ю.А. Хворостов

В статье обоснован облик автономного необитаемого подводного аппарата, несущего на борту векторно-скалярный приемник звука. Аппарат оснащен системами изменения его плавучести и остойчивости, обеспечивающими возможность изменения его функций. Предлагаемая конфигурация наряду с обычными функциями автономного аппарата обеспечивает возможность реализации режима подводного глайдера для выхода в удаленный район патрулирования подводной обстановки, возможность реализации малозумной приемной гидроакустической станции с управляемым режимом движения по толще воды и режим радиобуя со средствами навигации и связи. Отмечено также, что перспективы применения такого гибридного аппарата определяются возможностью решения задач назначения в реальном времени на его борту. Описаны предложенные алгоритмы обнаружения и пеленгования источника широкополосного шума системой обработки данных в составе аппарата.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, подводный глайдер, пассивная система контроля подводной обстановки, векторно-скалярный приемник звука, обнаружение подводного источника широкополосного шума.

Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) находят все большее применение в различных реальных работах и исследованиях. От первых макетных образцов, оборудованных средствами, способными решать отдельные конкретные задачи, например [1], пройден большой путь до многоцелевых аппаратов и комплексов, предназначенных для широкого спектра работ по автоматическому поиску и обследованию морского дна и подводной инфраструктуры [2]. Для ряда задач такие комплексы оказываются достаточно сложными и дорогими и в настоящее время целесообразно вернуться в сторону развития узкоспециализированных подводных роботов, инструментальное оборудование которых служит для решения важных конкретных задач, например экологического мониторинга в локальных акваториях [3] или больших районов экологических катастроф [4–5]. Необходимость оперативного получения данных для принятия решений ведет к тому, что выполнение таких задач целесообразно производить группой однотипных недорогих аппаратов, эффективность применения которых дополнитель-

но будет определяться наличием соответствующих средств связи и навигации.

Одной из таких важных прикладных задач является контроль подводной обстановки в локальных акваториях на основе анализа шумового звукового поля. Существующие методы контроля основаны на использовании активных и пассивных гидроакустических позиционных или мобильных систем. Среди последних наиболее перспективны системы с использованием акустических комбинированных векторно-скалярных приемников звука (ВСП) [6, 7]. Размещение приемной системы на борту подводного робота обеспечивает увеличение эффективности систем за счет поиска и приема сигналов из зон повышенной освещенности контролируемого звукового поля. Кроме того, группой таких роботов обеспечивается быстрое оборудование контролируемой акватории распределенной многоэлементной антенной. При наличии эффективных алгоритмов обработки шумовых сигналов и средств связи смогут быть решены задачи обнаружения, определения местоположения и классификации нарушителя в контролируемой акватории [8–11]. В ряде выполненных исследований были предложены технические реше-

ния роботов – носителей таких приемных систем, обоснован порядок их применения с учетом особенностей формирования звуковых полей в различных акваториях [12].

Однако к аппаратам, решающим такую задачу, предъявляются дополнительные требования для обеспечения эффективного применения акустических приемников, связанные с исключением собственных акустических шумов и необходимостью движения в районе работ для поиска зон повышенной освещенности контролируемого звукового поля [13]. Переконфигурирование АНПА со штатными средствами движения в станцию приема слабых сигналов с возможностью бесшумного управляемого движения может быть реализовано гибридным АНПА.

В статье предложен проект специализированного гибридного АНПА контроля подводной обстановки, оснащенного ВСП. Статья содержит три раздела. Первый, на основе анализа модели использования, обеспечивающей решение задач назначения в автоматическом режиме, обосновывает облик гибридного аппарата, объединяющего возможности автономного транспортного средства и бесшумной подводной станции с оперативно развертываемым поверхностным радиобуем. Во втором разделе рассмотрены ключевые системы такого аппарата. В третьем обоснованы технологии решения задач обнаружения с использованием ВСП в реальном времени, реализация которых допускает их применение на борту подводного робота.

■ Модели применения гибридного АНПА контроля обстановки

Анализ конфигурации гибридного аппарата целесообразно начать с рассмотрения его модели применения по назначению. Гибридный АНПА для систем оперативного контроля подводной обстановки, применяемый с борта носителя или базы, – это подводный робот, решающий задачи назначения с использованием автоматического изменения своих функций. Таких функций две. Первая обеспечивает его применение в качестве транспортного средства и носителя оборудования для приема и обработки акустических шумовых сигналов. Вторая – формирование бесшумной подводной станции приема сигналов с управляемым перемещением при поиске зон повышенной освещенности контролируемого звукового поля. Станция также должна быть оснащена средствами радио- и спутниковой связи и навигации и обладать возможностью периодического или экстренного всплытия на поверхность, во время

которого средствами радиосвязи в пункт управления передаются результаты контроля наблюдаемого акустического поля для дальнейшей обработки и принятия решения оператором.

Кроме того, при патрулировании ГАНПА в заданной акватории целесообразно обеспечить периодическое перемещение приемной системы по глубине от поверхности к дну и обратно с контролем уровней поля и зависание на горизонтах с высоким уровнем сигнала для накопления данных. При этом важным требованием также является знание текущего местоположения аппарата при определении пеленга на источник шума.

Модель использования гибридного аппарата, несущего ВСП, в системах контроля подводной обстановки с учетом названных рекомендаций по организации приема данных включает этап движения аппарата с выходом в точку старта работ, этап приема сигналов при контроле шумовой обстановки в акватории и этап доставки результатов контроля в пункт управления. Порядок формирования необходимых условий для изменения названных функций аппарата поясняется ниже.

Порядок выхода в заданную географическую точку

При выходе в заданную географическую точку начала работ целесообразно обеспечить движение аппарата по поверхности моря или под водой в режиме АНПА и движение под водой в режиме глайдера. В режиме АНПА аппарат стартует от носителя или береговой базы, использует штатную систему движения и координируется по данным спутниковой навигации. При движении под водой аппарат уходит на заданную глубину погружения. При этом численные координаты аппарата определяются по данным датчиков курса и скорости движения относительно грунта. По достижении заданной точки аппарат всплывает на поверхность и уточняет свои географические координаты. При этом накопившаяся погрешность счисления координат может быть скомпенсирована маневрами аппарата по поверхности.

Выход в назначенную позицию в таком режиме целесообразен, если дальность района развертывания не превышает нескольких километров от носителя или базы. Если дальность района развертывания превышает десятки километров, то наиболее экономичным является перемещение аппарата в толще воды в режиме подводного планера – глайдера без использования движителей за счет циклического изменения плавучести Q и угла дифферента $\psi_{ст}$ с использованием крыльевой системы в конструкции аппарата [14].

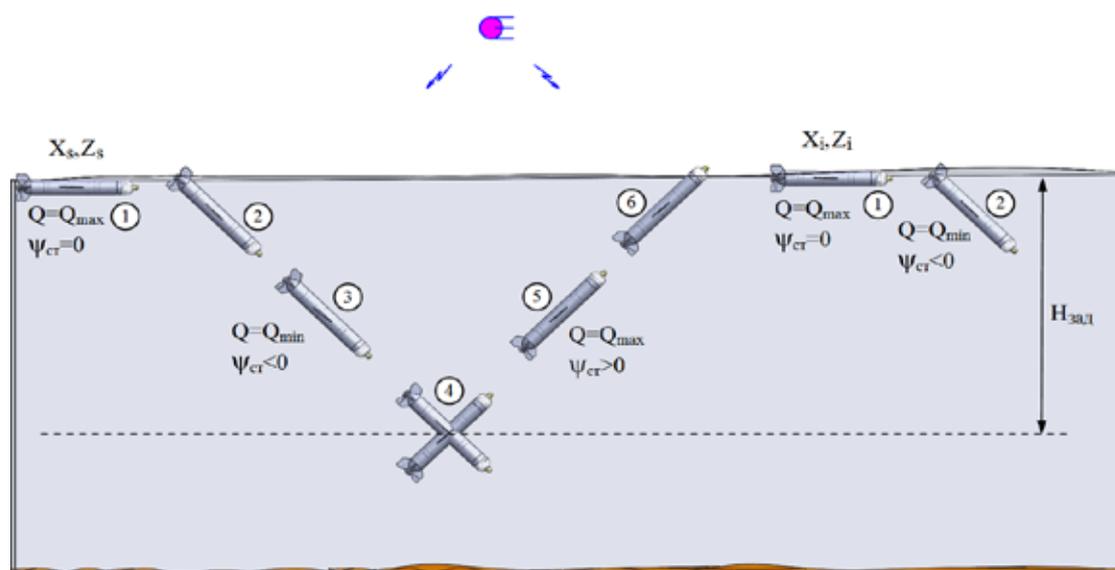


Рис. 1. Движение гибридного АНПА в точку мониторинга акватории в режиме глайдера

Такой аппарат должен обладать системой регулирования плавучести (СРП) и системой регулирования момента остойчивости (СРМО). В точке старта СРП отработывает максимальное значение отрицательной плавучести, а СРМО – заданное значение отрицательного дифферента на нос. При этом аппарат заглубляется и планирует в горизонтальной плоскости с ходом вперед. По достижении аппаратом заданной глубины погружения СРП программно изменяет значение плавучести на максимальное положительное, а СРМО устанавливает заданный угол положительного дифферента на корму. При этом АНПА всплывает с горизонтальным перемещением вперед. После всплытия до поверхности снова определяются координаты аппарата средствами спутниковой навигации, при необходимости корректируется направление следующего «нырка» по курсу кратковременным включением маршевых движителей. После этого цикл повторяется до тех пор, пока аппарат не достигнет назначенной географической точки на поверхности моря. Движение гибридного АНПА в режиме глайдера иллюстрирует рис. 1. Очевидно, что данный режим обеспечивает максимальную дальность движения. Кроме того, можно отметить и возможность работы приемной системы во время планирования при переходе.

Порядок работы аппарата при контроле шумовой обстановки в акватории

Рабочий режим контроля шумовой обстановки при размещении ВСП на борту аппарата может быть реализован следующей последовательностью действий (рис. 2).

Этап 1. Перевод ГАНПА в вертикальное положение и движение на заданную глубину с последующим бесшумным позиционированием для записи шумовых акустических полей. Переводом ГАНПА в вертикальное положение обеспечивается штатная рабочая ориентация ВСП, размещенного в носовой части аппарата для приема сигналов по горизонту наблюдения. Реализуется этот режим системой регулирования момента остойчивости и системой регулирования плавучести [15]. В результате аппарат переходит в устойчивое вертикальное положение, соответствующее поз. 1 рисунка 2, а. При этом обеспечивается минимальный снос аппарата в процессе вертикального движения на заданную глубину приема сигналов от точки с определенными на поверхности координатами. Для ускорения вертикального перемещения аппарата могут использоваться маршевые движители, которые отключаются при необходимости бесшумного зависания на заданной глубине погружения в режиме приемной станции со стабилизацией глубины работой СРП (см. поз. 2 рис. 2, а). На конечной фазе этого этапа возможна постановка аппарата на грунт в вертикальном положении (см. поз. 3 рис. 2, а), которая позволяет «прослушивать» придонные слои воды.

Этап 2. Переконфигурирование в малошумную приемную станцию. Этот режим обеспечивает создание оптимальных условий для работы ВСП с минимальным влиянием шумов, создаваемых работой систем ГАНПА и потоками обтекания его корпуса. Для реализации этого режима модуль ВСП, имеющий необходимый запас плавучести, может быть выпущен на тонком кабеле связи из корпуса аппарата. Длина этого кабеля регулируется электрической лебедкой

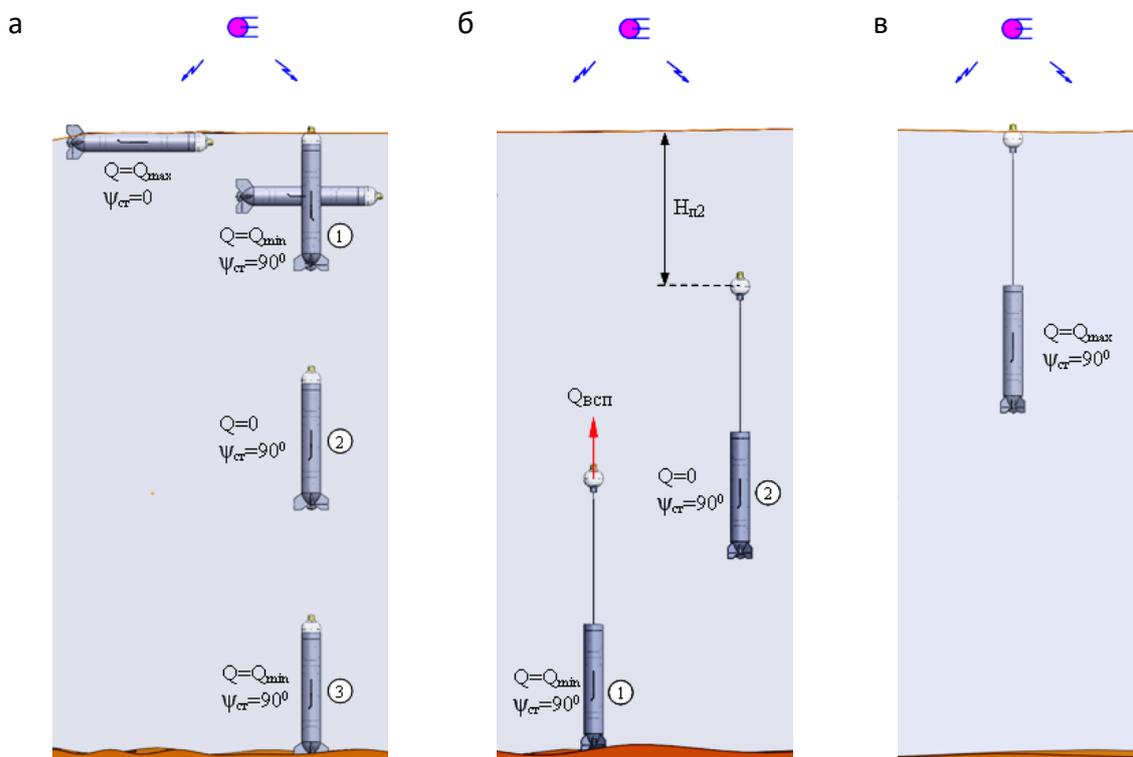


Рис. 2. Гибридный АНПА в режимах маломощной приемной станции: а – перевод в вертикальное положение, б – переконфигурирование в маломощную приемную станцию, в – транслирование результатов с уточнением географических координат

устройства выпуска/приема ГАНПА, оборудованного устройством автоматической укладки и измерителем выпущенной длины. Представляется целесообразным выпуск модуля ВСП производить в положении аппарата, соответствующем поз. 1 рис. 2, б. При этом аппарат имеет максимальное значение отрицательной плавучести и статический дифферент $+90^\circ$. Далее для бесшумного позиционирования приемной станции на заданной глубине используется система регулирования плавучести аппарата (см. поз. 2 рис. 2, б). При необходимости можно организовать бесшумное вертикальное движение приемной станции со скоростью $\pm 0,01$ м/с в заданном диапазоне глубин. К достоинствам этого режима работы следует отнести минимизацию горизонтального сноса аппарата и, как следствие, стабильность координат модуля ВСП в пространстве при пеленговании источника шума.

Этап 3. Всплытие станции на поверхность для транслирования результатов в точку сбора информации и уточнения своих географических координат. Всплытие аппарата на поверхность может либо происходить с заданными интервалами времени, либо инициироваться в результате оперативной обработки данных о шумовых акустических полях с выявлением объекта пеленгования. Положение аппарата с выпущенным модулем ВСП, на котором размеще-

на соответствующая антенная система, показано на рис. 2, в. При обнаружении источника шума СРП аппарата формирует максимальную положительную плавучесть, которая обеспечивает экстренное всплытие модуля ВСП на поверхность. Быстрый подъем на поверхность при обнаружении источника шума позволяет точнее определить собственные координаты ВСП в момент обнаружения и соответственно точнее определить пеленг на источник шума, а также в кратчайший срок доложить результат миссии в пункт управления.

■ Конструктивный облик гибридного АНПА

Гибридность аппарата контроля обстановки заключается в реализации различных видов движения – активного, с использованием движителей АНПА, и пассивного, с использованием СРП и СРМО, а также в создании условий эффективной работы акустической антенны для приема слабых сигналов по всему горизонту наблюдения. Кроме того, принципиальной особенностью является формирование режимов движения аппарата текущими значениями его остаточной плавучести и момента остойчивости. Выработка решений для изменения плавучести и остойчивости выполняется системой бортового управления в ре-

альном времени на основе формализованных условий по результатам текущего решения задач назначения. Фактически характеристики перечисленных систем регулирования остойчивости и плавучести, приема и обработки данных и связанных с ними систем навигации и связи будут определять перспективы ГАНПА при его применении в задачах контроля подводной обстановки.

Первый опыт создания гибридного АНПА для контроля подводной обстановки был получен ИПМТ ДВО РАН в работе, выполненной по заказу Фонда перспективных исследований, при разработке интеллектуального самоходного буя (ИСБ) «Монитор» [12]. ИСБ оборудован двумя разнесенными по длине аппарата векторно-скалярными приемниками звука и способен в режиме АНПА выходить в заданную географическую точку по поверхности, выключить движительную систему и конфигурироваться в малошумную приемную станцию. Для этого аппарата была разработана система управления его плавучестью, обеспечивающая формирование небольшой положительной или отрицательной плавучести, за счет которой ИСБ в режиме бесшумной приемной станции перемещался по глубине без хода с минимальной вертикальной скоростью и заданным значением статического угла дифферента. При этом на его борту устанавливался режим тишины, необходимый для качественной работы приемной системы.

В ходе сбора данных ИСБ мог работать как полностью в автономном режиме с накоплением данных, так и в режиме прямой трансляции текущих данных через оптоволоконный кабель связи с поверхностным буксируемым поплавком-ретранслятором, обо-

Таблица 1. Основные характеристики демонстрационного образца ИСБ

Наименование характеристики	Значение
Масса на воздухе, кг	98
Размеры, м: ДхШхВ	2,33x0,592x0,586
Предельная рабочая глубина, м	150
Энергоемкость системы энергообеспечения, Вт·ч	2x1024
Максимальная скорость хода в режиме АНПА, м/с	2,5
Скорость вертикального перемещения при приеме сигналов в режиме малошумной станции, м/с	0.01-0,03

рудованным средствами радиосвязи. Дальнейшая обработка данных выполнялась в камеральном режиме в посту управления. Управление движением, маневрированием, погружением и зависанием самоходного буя осуществлялась либо с пульта оператора по оптоволоконному кабелю, либо по Wi-Fi через поплавком-ретранслятор. На рис. 3 и в табл. 1 приведены конструктивный облик ИСБ и некоторые его характеристики.

Предлагаемый проект гибридного АНПА развивает идеи, заложенные при создании ИСБ, и отличается возможностями решения задач назначения на борту аппарата в реальном времени, порядком формирования функционального облика и доставки результатов в пункт управления. Фактически, в предлагаемом гибридном аппарате конструкция известного ИСБ-АНПА дополнена системой регулирования момента остойчивости и оборудована крыльевой си-



Рис. 3. Внешний вид ИСБ и фрагменты его использования в режиме телеуправления от судна-носителя через оптоволоконный кабель и поплавком-ретранслятор

стемой. За счет этих систем реализуется подводный планер – глайдер с экономичным горизонтальным движением за счет изменения плавучести, статического дифферента и наличия крыльевой системы. Аппарат также несет на борту модуль приема сигналов, который установлен в носовой части и выполнен с возможностью выхода и возвращения в корпусную часть ГАНПА. В конструкции аппарата система регулирования момента остойчивости обеспечивает регулирование статического угла дифферента в диапазоне ± 90 град за счет вращения маятникового модуля нейтральной плавучести, состоящего из груза и блока плавучести. Особенности системы описаны в [15, 16]. Система регулирования плавучести состоит из двух разнесенных по длине аппарата модулей, которые обеспечивают изменение плавучести за счет изменения объемов эластичных мембран [17, 18].

Состав основного оборудования такого аппарата приведен на функциональной схеме рис. 4, возможный конструктивный облик – на рис. 5, а основные характеристики сведены в табл. 2. Конфигурация аппарата в режиме приемной станции с выпущенным

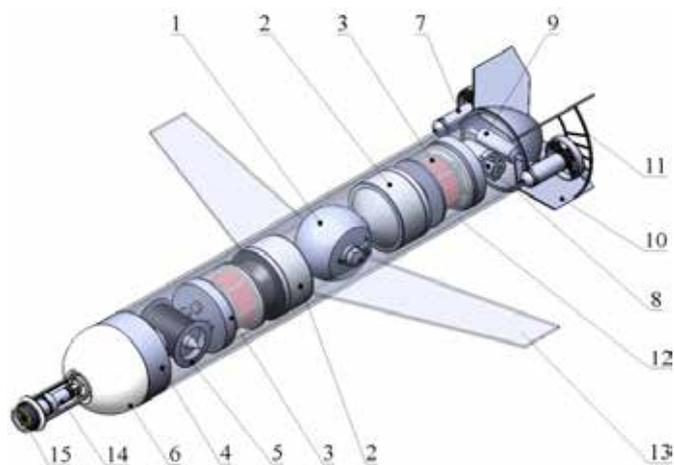


Рис. 5. Конструктивный облик гибридного АНПА контроля подводной обстановки:

1 – система регулирования момента остойчивости, 2 – система регулирования плавучести, 3 – блок электроники и аккумуляторных батарей, 4 – ловитель выпускаемого модуля ВСП, 5 – устройство выдачи/приема выпускаемого модуля ВСП, 6 – выпускаемый модуль ВСП, 7 – маршевый движитель, 8 – блок управления привода поворота маршевых двигателей, 9 – привод поворота маршевых движителей, 10 – стабилизатор, 11 – защита движителей, 12 – каркас-обтекатель аппарата, 13 – крыло, 14 – антенны радиосвязи, 15 – приемник СНС

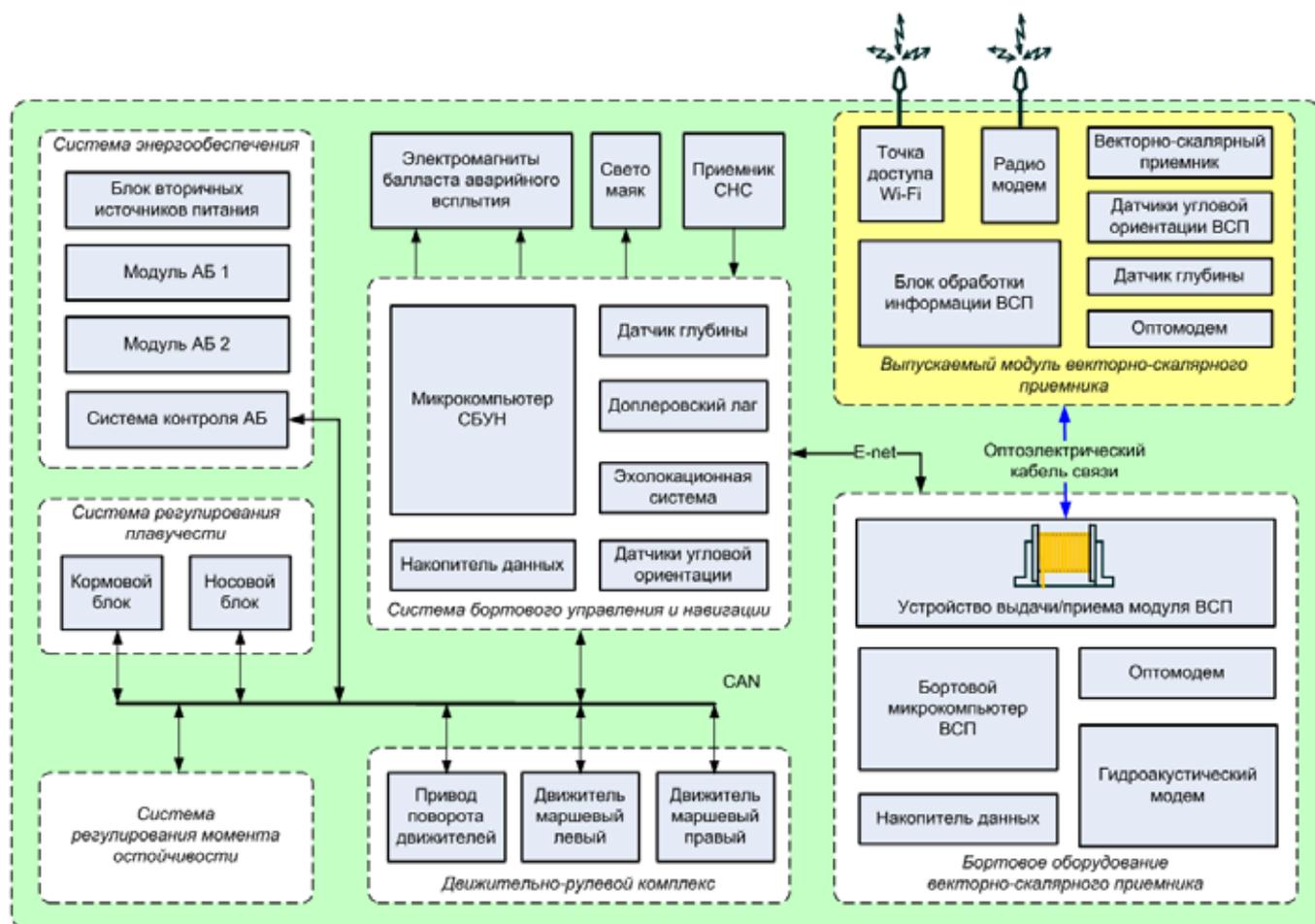


Рис. 4. Функциональная схема гибридного АНПА контроля подводной обстановки

Таблица 2. Ориентировочные технические характеристики гибридного АНПА

Наименование характеристики	Значение
Масса на воздухе не более, кг	100
Размеры, не более: длина x ширина x высота:	2,30×1,7×0,4
Предельная рабочая глубина, м	500
Энергоемкость системы энергообеспечения, Вт·ч	2×1024
Максимальная скорость хода в режиме АНПА не менее, м/с	2,0
Автономность хода в режиме АНПА на максимальной скорости не менее, км	10
Скорость вертикального перемещения в режиме приемной станции, м/с	0.01-0,03
Максимальная скорость хода в режиме глайдера, м/с;	0,35
Автономность хода в режиме глайдера, не менее, месяцев (суммарная дальность горизонтального хода – не менее 1500 км)	2

модулем ВСП показана на рис. 6. Приемная система, включающая ВСП специальной конструкции и систему обработки данных, средства размещения приемника на борту аппарата и ее особенности более подробно рассмотрены ниже.

Система бортового управления ГАНПА в дополнение к типовым режимам работы АНПА обеспе-

чивает управление функциями подводного планера и приемной акустической станции. Эти функции включают обработку данных приемной системы и выработку команд управления движением, величинами момента остойчивости и остаточной плавучести аппарата по результатам текущего решения задач назначения. Средствами программного управления вырабатываются также решения для изменения текущих функций АНПА, необходимые для автоматизации процесса решения задачи назначения.

■ Приемная система контроля подводной обстановки на борту ГАНПА

Ключевым условием целесообразности применения автономного гибридного аппарата в системах контроля подводной обстановки является возможность решения задач контроля в реальном времени на борту аппарата. Формирование на борту аппарата результата контроля в виде факта обнаружения источника шума, определение его угла пеленга и спектрального состава шумового сигнала резко сокращают частоту сеансов связи и объем информации, которую необходимо доставить в пункт управления. Это позволяет при развертывании группы роботов в акватории фактически в режиме реального времени контролировать текущую подводную обстановку. Для решения задач назначения аппаратура приема и обработки слабых шумовых сигналов, размещаемая на борту робота, и условия работы систем самого робота должны отвечать ряду требований.

Известно, что при движении с использованием штатных движителей собственный шум аппарата, формирующийся гребными винтами, вибрациями и

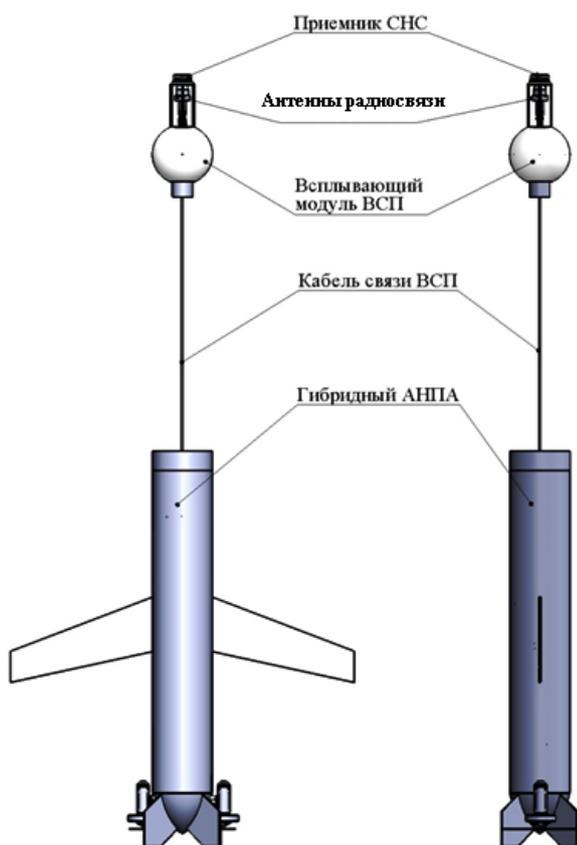


Рис. 6. Конструктивный облик гибридного АНПА в режиме приемной станции

гидродинамическим обтеканием корпуса достаточно велик, находится в частотном диапазоне работы приемной системы [13] и необходимо принять все меры для его исключения. Другое требование связано с влиянием корпусных конструкций на характеристики направленности ВСП, что ведет к увеличению погрешностей угловых измерений. Поэтому в предлагаемом проекте АНПА переконфигурируется в бесшумную приемную станцию, а штатным рабочим режимом приема сигналов является положение станции с выпущенным на информационном кабеле приемным модулем ВСП. При этом ВСП в модуле устанавливается на карданном подвесе внутри шарообразного звукопрозрачного обтекателя, что позволяет удерживать его в горизонтальном положении независимо от наклона приемного модуля (наклон может возникать при наличии течения в районе работ).

В верхней части приемного модуля располагаются антенны навигации и связи, с помощью которых обеспечивается информационный обмен данными с точкой сбора информации при нахождении приемного модуля на поверхности моря. В нижней части приемного модуля размещен герметичный контейнер с блоком электроники, содержащим электронные функциональные элементы, обеспечивающие работу приемной системы. Приемный модуль связывается с носителем (ГАНПА) кабелем связи, по которому подается электропитание, обеспечивается информационный обмен и синхронизация работы по системе единого времени. Интеграция ВСП в состав ГАНПА поясняется структурной схемой, приведенной на рис. 7.

В модуле цифровой обработки данных предполагается реализовать алгоритм обнаружения источника широкополосного шума, ос-



Рис. 7. Структурная схема приемного модуля с векторно-скалярным приемником звука в составе гибридного АНПА

нованный на анализе временной зависимости углового распределения потоков акустической энергии всех принимаемых частот. Математическая модель решения задачи основана на том, что поток энергии от источника концентрируется в определенном угловом секторе, значение которого в течение процесса обнаружения может меняться незначительно и должно соответствовать предполагаемой динамике движения источника. Кроме того, учитываются особенности структуры акустических полей шумового источника, которые заключаются в определении энергетических параметров звукового поля, наименее подверженных влиянию помех, и выделении частотных каналов, в которых преобладает энергия бегущих звуковых волн.

Процедуры учета структуры полей основаны на том, что приемная система с векторно-скалярным приемником на основе фазовых

сдвиг между давлением и колебательной скоростью позволяет представить энергию звукового поля в виде суперпозиции трех составляющих [19]: энергии изотропного (диффузного) шума, потока энергии плоских бегущих волн (анизотропная энергия поля), которые имеют отличный от нуля средний вектор потока энергии и формируют сигналы звукового давления и горизонтальных компонент колебательной скорости с разностью фаз $0/\pi$ в зависимости от направления прихода волны и энергии стоячих волн.

Приведенные особенности реализуются в устройстве обнаружения следующим образом. Ослабление влияния диффузной помехи обеспечивается путем осреднения на интервале накопления данных взаимных спектров давления и компонент колебательной скорости, вычисленных на установленном временном промежутке. При таком осреднении происходит подавление помехи приема изотропного (диффузного) шума из-за отсутствия корреляции случайных с нулевыми первыми моментами сигналов звукового давления и компонент колебательной скорости, принятых от помехи. Это свойство алгоритма энергетической обработки по потокам энергии крайне важно, поскольку при взволнованной поверхности моря изотропный шум зачастую значительно превалирует над анизотропным сигналом от объектов. При определенных условиях алгоритм позволяет проводить обнаружение широкополосного локализованного источника шума при отношении сигнал/помеха до минус $30\div 40$ дБ [20, 21].

Кроме того, в структуру устройства обнаружения введена операция оценки в каждом сформированном частотном канале энергетического параметра принятого сигнала – вычисление нормированных функций когерентности компонент вектора плотности потока энергии бегущих волн со средними значениями давления и компонент скорости. На основе значений функций когерентности по назначаемым пороговым уровням выполняется предварительный отбор частотных каналов, в которых энергетические параметры принятого сигнала далее используются для расчета углов прихода потоков энергии и построения углового распределения приходящей энергии. Таким образом, учет особенностей структуры звуковых полей, которые выявляются при применении ВСП в приемной системе, обеспечивает предварительную фильтрацию данных, в значительной степени уменьшая влияние помех, и обеспечивает при формировании время-углового распределения энергии ее накопление только в частотных каналах, отвечающих установленным количественным критериям.

Дополнительные возможности открывает анализ интерференционной структуры спектрограмм сигналов, регистрируемых каналами ВСП, формируемой движущимся источником в результате взаимодействия распространяющихся мод. В случае применения ВСП объем контролируемых энергетических параметров расширяется в сравнении с обычным скалярным приемником, причем наиболее информативными являются параметры по компонентам вектора потока акустической мощности, а более устойчивыми к действию помех – фазовые характеристики. Принципиальным является то, что спектрограммы этих компонент при идентичности сигнальных составляющих несут различные составляющие помехи, связанные с пространственной зависимостью помехи в каналах ВСП. При совместном анализе всего набора возможных информационных параметров можно рассчитывать на решение задачи обнаружения при меньшем уровне входного сигнала. Кроме того, важнейшим условием дополнительного повышения помехоустойчивости ВСП может стать переход к формированию и обработке голографических интерферограмм, учитывающих динамику изменения интерференционной структуры спектрограмм параметров звукового поля во времени [22].

На основе расчетов углового прихода акустической энергии для выделенных частотных каналов и формирования углового распределения энергии путем суммирования энергий отдельных частот по узким угловым секторам, охватывающим весь горизонт наблюдения, далее формируется порог по среднему значению энергий для всего горизонта и принимается решение об обнаружении, если максимальный уровень превышает порог по ранее установленному критерию (например 6, 10, 20 дБ). Причем при первичном обнаружении и недостаточном превышении порога бортовой системой управления вырабатывается команда на зависание приемной станции на достигнутой глубине для накопления данных и проверки результата обнаружения. Критерий обнаружения может ужесточаться.

Далее, при фиксации факта обнаружения источника шума устанавливаются его угловое положение по средней частоте углового сектора с максимальной энергией и спектральный состав источника шума по вкладу выделенных частот, формирующих суммарную энергию по выделенному угловому направлению. Проверяется также временная устойчивость величины секторной интенсивности потока энергии доминирующего углового сектора, а также соответствие временной изменчивости ориентации доминирующего углового сектора предполагаемой динамике движения источника.

Результат обнаружения формируется в виде короткого формализованного сообщения, включающего факт и время обнаружения, пеленг, спектральный состав и значение порога и передается в систему бортового управления АНПА, которая выдает команду в систему регулирования плавучести для формирования максимальной положительной остаточной плавучести, обеспечивающей экстренное всплытие на поверхность. После всплытия модуля ВСП на поверхность дополнительно определяются текущие координаты аппарата, которые в составе формализованного сообщения об обнаружении передаются по радио или спутниковой связи в пункт принятия решения.

При низком уровне энергии в угловых секторах АНПА в режиме приемной станции продолжает заданную миссию медленного вертикального погружения. Достигнув дна ГАНПА изменяет небольшую отрицательную плавучесть на небольшую положительную и начинает вертикально всплывать вплоть до выхода на поверхность модуля ВСП, решая задачи обнаружения. На поверхности активируется режим радиобуя, а системой управления передается формализованное сообщение о координатах и отсутствии результатов поиска и принимается команда из пункта

принятия решений об уточнении задания на текущую миссию, например перехода ГАНПА в другую стартовую точку мониторинга. В этом случае активируется переход ГАНПА из режима приемной станции в режим самоходного АНПА или глайдера.

Заключение

Предложен проект ГАНПА – подводного робота, контролирующего подводную остановку на основе анализа шумового акустического поля векторно-скалярными приемниками звука. ГАНПА способен автоматически изменять свои функции, включающие функцию транспортного средства и носителя оборудования контроля с реализацией активных и пассивных режимов движения и функцию бесшумной подводной станции приема акустических сигналов с управляемым перемещением при поиске зон повышенной освещенности контролируемого звукового поля, оснащенную средствами радио и спутниковой связи и навигации.

Исследование выполнено с использованием средств гранта Российского научного фонда № 23-61-10024

ЛИТЕРАТУРА

1. Глухов Ю.А., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В., Молоков Ю.Г., Никифоров В.В., Рылов Н.И. Использование подводного аппарата «Скат» для автоматизации гидрохимических исследований озера Байкал // Подводные аппараты с программным управлением и их системы. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1977.
2. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк; [отв. ред. Л.В. Киселев]; ФГБУН Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН. Владивосток, 2018. 368 с. ISBN 978-5-7311-0486-79.
3. Инзарцев А.В., Борейко А.А., Боровик А.И., Ваулин Ю.В., Каморный А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Сидоренко А.В., Спорышев М.С., Щербатюк А.Ф. Опыт использования АНПА типа МТ-2010 для экологических исследований в бухте Золотой Рог // Экологические системы и приборы. 2018. № 12. С. 38–45. ISSN: 2072-9952. DOI: 10.25791/esip.12.2018.306.
4. Lippsett L., Spills G. O. Gliders tracked potential for oil to reach the east coast // OCEANUS Magazine. 2011. Vol. 48. P. 3.
5. Маевский А.М., Занин В.Ю., Турсенев С.А. Групповое применение подводных планеров в задаче мониторинга подводных потенциально-опасных объектов на примере ликвидации аварийных разливов нефти // Вестн. Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2021. № 2. С. 25–35.
6. Захаров К.Л. Частотно-угловые характеристики гидроакустического сигнала при использовании векторно-фазового метода. Текст: электронный // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление: науч. электрон. журн. 2014. Т. 10, № 3 (24). URL: www.gypravlenie.ru/wp-content/uploads/2014/10/07-Zakharov.pdf (Дата обращения: 10.03.2023)
7. Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В., Глушенко М.Ю., Кузькин В.М., Переселков С.А. Экспериментальные исследования системы обнаружения малозумных подводных целей в мелководных акваториях // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 3 (41). С. 4–14.
8. Патент 2699923 Российская Федерация, МПК G01S 3/80 (2006.01). Способ обнаружения подводного источника широкополосного шума: № 2019101778: заявл. 23.01.2019; опубл. 11.09.2019 / Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук. 15 с.: ил.
9. Патент 2715431 Российская Федерация, МПК G01S 3/80 (2006.01). Способ обнаружения подводного источника широкополосного шума: № 2019121077: заявл. 03.07.2019; опубл. 28.02.2020 / Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук. 16 с.: ил.
10. 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. С. 37–44.
11. Патент 2784699 Российская Федерация, МПК G01S 3/80 (2006.01). Устройство обнаружения подводного источника широкополосного шума: № 2022108027: заявл. 28.03.2022; опубл. 29.11.2022 / Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В.; заявитель и патентообладатель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук. 14 с.: ил.

12. Патент 2664971 Российская Федерация, МПК В63G 8/00(2006.01). Автономный необитаемый аппарат для измерения дифференциальных характеристик векторного звукового поля: № 2017119843: заявл. 07.06.2017: опубл. 24.08.2018 / Матвиенко Ю.В., Костенко В.В., Гой В.А., Хворостов Ю.А.; заявитель и патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Фонд перспективных исследований. 14 с.: ил.

13. Хворостов Ю.А., Матвиенко Ю.В. Характеристики собственного шумоизлучения малогабаритного АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 58–63.

14. Патент 2421372 Российская Федерация, МПК В63G 8/00(2006.01). Способ обеспечения управляемости подводным аппаратом: № 2007141792/11: заявл. 14.11.2007: опубл. 20.06.2011 / Комаров В.С., Комаров П.В.; заявитель и патентообладатель Комаров Валерий Сергеевич, Комаров Платон Валерьевич. 9 с.: ил.

15. Гой В.А., Костенко В.В. Малогабаритная система регулирования плавучести. // Материалы 6-й науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, 2015. С. 113–117. ISBN 978-5-8044-1363-2.

16. Гой В.А., Костенко В.В. Регулирование плавучести и дифферента автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. 2016. №1 (21). С. 4–14.

17. Medvedev A.V., Kostenko V.V., Tolstonogov A.Y. Depth control methods of variable buoyancy AUV // IEEE Underwater Technology. (UT). Busan, 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/UT.2017.7890333.

18. Костенко В.В., Толстоногов А.Ю. Управление глубиной погружения необитаемого подводного аппарата, оснащенного системой регулирования плавучести // Подводные исследования и робототехника. 2019. №1 (27). С.4–11.

19. Дзюба В.П. Скалярно-векторные методы теоретической акустики. Владивосток: Дальнаука, 2006. 195 с. ISBN 5-8044-0559-5.

20. Гордиенко В.А. и др. Векторно-фазовые методы и создание перспективных акустических систем нового поколения // Вестн. Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2014. № 2. С. 3–21.

21. Щуров В.А. Движение акустической энергии в океане. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2019. 204 с. ISBN 978-5-6043211-5-7.

22. Казначеев И. В., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником // Акуст. журн. 2018. Т. 64, № 1. С. 33–45.

Об авторах

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева 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

ORCID: 0000-0002-4486-3719

КОСТЕНКО Владимир Владимирович, к.т.н., заведующий лабораторией исполнительных устройств и систем телеуправления, ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева ДВО РАН

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

Научные интересы: Подводная робототехника, системы управления движением, движительно-рулевые комплексы, динамические модели, буксируемые системы

Тел.: +7 (984) 145-43-85

E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3821-3787

ПЕРЕСЕЛКОВ Сергей Алексеевич, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой Математической физики и информационных технологий, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»

Адрес: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1

Научные интересы: прямые и обратные задачи, распространение и рассеяние звука, гидроакустические волноводы, интерференция звуковых волн, акустическая голография

E-mail: pereselkov@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-4083-8046

ХВОРОСТОВ Юрий Анатольевич, ведущий конструктор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева 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

ORCID: 0000-0002-4805-3051

Для цитирования:

Матвиенко Ю.В., Костенко В.В., Переселков С.А., Хворостов Ю.А. ГИБРИДНЫЙ АНПА КОНТРОЛЯ ШУМОВОЙ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ // Подводные исследования и робототехника. 2023. № 2 (44). С. 20–32. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_02. EDN: KSDAPD.

HYBRID AUV FOR UNDERWATER NOISE CONTROL

Yu.V. Matvienko, V.V. Kostenko, S.A. Pereselkov, Yu.A. Khvorostov

The article substantiates the appearance of an autonomous uninhabited underwater vehicle carrying a vector-scalar sound receiver on board. The device is equipped with buoyancy and moment of stability control systems that provide a change in its function. The proposed configuration, along with the usual function of an autonomous underwater vehicle, makes it possible to implement underwater glider modes for entering a remote area of underwater patrolling. At the same time, it is possible to implement a low-noise receiving hydroacoustic station with a controlled mode of movement in the water column and a radio beacon mode with navigation and communication tools. The prospects for the use of such a hybrid underwater vehicles are determined by the possibility of solving assignment problems on board in real time. Algorithms for detection and direction finding of a source of broadband noise by a data processing system as part of the vehicle are proposed.

Keywords: hybrid autonomous underwater vehicle, underwater glider, passive underwater environment monitoring system, vector-scalar sound receiver, detection of an underwater broadband noise source.

Reference

1. Glukhov Yu.A., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V., Molokov Yu.G., Nikiforov V.V., Rylov N.I. The use of the Skat submersible to automate hydrochemical studies of Lake Baikal - In Sat. "Underwater vehicles with program control and their systems", Vladivostok: Publishing House of the Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR, 1977.
2. Underwater robotic systems: systems, technologies, applications / A.V. Inzartsev, L.V. Kiselev, V.V. Kostenko, Yu.V. Matvienko, A.M. Pavin, A.F. Shcherbatyuk; [res. ed. L.V. Kiselev]; FGBUN Institute of Problems of Marine Technologies, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences. Vladivostok, 2018. 368 p. ISBN 978-5-7311-0486-79.
3. Inzartsev A.V., Boreiko A.A., Borovik A.I., Vaulin Yu.V., Kamorny A.V., Lvov O.Yu., Matvienko Yu.V., Sidorenko A.V., Sporyshev M.S., Shcherbatyuk A.F. Experience in using MT-2010 type AUV for environmental research in the Golden Horn Bay. *Ecological Systems and Instruments*, 2018, No. 12, pp. 38-45. ISSN: 2072-9952. DOI: 10.25791/esip.12.2018.306.
4. Lippsett L., Spills G.O. Gliders tracked potential for oil to reach the east coast. *OCEANUS Magazine*. 2011. T. 48. C. 3.
5. Maevsky A. M., Zanin V. Yu., Tursenev S. A. Group application of underwater gliders in the problem of monitoring underwater potentially dangerous objects on the example of oil spill response. *Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2021. No. 2, pp. 25-35.
6. Zakharov K.L. Frequency-Angle Characteristics of a Hydroacoustic Signal Using the Vector-Phase Method. Electronic scientific publication "Sustainable innovative development: design and management", www.rypravlenie.ru/wp-content/uploads/2014/10/07-Zakharov.pdf, volume 10. No. 3 (24), 2014, art. 7.
7. Matvienko Yu.V., Khvorostov Yu.A., Kamorny A.V., Glushchenko M.Yu., Kuzkin V.M., Pereselkov S.A. Experimental studies of the system for detecting low-noise underwater targets in shallow water areas. *Underwater research and robotics*. 2022. No. 3. pp. 4-14.
8. Matvienko Yu.V., Khvorostov Yu.A., Kamorny A.V. Method for detecting an underwater source of broadband noise. RF Patent No. 2699923; Bull. No. 26 dated 09/11/2019.
9. Matvienko Yu.V., Khvorostov Yu.A., Kamorny A.V. Method for detecting an underwater source of broadband noise. RF Patent No. 2715431; Bull. No. 4 dated 02/28/2020.
10. Matvienko Yu. V., Kamorny A. V., Khvorostov Yu. A. On one approach to solving the problem of detecting an underwater source of noise signals. *Underwater research and robotics*. 2018. No. 2. pp. 37-44.
11. Matvienko Yu.V., Khvorostov Yu.A., Kamorny A.V. Device for detecting an underwater source of broadband noise. RF Patent No. 2784699; Bull. No. 34 dated 11/29/2022.
12. Matvienko Yu.V., Kostenko V.V., Goi V.A., Khvorostov Yu.A. Autonomous uninhabited apparatus for measuring the differential characteristics of the vector sound field. RF Patent No. 2664971, Bull. No. 24 dated 08/24/2018.
13. Khvorostov Yu.A., Matvienko Yu.V. Characteristics of self-radiation of a small-sized AUV. *Underwater research and robotics*. 2019. No. 4. pp. 58-63.
14. Komarov V.S., Komarov P.V. A method for ensuring controllability of an underwater vehicle. Patent of the Russian Federation No. 2421372, Bull. No. 17 dated 06/20/2011.
15. Goy V.A., Kostenko V.V. Regulation of buoyancy and trim of an autonomous underwater robot. *Underwater research and robotics*. 2016. No. 1. pp. 4-14.
16. Goy V.A., Kostenko V.V. Regulation of buoyancy and trim of an autonomous underwater robot. *Underwater research and robotics*. 2016. No. 1. pp. 4-14.
17. A. V. Medvedev, V. V. Kostenko and A. Y. Tolstonogov, "Depth control methods of variable buoyancy AUV," *2017 IEEE Underwater Technology (UT)*, Busan, 2017, pp. 1-5. (doi: 10.1109/UT.2017.7890333).

18. Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu. Controlling the diving depth of an uninhabited underwater vehicle equipped with a buoyancy control system. *Underwater research and robotics*. 2019. No. 1. pp.4–11.

19. Dziuba V.P. *Scalar-vector methods of theoretical acoustics*. Vladivostok: Dalnauka, 2006. 195 p. ISBN 5-8044-0559-5.

20. Gordienko V.A. et al. Vector-phase methods and the creation of promising acoustic systems of a new generation. *Bulletin of the Moscow University. Series 3. Physics. Astronomy*. 2014. No. 2. pp. 3-21.

21. Shchurov V.A. Movement of acoustic energy in the ocean. *Vladivostok: POI FEB RAN*, 2019. 204 p. ISBN 978-5-6043211-5-7.

22. Kaznacheev I.V., Kuznetsov G.N., Kuzkin V.M., Pereselkov S.A. Interferometric method for detecting a moving sound source by a vector-scalar receiver. *Acoustic journal*. 2018. Vol. 64. No. 1. pp. 33-45.



Recommended citation:

Matvienko Yu.V., Kostenko V.V., Pereselkov S.A., Khvorostov Yu.A. HYBRID AUV FOR UNDERWATER NOISE CONTROL. *Underwater investigations and robotics*. 2023. No. 2 (44). P. 20–32. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_02. EDN: KSDAPD.

About the authors

MATVIENKO Yurii Viktorovich, Dr. Sci., chief researcher
Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of
the Russian Academy of Sciences

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

KOSTENKO Vladimir Vladimirovich

Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of
the Russian Academy of Sciences

Address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5a

Scientific interests: Underwater robotics, motion control systems, propulsion and steering systems, dynamic models, towed systems

Phone: +7 (984) 145-43-85

E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3821-3787

PERESELKOV Sergey Alekseevich, Dr.Sci., head of the
department of Mathematical physics and information
technologies, professor

Voronezh State University

Address: 394018, Russia, Voronezh, University Square, 1

Scientific interests: direct and inverse problems, sound propagation and scattering, hydroacoustic waveguides, sound wave interference, acoustic holography

E-mail: pereselkov@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-4083-8046

KHVOROSTOV Yurii Anatolyevich, lead designer

Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of
the Russian Academy of Sciences

Address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5a

Research 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

