

ТЕХНОЛОГИИ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ПРОТИВОМИННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Д.В. Войтов

Морские мины – очень эффективное и недорогое оружие. Ведущие морские державы развивают противоминные силы в рамках программ модернизации гидроакустического и навигационного оборудования и создания комплексов надводных и подводных беспилотных систем, позволяющих в отличие от техники траления обезвреживать минные заграждения с безопасного расстояния. В статье рассматривается один из вариантов корабельного противоминного комплекса с определенным набором технических средств, позволяющих эффективно и безопасно провести поиск, идентификацию и уничтожение мин.

Ключевые слова: необитаемый подводный аппарат, гидролокатор бокового обзора, гидроакустическая навигационная система, корабельный противоминный комплекс

Введение

Минная война – апробированная во многих конфликтах, начиная с девятнадцатого века, военная технология. В июне 1855 года во время Крымской войны англо-французский флот, появившийся в Финском заливе, осуществил попытку атаки Кронштадта, но после подрыва на русских якорных минах английского парохода «Файрфлай» и парохода-фрегата «Мерлин» (рис. 1, а), спешно отошел в Балтийское море. Несмотря на низкую надежность мин, учитывая их огромное количество (более 1800 шт.), минное заграждение свою задачу выполнило. 20 июня считается днем первого успешного применения минного оружия русским флотом. Во время Второй мировой войны в акваториях было установлено более 550000 морских мин, часть из них была уничтожена, часть осталась и до сих пор представляет смертельную опасность для судов (90% торговых грузов и половина всего объема нефти транспортируются морскими путями). Мины не сложны в изготовлении, дороги и могут устанавливаться с любой платформы: морской или воздушной. При этом экономическая эффективность мин делает их привле-

кательными для более слабой воюющей стороны в асимметричной войне на море.

Угрозы, связанные с минной опасностью, растут с развитием технологий, таких как беспилотные аппараты и компьютерные системы с возможностями искусственного интеллекта. Еще в далеком 1898 г. в небольшом бассейне Мэдисон–Сквер–Гардена Никола Тесла управлял своим первым морским беспилотным аппаратом (рис. 1, б). Металлическая лодка длиной 1,2 метра с тремя антеннами, аккумулятором, электромоторами и радиоприемником по радиокоманде с пульта управления осуществляла движение, останавливалась, по команде на стойках могли зажигаться лампочки. Патент «Описание метода и аппарата по управлению механизма движущихся судов или транспортных средств» на это изобретение был выдан 8 ноября 1898. Никола Тесла предполагал установить на лодку заряд взрывчатого вещества. В Германии в 1915 году во время Первой мировой войны фирма Siemens-Schuckert получила заказ на управляемые по радио и проводам катера-уничтожители Fernlenkboot (рис. 1, в). Катера имели скорость до 30 узлов и несли 230 кг взрывчатки. 1 марта 1917 года катер FL-7 врезался в мол на бельгийском побережье и уничтожил передовой пункт базирования британского флота.



Рис. 1. Подрыв на минах английских кораблей «Файрфлай» и «Мерлин» (а); модель беспилотного аппарата Николы Тесла (б); германский катер FL (в)

■ Мины и средства борьбы с ними, беспилотные комплексы

Морские мины содержат от 50 кг до более чем 1000 кг бризантных взрывчатых веществ, их размер составляет от 0,5 м до 3 м. Классифицируются мины по способу приведения в действие, постановке и положению в толще воды. Постановка мин осуществляется с кораблей и судов, подводных лодок и летательных аппаратов. Свободноплавающие – дрейфующие мины запрещены международным правом. Дрейфующие мины активируются дистанционно или во время контакта. Таким же образом активируются донные мины, имеющие отрицательную плавучесть. Пришвартованные морские мины сохраняют плавучесть, для того чтобы всплывать на определенных глубинах. Другие типы мин содержат различные датчики: магнитные, акустические и электрические. Из-за малозаметной формы мин и материалов корпуса, которые лучше сочетаются с характеристиками морского дна, мины стало сложнее обнаруживать. Их смертоносность повышается благодаря чувствительным взрывателям, которые срабатывают, когда объект находится рядом. Растет угроза применения подводных самодельных взрывных устройств, размеры и формы которых отличаются от обычных мин. Нельзя забывать, что современные мины могут срабатывать от физических полей подводных аппаратов. В табл. 1 перечислены некоторые из мин с указанием их характеристик и размеров.

Таблица 1

Некоторые донные мины и их характеристики

Наименование мины	Форма	Масса в воздухе, кг	Размеры, мм
Murena	цилиндр	780	LxD: 2096×553
Manta	усеченный конус	220	HxD: 440×980
Rockan	клин	190	L×H×W: 1020×385×80

Большинство ВМС имеют хорошо развитые технологии и возможности для поиска мин и их обезвреживания. Силы противоминной борьбы используют пассивную и активную тактику. К пассивной тактике относятся локализация минной угрозы, изменение конкретных характеристик судна (применение стекловолокна), размагничивание металлических корпусов судов. К активной тактике относятся поиск и обнаружение мин и последующее их уничтожение. Военно-морская доктрина предусматривает использование специальных кораблей для поиска мин в зоне минной опасности. Обезвреживание мин осуществляется контактными и неконтактными тралями-имитаторами физических полей корабля. Наряду с тралями эффективным средством противоминной борьбы стали комплексы, состоящие из гидролокаторов и автономных необитаемых аппаратов (АНПА), способных обнаруживать мины и из телеуправляемых подводных аппаратов (ТНПА), осуществлять выход к минам и их уничтожать, в то время как корабль-носитель с персоналом находится на безопасном расстоянии или за пределами минного поля. В случае контактного уничтожения мин предусматривается доставка с помощью ТНПА и размещение специального заряда взрывчатого вещества для дальнейшего подрыва мины. При необходимости ТНПА может отбуксировать мину на мелководье и там ее уничтожить. Также для непосредственного уничтожения мин могут применяться одноразовые самоходные НПА, представляющими собой миниторпеды. Беспилотники оснащаются датчиками высокого разрешения (гидролокаторами, видеокамерами и магнитометрами), при этом используются алгоритмы компьютерного обнаружения и классификации, а также автоматизированные процессы распознавания целей (ATR), позволяющие обнаруживать, классифицировать и локализовать мины на изображении, полученном с помощью гидролокатора. ATR использует быстрые методы машинного обучения и глубокого обучения нейронных сетей для обнаружения и классификации объектов, похожих на мины, по данным

гидролокаторов и видеосистем с целью дальнейшего автоматического распознавания изображений. Методы позволяют оценить, насколько каждая из целей похожа на мину. Подтверждение результатов классификации – идентификация – проводится с помощью видеокамер ТНПА и АНПА. Таким образом, в отличие от зачистки тральщиками, процесс поиска мин требует последовательного выявления всех мин в данном районе и последующего их уничтожения. Необходимость применения необитаемых подводных аппаратов и беспилотных катеров в противоминных операциях не вызывает сомнений.

■ Примеры необитаемых подводных аппаратов

Первый действующий АНПА – «Подводный исследовательский аппарат специального назначения» (SPURV) был разработан в Лаборатории прикладной физики Вашингтонского университета в 1957 году. В том же году ВМС США приобрели первый ТНПА – «Подводный спасательный аппарат с кабельным управлением» (CURV), который помог достать с глубины термоядерную бомбу, потерянную американцами в Средиземном море после катастрофы бомбардировщика В-52G в 1966 году, с его помощью обнаружили около 600 торпед и мин. Среди первых необитаемых аппаратов них были СТПА Луч-3, спроектированный в ЦНИИ-45 в 1963 г., ВМУ, Краб-3000, Манта-0,2, Манта-1,5 и Манта-6, разработанные в Институте океанологии АН СССР. На рубеже 60–70-х годов был разработан французский противоминный СТПА PAP-104. Он предназначался для вооружения тральщиков. При обнаружении донных и якорных мин гидроакустической станцией тральщика PAP-104 дообследовал и идентифицировал мину, оставляя заряд, который подрывали по гидроакустическому каналу. PAP-104 мог перерезать минрепы якорных мин своим резаком. В 1991–1992 годах во время операции «Свобода Ирака» в Персидском за-

ливе с помощью аппаратов PAP-104 (рис. 2, а) было уничтожено более 1000 мин, включая мины Manta, из 2000 установленных иракскими военными мин. Время уничтожение одной мины не превышало получаса. Построено более 100 ЕСА PAP Mk1 и более 100 ЕСА PAP Mk2. ВМС США успешно использовали и автономные аппараты – REMUS 100 компании Hydroid (приобретена Kongsberg). АНПА REMUS активно применялись в ходе разминирования в 2003 году. Часть аппаратов были переданы Великобританией Украине в 2022 году. Развитием аппаратов REMUS 100 (рис. 2, б) стали более мощные и глубоководные: REMUS 300 и REMUS 600 (рис. 2, в). Также применялись АНПА Bluefin Robotics, ЕСА, Hafmynd Ltd и Kongsberg Maritime. АНПА обеспечивали выполнение работ на начальном этапе, включающем поиск объектов, их классификацию, нанесение на карту. На втором этапе, включающем идентификацию и нейтрализацию, помимо PAP-104 США использовали систему ТНПА AN/SLQ-48 с фугасной бомбой. Также могли применяться одноразовые «камикадзе» Archerfish, K-Ster, Minesniper, Seafox. Все эти аппараты имеют мощные движители и развивают скорость под водой до 7 узлов.

Одной из лучших на мировом рынке противоминных систем является комплекс на базе гибрида ТНПА и АНПА DoubleEagleMkII/III/Sabertooth (SAABSeaeye) (рис. 3). В отличие от традиционных методов минного поиска, когда судно буксирует гидролокатор бокового обзора, данная система объединяет мощный поисковый гидролокатор и НПА. Действуя впереди по курсу корабля, оснащенный многолучевым гидролокатором, гидролокатором бокового обзора, параметрическим профилографом, НПА обеспечивает раннее обнаружение морских мин и в случае необходимости уничтожение на безопасном расстоянии от корабля-носителя и находящегося на нем экипажа (рис. 4). Для увеличения зоны поиска мин, работы в сложных прибрежных условиях, в портах и на мелководье НПА конфигурирует-



Рис. 2. Противоминный СТПА PAP-104 (а); АНПА REMUS 100 (вес – 49 кг, скорость до 5 узлов, время работы до 8 часов при 5 узлах) (б); АНПА REMUS 600 (вес – 240 кг, скорость до 4 узлов, время работы до 24 часов) (в)



Рис. 3. Гибриды Double Eagle MkII/Sabertooth/Double Eagle MkIII

ся как АНПА с аккумуляторным навигационным и связным блоками.

Основные модули, входящие в состав НПА: движительный, энергетический, управления и связи. Движительный модуль формирует управляющие силы по осям x (движение вперед), z (движение вверх) и моменты вокруг осей y (управление по углу дифферента) и z (управление по углу курса). Энергетический модуль содержит преобразователи питания (или аккумуляторную батарею), обеспечивающие питание движителей и других потребителей. Модуль управления (НПА третьего поколения) содержит основной процессор аппарата, твердотельный диск, управляющую электронику, программное обеспечение управления аппаратом. Пилот на основе анализа подводной обстановки принимает решения, которые реализуются в виде типовых команд. Бортовой процессор принимает команды и производит выбор способа реализации движения подводного аппарата, формируя задающие воздействия, поступающие

по каналу телеметрии на исполнительный уровень системы движения аппарата. Состав алгоритмов выполнения типовых команд: выход в заданную точку, динамическое позиционирование, автоматическое наведение аппарата на цель, автоматическое отслеживание рельефа дна, обход препятствий, стыковка аппарата (с УГП или донной станцией).

В начале 70-х годов в СССР был создан противоминный комплекс КИУ-1, состоящий из гидроакустической станции МГ-79 и самоходного телеуправляемого искателя-уничтожителя мин СТИУМ-1. В начале 90-х был разработан КИУ-2 с уничтожителем «Кетмень». В конце 90-х годов ГНПП «Регион» получил заказ на создание противоминного комплекса, включающего СТИУМ «Маёвка». Базовые тралы-искатели мин проекта 12700 ЦМБК «Алмаз» (проект возобновлен с 2002 г.) помимо тралов должны были оснащаться противоминным комплексом «Александрит-ИСПУМ» ГНПП «Регион». Но еще до завершения работ было принято решение о закупках

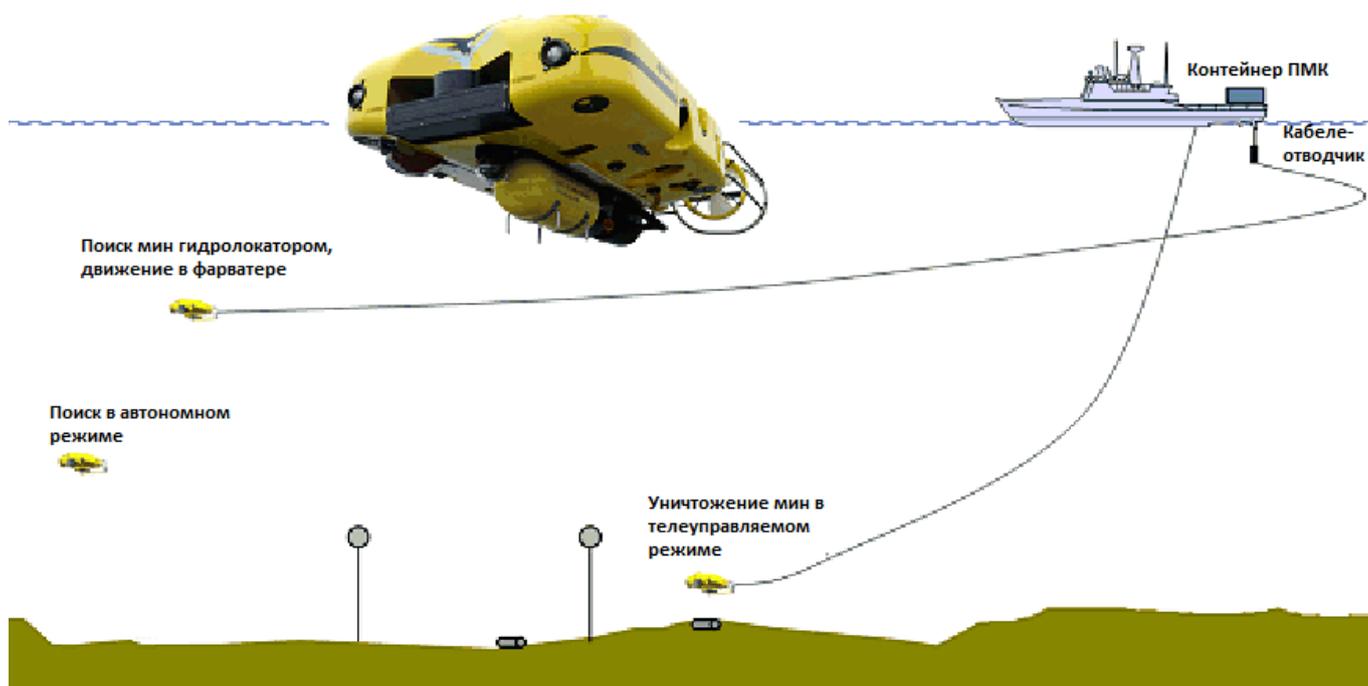


Рис. 4. Конфигурация ПА DoubleEagleMkII – SAROV, схема работы гибрида

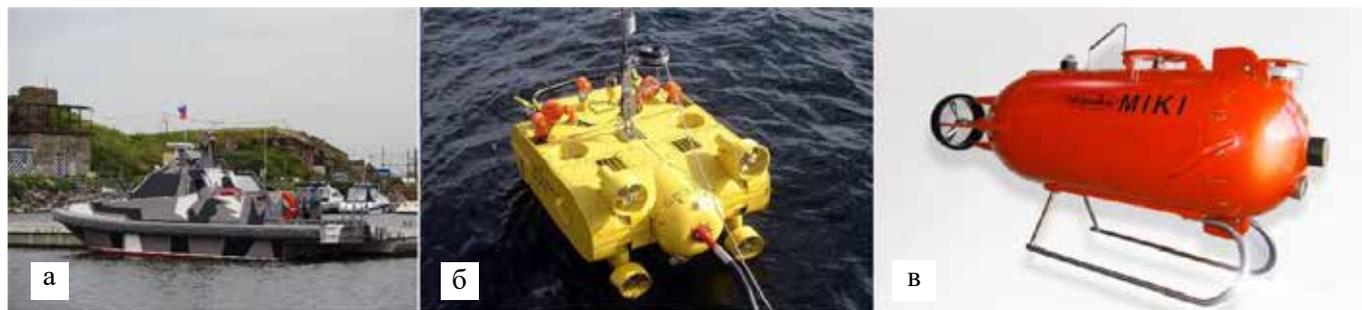


Рис. 5. БЭК НПП АМЭ (а); самоходный аппарат разработки ГНПП «Регион» (300 м) (б); ТНПА PLUTINO (в)

французских противоминных комплексов, включающих: АНПА Alister 9, ТНПА K-Ster, уничтожители «камикадзе» K-Ster, БЭК Inspector Mk.2 с ГБО и ТНПА Seascan Mk.2 с HD камерой, вперёдсмотрящим гидролокатором и аккумуляторной батареей на борту. Из-за санкций из всего вышеперечисленного в России было получено только три комплекса Inspector Mk.2 с Seascan Mk.2. Альтернативой Inspector Mk.2, имевшему слишком большие габариты, стала полужесткая лодка БЛ-680, по своим характеристикам являющаяся не очень подходящим носителем ГАС и НПА. Беспилотный катер НПП АМЭ представлен на рис. 5, а. ГНПП «Регион» с 2020 г. начал поставлять подводные аппараты (СПА) с установленным на них гидролокатором, входящие в комплекс «Александрит-ИСПУМ». Отличие от «Маевки» – переход с гидравлических двигателей на электрические. В комплекс входят: полезная нагрузка (ПН) и буй-обозначитель (БО) для СПА, антенный модуль на подъемно-опускном устройстве и буксируемое тело (БТ). Телеуправляемый подводный аппарат (рис. 5, б) способен выявлять мины в радиусе 500 м и на глубине до 300 м. Его скорость составляет 3–6 м/с. Концепция СПА заимствована у SAAB, за исключением режима АНПА.

На МВМС-2019 был представлен робототехнический комплекс «Янтарь», ООО НКППП «Идробалтика», в состав которого входят: телеуправляемые необитаемые подводные аппараты PLUTO (Gaymarine Electronic Products/Idrobotica), оснащенные гидроакустическими станциями ближнего и дальнего радиуса действия и телекамерами. В линейку ТНПА PLUTO входят: PLUTO, PLUTOPLUS с увеличенной полезной нагрузкой и PLUTOGIGAS. Для подрыва мин предназначен «камикадзе» PLUTINO (рис. 5, в).

■ Гидролокаторы с синтезированной апертурой

Как уже указывалось выше, на первом этапе противоминной борьбы используются гидроакустиче-

ские системы, установленные на носителе, беспилотном катере, АНПА, или работающие в режиме буксировки. Основным принципом работы гидролокатора является определение местоположения объектов с помощью звуковых акустических волн. Для звуковых волн характерны явления отражения, дифракции и интерференции. Скорость распространения акустической волны в морской воде изменяется от 1450 до 1500 м/с, в зависимости от солености, температуры, давления и рН. Подводный гидролокатор состоит из гидрофонов, которые могут передавать и принимать акустические волны. Частота, используемая для конкретного применения подводного гидролокатора, ограничена ослаблением звуковой волны, которое очень быстро увеличивается с увеличением частоты и ограничивает дальность действия. При поиске мин частоты подводных гидролокаторов варьируются от 0,1 до 1 МГц и их дальность действия от 1 до 0,1 км соответственно. Цель акустической визуализации – построить изображение, представляющее расположение отдельных целей. Гидролокатор имеет горизонтальную решетку приемных гидрофонов. Разрешение по азимуту определяется длиной матрицы, измеряемой в длинах волн. Разрешение по дальности определяется полосой пропускания системы. Разрешение вдоль трассы может быть увеличено либо за счет увеличения длины массива, либо за счет увеличения частоты. Но высокочастотные сигналы подвержены ослаблению и применимы на коротких диапазонах, что делает гидролокатор неподходящим для съемки больших площадей. Решение заключается в использовании обработки с синтезированной апертурой, где последовательные пинги (звуковые импульсы) когерентно объединяются для синтеза более длинной матрицы [10]. Схемы алгоритмов компьютерного обнаружения и классификации, а также автоматизированных процессов распознавания целей (ATR) основаны на вычислении и извлечении различных типов характеристик изображения, которые могут распределяться по текстуре, спектральным ха-

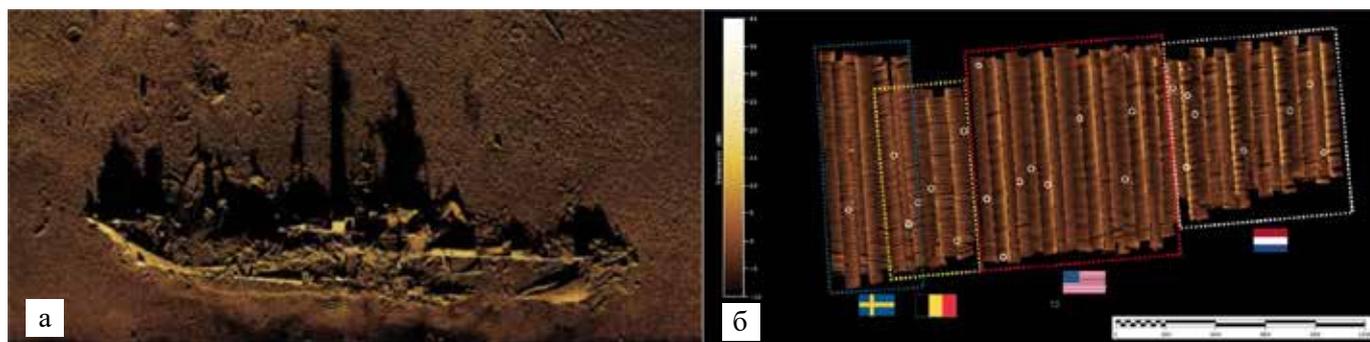


Рис. 6. Изображение обломков Kraken MINSAS (а), результат совместной работы нескольких АНПА с SAS (б)

рактикам и геометрии форм. В гидролокаторах с синтезированной апертурой (SAS), по сравнению с ГБО, доступна более полная геометрическая информация по тени объекта и по эхо-сигналу, которая может быть использована для улучшения классификации. Перед извлечением геометрических элементов применяются два этапа предварительной обработки: фильтр уменьшения спеклов для улучшения качества изображения и алгоритм сегментации для обнаружения пикселей эха и тени от цели. Мультипликативный спекл-шум всегда присутствует в изображениях SAS, что связано с когерентным характером рассеяния явлений на неровных поверхностях раздела.

Примером настраиваемого интерферометрического гидролокатора с синтезированной апертурой может служить MINSAS, Kraken, обеспечивающий разрешение Ultra HD $1,9 \times 2,1$ см по всей полосе обзора на расстоянии до 200 метров в обе стороны, а также одновременную батиметрию 6×6 см. В основе MINSAS лежит модульная система массивов, которая позволяет использовать массивы длиной 60, 120 и 180 см в зависимости от размера платформы и тре-

бований. Такая модульность в сочетании с самым маленьким в отрасли модулем обработки SAS позволяет интегрировать MINSAS в НПА. В рамках ежегодных учений ВМС Португалии в Сесимбре пять модулей Kraken MINSAS были интегрированы в АНПА пяти стран НАТО (REMUS 100 и Gavia). АНПА в режиме совместной работы обнаружили 50 миноподобных целей (рис. 6). Для совместной автономной работы АНПА использовалось программное обеспечение SeeTrack и Neptune от SeeByte в сочетании с C2.

■ Пример беспилотного корабельного противоминного комплекса

Технологии беспилотных подводных и надводных аппаратов и гидролокаторов активно применяются во всех структурах Минобороны, МЧС, МВД и других ведомствах. Задел в виде достижений и технических решений в перечисленных областях может быть использован для дооснащения корабельных противоминных комплексов (КПК) кораблей проекта 12700, 21980 с целью выполнения основных задач:

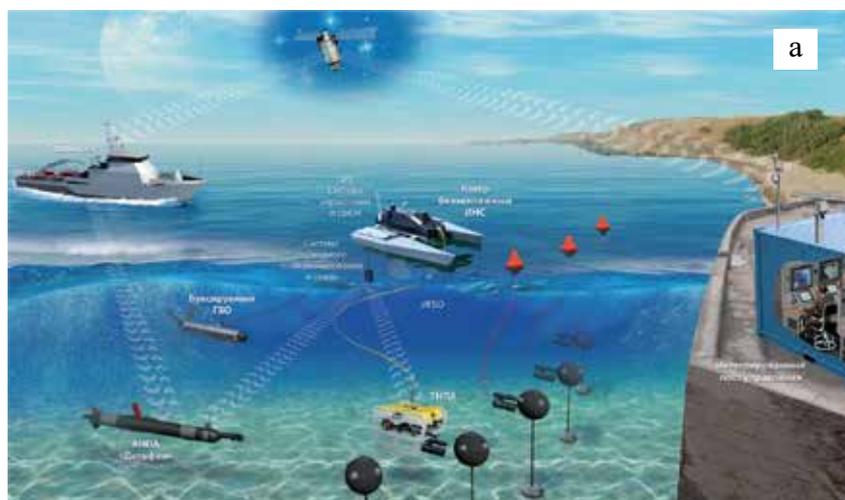


Рис. 7. Состав КПК (а); вариант ТНПА с системой установки заряда (б)



Рис. 8. БЭК с ГБО и ТНПА

поиск мин, уточнение их координат, формирование баз акустических и оптических данных и электронных карт акваторий, уничтожение мин. В состав КПК (рис. 7) должны входить: палубное спуско-подъемное устройство, многолучевой гидролокатор, буксируемый ГБО с синтезированной апертурой, общая система подводного акустического позиционирования с GPS/ГЛОНАСС, безэкипажный катер (или 2 шт.) с системой дистанционного и автоматического управления и передачи цифрового видео и данных по радиоканалу. БЭК (рис. 8) оборудован собственным спуско-подъемным устройством и является носителем: буксируемого ГБО с синтезированной апертурой,

ТНПА с видеосистемой, звуковизором, ГКО, манипулятором, тросорезом, системой установки заряда/обезвреживания мин и АНПА с ГБО с синтезированной апертурой, звуковизором, видеокамерой.

Схема работы КПК выглядит следующим образом. С носителя в определенной точке опускается БЭК, способный работать в 10-мильной зоне от носителя. На первом этапе с борта БЭК в воду опускается ГБО, на определенном участке происходит поиск объектов с передачей гидроакустической информации на носитель. В случае неявного распознавания миноподобных объектов АНПА на небольшой высоте проходит над ними, дополняя



Рис. 9. BALLISTA 400 на Seabotix vLBV, SeaFox, Falcon, PAP 105



Рис. 10. Система обезвреживания мин гарпунного типа на ТНПА «Panther Plus», обезвреженные мины с участка «Северного потока»

и корректируя изображение. Следующий этап – спуск с БЭК телеуправляемого аппарата, который по гидроакустике и видеоизображению выходит к объектам и в случае окончательной идентификации оставляет заряд у мины. На мелкой воде ТНПА может перерезать минреп и отбуксировать мину к берегу. В качестве АНПА и ТНПА могут использоваться проверенные в подводных работах и в экспедициях ММТ-3000 и Марлин-350 с удлиненным до 600 метров кабелем.

Альтернативу использованию стандартного заряда для обезвреживания мин на глубине до 300 м представляет система обезвреживания мин типа BALLISTA 400, представляющая собой немагнитный снаряд с кумулятивным зарядом, имеющий нейтральную плавучесть. Безопасная при применении BALLISTA 400 (рис. 9) может устанавливаться на любой ТНПА (SeaFoxI, PAP 104 или 105, Seabotix LVV, Falcon, Марлин-350 и др.). Она особенно эффективна при утилизации исторических боеприпасов, что в некоторых случаях, учитывая их состояние, может быть непростой задачей.

Систему можно установить и снять за 3 минуты, в ней нет расходных деталей, все они немагнитные и пригодны для повторного использования. BALLISTA 400 также может применяться для борьбы с плава-

ющими/дрейфующими минами с использованием ТНПА. Испытание системы проводилось в Балтийском море во время строительства «Северного потока» в 2009–2010 гг. Зона прокладки газопровода была очищена от 275 мин, включая: якорные мины, затопленные на дне EMC, EMC II, M-08, M-12, M-16, M-26, наземные мины LMB / TMB, AMD 500, AMD 1000, глубинные бомбы, торпеды, морские снаряды, авиабомбы и т.п. (рис. 10).

Система обезвреживания мин BALLISTA 400 физически крепится к мине с помощью 3 различных приспособлений, а именно: пороховой гарпун ударного действия (гвоздемет) (рис. 11, б), ударный гарпун («копье» с зубринами) и магнитный захват (рис. 11, а). После обнаружения мин и миноподобных объектов гидролокаторами в воду погружается ТНПА с установленной системой обезвреживания. Выход на объект оператор осуществляет по гидролокатору кругового обзора и затем по видеокамере. Когда оператор подошел к мине на малое расстояние и прицелился, кнопкой запуска он приводит в действие пистолет типа Hilti Black, использующий патроны HILTI Nail Gun (1.4B). Гарпун с пороховым приводом вводит немагнитный гвоздь из нержавеющей стали 316 в корпус мины. Гвоздь выступает на 40 мм из конца гарпуна с пороховым приводом (рис. 11, в)



Рис. 11. Магнитный захват (а); BALLISTA 400, прикрепленная к носовой части инертной мины (б); схема работы гвоздомета (в)



Рис. 12. Планшет гидролокатора. Закладка пластиковой взрывчатки. Система NONEL. Подрыв мины

Каждыйкумулятивный заряд содержит 1 кг пластичного взрывчатого вещества С1, С4, М-46, РЕ4, РЕ7 со скоростью детонации 8000 м/с. Кумулятивный заряд создает взрывную волну и концентрированную струю расплавленного металла, способную проникать сквозь сталь толщиной в несколько сантиметров, вызывая реакцию внутри взрывчатого вещества мины.

Неэлектрическая система NONEL (рис. 12) предназначена для инициирования заряда взрывчатого вещества (русский аналог – система СИНВ): трубка – волновод – полый многослойный пластиковый шнур диаметром 3 мм с нанесенным на внутреннюю поверхность порошком октогена и алюминия. Иницирование заряда осуществляется дистанционно. Основной заряд детонатора из гексогена запрессован в алюминиевую гильзу. Замедляющий элемент состоит из алюминиевой трубки, заполненной пиротехническим составом. За счет длины трубки замедляющего элемента осуществляется выбор нужного времени замедления. Для начала реакции в трубке NONEL

необходима детонация, ее осуществляет пускатель с детонатором, находящийся в поплавке системы Mini-DRFD, всплывающем на поверхность после фиксации гарпуна на мине (рис. 13). Mini-DRFD представляет собой цифровую радиоуправляемую систему инициирования УВЧ-диапазона для дистанционного инициирования взрывчатого вещества.

Еще один пример противоминной системы – гидроакустическая система поиска мин AN/AQS-20C. Система прошла испытания на реальных подводных целях и поступила на вооружение ВМС США. AN/AQS-20C состоит из двух ГБО с синтезированной апертурой, широкополосного гидролокатора переднего обзора, внизсмотрящего звукового гидролокатора и электронно-оптического лазерного устройства визуализации. Автоматическое распознавание и классификацию целей в режиме реального времени по всему спектру мин в глубоких и мелководных водах обеспечивают алгоритмы обработки акустических сигналов. AN/AQS-20C работает с борта беспилотных надводных носителей, в комплек-



Рис. 13. Система инициирования УВЧ-диапазона с всплывающей частью, передатчиком и приемниками

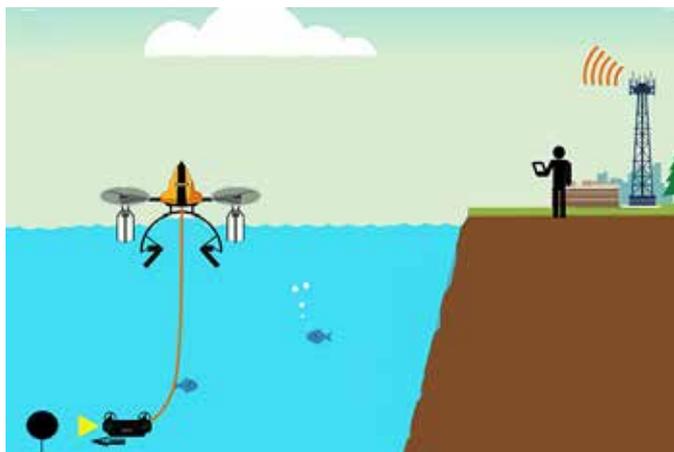


Рис. 14. Двухсредный комплекс, состоящий из БПЛА и ТНПА от QYSEA и KDDI

се с полуавтономным подводным беспилотником Barracuda, Raytheon, оснащенный гидролокатором, видеосистемой, системой связи и пусковой установкой со специальными патронами, который обнаруживает и уничтожает мины.

В качестве альтернативы БЭК можно предложить роботизированный двухсредный комплекс, состоящий из БПЛА с ТНПА, управляемых дистанционно (рис. 14). Данная двухсредная система может быть применена не только для оперативного обследования подводных объектов, но и для доставки взрывчатых веществ (весом до 5–10 кг) под воду. Оператор дистанционно управляет ТНПА через БПЛА, находящийся в надводном положении на поплавках над точкой обследования или установки заряда. БПЛА оснащен гаражом с кабельной вьюшкой. Оптимально применять ТНПА с бортовым аккумулятором, управляемым по тонкой опто-волоконной линии. Ограничение работы такой системы по связи – волнение моря не более 1 балла.

Отдельной задачей противоминного комплекса является поиск заиленных мин. В этом случае применяются современные низкочастотные (от 4,5 до 12,5 кГц) гидролокационные системы (донные профилографы) с синтезированной апертурой, которые обеспечивают 3D-изображение морского дна в реальном времени. Комбинируя непрерывные полосы данных шириной 6 м, которые проникают на глубину до 5 м, профилограф выявляет погребённые под осадком объекты, аномалии, в т.ч. геологические с разрешением 10 см. (рис. 15).

■ Подводная навигация и связь необитаемых подводных аппаратов

Отсутствие глобальной навигационной информации и ограничения подводной связи – физические ограничения, создающие уникальные проблемы для работы беспилотников под водой. На поверхности воды ГНСС (глобальная навигационная спутниковая система: ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou, NavIC) определяет положение подводного аппарата с точностью до 1–2 метров. Когда аппарат погружается, его положение определяется бортовой системой навигации и гидроакустическими системами позиционирования (ГАНС) с длинной базой (LBL), с ультракороткой базой (USBL), реже – системой с короткой базой (SBL). Для работы ГАНС с длинной базой необходима предварительная установка группы маяков-ответчиков на дне. Кроме того, точность определения положения в системе с длинной базой может ухудшаться вследствие множественного отражения сигналов по причине изменяющегося профиля скорости звука в воде или на мелководье, а также по причине движения маяков-ответчиков относительно донного якоря.

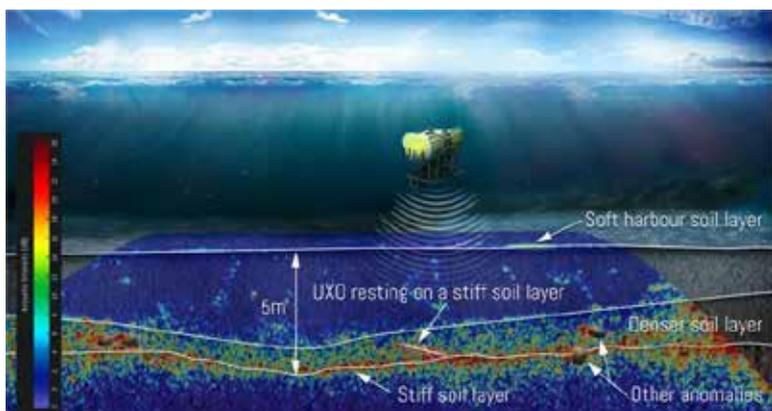


Рис. 15. Устройство формирования изображения под дном

Бортовая навигационная система НПА включает: инерциальную навигационную систему (ИНС), магнитный и гироскопический компасы, измерители относительной и абсолютной скорости – индукционный и доплеровский лаги (DVL), приемник GPS, датчик высоты, датчик глубины, датчики крена и дифферента (трехосевой акселерометр и гироскоп), датчики угловых скоростей, эхолокационную систему. Навигация по счислению пути (DR – Dead Reckoning) использует комбинацию данных от компаса, датчика глубины и датчика скорости. Несмотря на то что навигация по счислению пути подходит для большинства коротких миссий – особенно там, где абсолютное положение аппарата не является изначально необходимым, такой точности недостаточно. Инерциальная навигационная система (ИНС) используется для определения географических координат аппарата, его угловой ориентации, линейных и угловых скоростей. В состав ИНС входят акселерометры и, в качестве датчиков угловых скоростей, лазерные или оптоволоконные гироскопы. ИНС измеряет перемещения или ускорения НПА по трем осям. В ограниченном промежутке времени инерциальная навигационная система является довольно точной, но она накапливает ошибку с течением времени. Инерциальный датчик измеряет направление на ось вращения Земли, обеспечивая свободное от дрейфа направление на истинный север. В полярных широтах инициализация ИНС на ходу медленнее и менее точна, чем в более низких широтах, и совсем не работает на полюсах. Ошибка курса в 0,001 радиан вызовет отклонение от курса, составляющее 0,001 пройденного расстояния от последней известной позиции, или 0,1 %. Доплеровский измеритель скорости (DVL) использует четыре акустических луча для посылки звуковых импульсов в направлении поверхности дна и приема отраженного эхо-сигнала. Доплеровский лаг вычисляет высоту над поверхно-

стью дна, измеряя время между посылкой звукового импульса и моментом приема отраженного сигнала, вычисляет скорость движения, измеряя доплеровский сдвиг частоты звуковой волны принимаемого сигнала по отношению к излученному. Измерение глубин на маршруте НПА получается путем сложения отстояния от дна по доплеровскому лагу и глубины аппарата по датчику глубины. Работа лага может быть затруднена на сложном рельефе или в условиях сильных течений. Набор MEMS-инерциальных датчиков (IMU) используется для создания системы определения ориентации и курса (AHRS) или INS. В табл. 2 приведены некоторые серийно выпускаемые системы на базе MEMS.

Система гидроакустического позиционирования с ультракороткой базой обеспечивает определение местоположения подводных маяков-ответчиков. Приемопередающая антенна, представляющая гидроакустический модем, является комбинированным устройством, способным одновременно осуществлять гидроакустическую связь и определять местоположение маяка-ответчика. В головной части модема размещаются трансдьюсер и несколько гидрофонов, фиксирующих направление входящего сигнала, система анализирует время прихода сигнала от маяка и вычисляет его положение. Абсолютные координаты маяка-ответчика система рассчитывает с учетом данных ГНСС, AHRS (системы отслеживания положения и ориентации) и компаса. Борьба с гидроакустическими помехами в системе происходит за счет использования дискретных гидроакустических сигналов с большим расширением частотного спектра. УКБ системы имеют погрешность определения направления 0,1–1,0 град и дальность действия до 10 000 метров. Пример такой системы – навигация «Латена» с модемом СПиН-26Н-УКБ, модемами СПиН-26Н или СПиН-26Н-Мини в качестве маяка-ответчика и ПО LANAS (табл. 3).

Таблица 2

Технические характеристики MEMS-инерциальных датчиков

Производитель	Наименование	Точность курса/ разрешение	Точность крена и дифферента/разрешение	Скорость передачи данных, Гц	Глубина, м
Impact Subsea	ISM3D	±0.5°/0.1°	±0.07°/0.01°	250	1000–6000
Seascope Subsea	UW9XIMU	±0.5°/0.01°	±0.5°/0.01°	400	750
Inertial Labs	AHRS-10P	±0.6°/0.01°	±0.08°/0.01°	200	600
SBG Systems	Ellipse2-N	±1.0°/-	±0.1°/-	200	–
TMI-Orion	DSPRH	±0.5°/0.1°	±0.5°/0.1°	100	500–2000
VectorNav	VN-100	±2.0°/0.05°	±1.0°/0.05°	400	–
XSENS	MTi-600	±1.0°/-	±0.2°/-	400	–

Технические характеристики элементов системы УКБ

Наименование/ТХ	СПиН-26Н-УКБ	СПиН-26Н	СПиН-26Н-Мини
Частота, кГц	26	26	26
Скорость передачи данных, кбит/с	до 14	до 12	до 14
Рабочий диапазон, м	3000	3000	3000

Пример схемы информационных потоков комплексированной навигационной системы представлена на рис. 16.

Гидроакустическая система с ультракороткой базой может давать нестабильные данные, в этом случае интеграция ГАНС с бортовой навигационной системой позволяет осуществлять коррекцию координат путем совместной обработки данных обеих систем. При совместной обработке данных обеспечиваются компенсация и фильтрация накапливающихся и случайных ошибок отдельных систем и устройств, в результате повышается точность навигации. Для объединения данных используется взвешенное усреднение, где веса определяются на основе погрешностей между данными гидроакустической навигационной системы и системы счисления пути относительно данных «идеального трека». Если система ГАНС выдает стабильный сигнал о местоположении в к-й момент, то $R_{ганс}$ представляет положение НПА, полученное с помощью ГАНС, а $R_{бнс}$ представляет рассчитанную позицию по данным бортовой навигационной системы в к-й момент времени, тогда:

$$A_{ганс} = R_{ганс} - R_k,$$

$$A_{бнс} = R_{бнс} - R_k,$$

где A обозначает ошибку определения местоположения, R_k – идеальное положение в к-й момент времени. Объединение данных может быть определено следующим уравнением:

$$P = L_{бнс} \cdot R_{бнс} + L_{ганс} \cdot R_{ганс},$$

где $L_{бнс}$ и $L_{ганс}$ – веса для данных гидроакустической навигационной системой и бортовой навигационной системы соответственно, определяемые на основе ошибок измерений. Система автоматически увеличивает вес $L_{бнс}$, если ГАНС начинает выдавать нестабильные данные, и наоборот – увеличивает вес $L_{ганс}$, если ошибки поступают от бортовой системы навигации. Таким образом система становится устойчивой к ошибкам. Накопление ошибки счисления пути минимизируется за счет использования системы ГАНС.

$$L = (1/\beta^2 / (1/\beta^2_{ганс} + 1/\beta^2_{бнс}))t,$$

где L – вес интегрированной системы, β – соответствующий шум измерения датчиком.

Для любого времени выборки, когда доступны данные USBL и DR, можно определить веса в соответствии с их погрешностью, большая погрешность соответствует малому весу, а меньшая погрешность



Рис. 16. Схема информационных потоков НС НПА

соответствует большему весу. Адаптивная способность AUV была значительно улучшена, что повышает стабильность интегрированной навигации.

Улучшить точность навигации позволяет использование фильтра Калмана. Фильтр Калмана – последовательный рекурсивный алгоритм обработки данных, использующий принятую модель динамической системы для получения оценки (информация от инерциальной навигационной системы, доплеровского лага, датчика давления и GPS), которая может быть существенно скорректирована в результате анализа каждой новой выборки измерений во временной последовательности (генерирует усредненное значение наиболее вероятного положения НПА). Фильтр Калмана работает по системе прогноз–коррекция; окончательная оценка вектора состояния корректируется на базе прогноза и измерения (рис. 17).

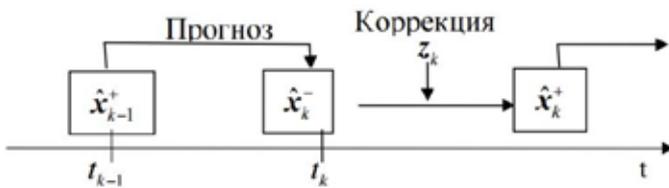


Рис. 17. Принцип работы фильтра Калмана. t_k – момент времени, X_k – оценка вектора состояния системы, Z_k – измерение

Координаты НПА и степень точности их оценки описываются при помощи вектора состояния X и его ковариационной матрицы P . На этапе экстраполяции работы фильтра Калмана выполняется расчет предсказываемого вектора состояния X_k и его ковариационной матрицы P_k . Для этого используются оценки предыдущего шага X^{k-1} и P^{k-1} , а также численный вектор перемещения НПА ΔX_k и его ковариационная матрица N_k . Выполняется пересчет:

$$X_k = X^{k-1} + \Delta X_k,$$

$$P_k = P^{k-1} + N_k.$$

На этапе коррекции работы дискретного фильтра Калмана:

$$X^*_k = X_k + K_k[D_k - d(X_k, z_k)],$$

$$P_k = P^{k-1} + N_k,$$

где D_k и $d(X_k, z_k)$ – измеренная и рассчитанная дальности между маяком и АНПА на k -м такте работы алгоритма:

$$d(X_k, z_k) = \sqrt{(x_k - x_b)^2 + (y_k - y_b)^2 + (z_k - z_b)^2},$$

(x_b, y_b, z_b) – координаты маяка – ответчика, z_k – глубина нахождения НПА в момент получения k -го сигнала, K_k – оптимальная по Калману матрица коэффициентов усиления, рассчитываемая в соответствии с выражением:

$$K_k = P_k H_k^T / [H_k P_k H_k^T + R_k],$$

где R_k – ковариационная матрица ошибок измерений дальностей; H_k – матрица частных производных функции измерения в точке X_k .

В результате двух шагов работы алгоритма на основе предыдущей оценки координат НПА X^{k-1} , ее ковариационной матрицы P^{k-1} и измерения дистанции до маяка D_k формируются текущая апостериорная оценка местоположения НПА в горизонтальной плоскости $X_k = [x^*_k, y^*_k]^T$ и ковариационная матрица P^*_k для данной оценки.

ГАСС – гидроакустическая система связи для обеспечения обмена информацией между носителем и подводным аппаратом. Подводная гидроакустическая связь с использованием акустических модемов заключается в преобразовании цифрового сообщения в акустический сигнал, который может передаваться под водой. Для гидроакустического канала связи характерно наличие многолучевости, замираний сигнала, которые приводят к появлению интерференционных помех. Еще одна проблема гидроакустической связи – увеличивающийся объем и скорость передаваемой информации (тысячи бит/с). В случае передачи телевизионного кадра общий объем информации в изображении (число строк – 192, столбцов – 256 и 8 уровней яркости) составит 20 кбайт. Тогда при скорости 2 кбит/с общее время передачи кадра составит 80 с. Необходимость одновременного повышения надежности и скорости передачи информации, при существенных ограничениях на полосу частот и энергетику, является приоритетной задачей при разработке эффективных акустических антенн. В табл. 4 приведены ТХ некоторых серийно выпускаемых гидроакустических модемов.

Оптическая подводная система связи может дополнять акустическую систему, обеспечивая высокую скорость передачи данных и низкую задержку в пределах оптического диапазона в сочетании с большей дальностью действия и надежностью акустики. Лазерные оптические подводные системы связи, основанные на синем-зеленом свете (470–580 нм), в рамках проводимых исследований показали ограничение работы несколькими десятками метров дальности (100 м при скорости передачи данных до 10 Мб/с).

Таблица 4

Технические характеристики гидроакустических модемов

Наименование	Скорость передачи, бит/с	Дистанция, м	Частотный интервал, кГц
Teledyne Benthos ATM-925	360	2000-6000	9-27
WHOI Micromodem	5400	3000	16-21
Linkquest UWM 1000	7000	350	27-45
Evologics S2C R48/78	31	1000	48-78
Sercel MATS 3G 34 kHz	25	5000	30-39
Tritech Micron Data Modem	40	500	20-28
Bluerobotics Water Linked M64	64	200	100-200

Заключение

В статье приводится анализ современных противоминных систем и их ключевых компонентов: необитаемых подводных аппаратов и гидроакустических систем (ГБО, ГСО и МЛЭ). В фокусе внимания – перспективный вариант противоминного комплекса, сочетающий в себе оптимальный набор технических средств для эффективного и безопасного обнаружения, идентификации и нейтрализации мин: от точечного поражения отделяемой боевой частью с зарядом до применения систем обезвреживания мин типа BALLISTA или одноразовых самоходных НПА с взрывчатим веществом.

Будущее беспилотных противоминных комплексов неразрывно связано с прогрессом в области искусственного интеллекта, который откроет новые горизонты в визуализации и анализе данных, поступающих от гидролокаторов и видеосистем НПА. Крайне важна разработка системы управления разнородными беспилотными платформами, функционирующей на базе отечественного программного обеспечения, что позволит интегрировать решения различных разработчиков в единое целое.

Гранты и программы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема No FMWE-2024-0024).

Для цитирования:

Войтов Д.В. ТЕХНОЛОГИИ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ПРОТИВОМИННЫХ КОМПЛЕКСОВ // Подводные исследования и робототехника. 2025. № 2 (52). С. 4–18. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_52_02_01. EDN: HSXZME.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М.: Наука, 2005. 398 с.
2. Войтов Д.В. Автономные необитаемые подводные аппараты. М.: Моркнига, 2015. 331 с.
3. Войтов Д.В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. М.: Моркнига, 2012. 677 с.
4. Войтов Д.В., Ткаченко А.О., Цариченко С.С. Автономные необитаемые подводные аппараты // Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. М.: Оружие и технологии, 2011. С. 218–227.
5. Дудкин А.А., Степанов Д.А., Сокол А.С. История возникновения и применения морских робототехнических комплексов военного назначения для ведения противоминных действий // Морской сб. 2018. № 6 (2055). С. 73–77.
6. Быстров Б.В., Кулешов К.В., Пироженов В.А., Светлов М.А. Аспекты совершенствования противоминных сил и средств Военно-морского флота России // Морской сб. 2017. № 10(2047). С. 46–51.
7. Илларионов Г.Ю., Сидоренко В.В., Смирнов С.В. Автономные необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 1. С. 31–39.
8. Лекомцев В.М., Титаренко Д.В. Гидроакустические средства визуализации для необитаемых подводных аппаратов // Морские информационно-управляющие системы. 2014. № 3(6). С. 14–19.
9. Луртон Х. Введение в подводную акустику – принципы и приложения. 2-е изд. Ксавьер Гейдельберг: Луртон Спрингер, 2010.
10. Хансен Р.В. Введение в гидролокатор с синтезированной апертурой, гидроакустические системы. Интех; 2011. DOI: 10.5772/23122. URL: <http://www.intechopen.com/books/sonar-systems/introduction-to-synthetic-aperture-sonar>

Справка об авторе

ВОЙТОВ Дмитрий Витальевич, Главный специалист
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Адрес: Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д.36
Область научных интересов: разработка и применение ТНПА
Тел.: 8(985) 941-90-41
E-mail: voitov2008@yandex.ru



TECHNOLOGIES OF UNMANNED UNDERWATER VEHICLES AND HYDROACOUSTIC SYSTEMS FOR UNMANNED MINE PROTECTION SYSTEMS

D.V. Voitov

Sea mines are very effective and inexpensive weapons. The leading maritime powers are developing mine action forces as part of programs to modernize sonar and navigation equipment and create complexes of surface and underwater unmanned systems that, unlike trawling techniques, can neutralize minefields from a safe distance. The article examines one of the options for a ship-based mine protection system with a specific set of technical means that allows for effective and safe search, identification and destruction of mines.

Keywords: unmanned underwater vehicle, side scan sonar, hydroacoustic navigation system, shipboard mine protection system

References

1. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii. M.: Nauka, 2005. 398 s. [In Russ.]
2. Voitov D.V. Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty. M.: Morkniga, 2015. 331 s. [In Russ.]
3. Voitov D.V. Teleupravlyaemye neobitaemye podvodnye apparaty. M.: Morkniga, 2012. 677 s. [In Russ.]
4. Voitov D.V., Tkachenko A.O., Tsarichenko S.S. Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty. Podvodnye tekhnologii i sredstva osvoeniya Mirovogo okeana. M.: Oruzhie i tekhnologii, 2011. S. 218–227. [In Russ.]
5. Dudkin A.A., Stepanov D.A., Sokol A.S. Istoriya vozniknoveniya i primeneniya morskikh robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya dlya vedeniya protivominnykh dejstvij. Morskoy sb. 2018. No. 6 (2055). S. 73–77. [In Russ.]
6. Bystrov B.V., Kuleshov K.V., Pirozhenko V.A., Svetlov M.A. Aspekty sovershenstvovaniya protivominnykh sil i sredstv Voenno-morskogo flota Rossii. Morskoy sb. 2017. No. 10(2047). S. 46–51. [In Russ.]
7. Illarionov G.Yu., Sidorenko V.V., Smirnov S.V. Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty dlya poiska i unichtozheniya min // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2006. No. 1. S. 31–39. [In Russ.]
8. Lekomcev V.M., Titarenko D.V. Gidroakusticheskie sredstva vizualizatsii dlya neobitaemykh podvodnykh apparatov. Morskoe informacionno-upravlyayushchie sistemy. 2014. No. 3(6). S. 14–19. [In Russ.]
9. Lurton H. Vvedenie v podvodnuyu akustiku – principy i prilozheniya. 2-e izd. Ksav'er Gejdel'berg: Lurton Springer, 2010. [In Russ.]
10. Hansen R.V. Vvedenie v gidrolokator s sintezirovannoy aperturoj, gidroakusticheskie sistemy. Intekh; 2011. DOI: 10.5772/23122. URL: <http://www.intechopen.com/books/sonar-systems/introduction-to-synthetic-aperture-sonar>

About the authors

VOITOV Dmitry Vitalievich, Chief Specialist
Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences
Address: 36 Nakhimovskiy Prospekt, Moscow, 117997, Russia
Research interests: ROV design and application
Phone: +7(985) 941-90-41
E-mail: voitov2008@yandex.ru

