

УДК 681.883.67.001:621.396.677

РЕКОНФИГУРИРУЕМАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

Ю.В. Ваулин¹, А.В. Инзарцев^{1,2}, О.Ю. Львов¹,
Ю.В. Матвиенко¹, А.М. Павин^{1,2}

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»²

Спектр выполняемых автономными необитаемыми подводными аппаратами-роботами (АНПА) операций постоянно расширяется и в настоящее время включает такие операции, как обследование заданных объектов и выполнение действий над ними. Система управления таких роботов должна иметь средства интеграции и координации работы разнородных бортовых устройств, обеспечивать определение навигационных параметров с необходимой точностью и вести обработку информации от сенсорных устройств в реальном времени.

Рассматриваемая реконфигурируемая навигационно-управляющая система АНПА обобщает многолетний опыт разработок ИПМТ ДВО РАН в этой области. Система содержит необходимый набор датчиков, интегрируется с широким спектром полезной нагрузки и может быть адаптирована для использования в аппаратах различного класса и назначения. Программное обеспечение системы реализует функционал для организации решения задач обзорно-поискового и обследовательского классов. Взаимодействие программных модулей системы организовано на базе распределенной событийно-ориентированной программной платформы. Программная платформа позволяет интегрировать разнородные программные модули, расположенные как в пределах вычислительной сети одного АНПА, так и на разных аппаратах. В качестве примера приводятся варианты конфигурации навигационно-управляющей системы для аппаратов тяжёлого, среднего и лёгкого классов.

ВВЕДЕНИЕ

Последние годы характеризуются стремительным развитием подводных робототехнических комплексов, в частности, автономных необитаемых подводных аппаратов-роботов (АНПА). Первоначально решаемые АНПА задачи сводились в основном к мониторинговым и обзорным работам на площадях (картирование, поисковые операции). По мере накопления опыта использования АНПА начали применяться для выполнения инспекционных операций над протяженными объектами (например, обследование кабельных трасс и магистральных трубопроводов донного расположения), а затем – для обследования локальных донных объектов (например, устьевой арматуры подводных нефтегазовых сооруже-

ний). В настоящее время речь идёт об оснащении АНПА манипуляционными комплексами, что позволяет использовать их не только для сбора информации, но и для осуществления пробоотбора, а также для выполнения различных операций с обнаруженными или инспектируемыми объектами.

Выполнение всего упомянутого спектра действий требует наличия на борту АНПА развитой системы управления и навигации (СБУН). При этом программно-аппаратная структура СБУН должна осуществлять следующие основные (ключевые) функции:

- организацию скоординированной работы всего бортового оборудования АНПА (включая полезную нагрузку) для выполнения поставленных перед роботом задач (иными словами, для выполнения миссии робота). Аппарат-

ная и программная архитектуры системы должны обеспечивать нетрудоёмкое наращивание функциональности и интегрирование разнородных бортовых устройств, поскольку оснащение робота может меняться в зависимости от класса и решаемых задач;

- обработку информации от бортового навигационного оборудования для реализации прецизионной навигации и управления движением. СБУН должна иметь возможность работы с навигационными средствами различной конфигурации, а также с разнородными каналами связи. Наличие каналов гидроакустической связи

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а.
Тел.: 8(423)221-55-45, доб. 601. E-mail: vaulin@marine.febras.ru

² 690091, Владивосток, ул. Суханова, 8.
Тел.: 8(423)221-55-45, доб. 616. E-mail: inzar@marine.febras.ru

является необходимым условием групповой работы АНПА. В свою очередь, коллективная работа позволяет применять методы повышения точности навигации, что значительно увеличивает эффективность использования АНПА;

- реализацию интегральной обработки информации от различных обзорно-поисковых систем (акустической, фото, электромагнитной и др.) на борту АНПА и организацию адекватной реакции в реальном времени на обнаружение искомых объектов.

В зависимости от габаритов и назначения робота СБУН может компоноваться различным образом, однако в любом случае должна включать в свой состав следующие основные группы оборудования:

- сеть компьютеров, конфигурация которой зависит от сложности вычислительных задач;
- каналы связи с бортовыми устройствами (в том числе с полезной нагрузкой);
- навигационно-пилотажные датчики внутреннего контура управления;
- супервизоры питания;
- сенсоры внешней среды (эхолокационные сенсоры, датчики давления, доплеровский лаг и т.п.);
- оборудование систем навигации и связи (в том числе гидроакустической).

Далее в статье речь пойдет об опыте ИПМТ ДВО РАН в организации типовых СБУН для АНПА различных классов и назначения, в разное время построенных в Институте, а также о некоторых перспективных конфигурациях системы.

1. Программно-алгоритмическая основа реализации задач СБУН

Развитие программно-алгоритмического компонента СБУН идет в двух направлениях. Первое

заключается в разработке и реализации методов и алгоритмов, определяющих поведение АНПА (возможности робота по обнаружению объектов, осуществлению навигации, управлению движением и т.п.). В рамках второго направления создаются программная платформа и архитектура СБУН, которые позволили бы легко интегрировать и использовать разработанные методы для расширения функциональных возможностей АНПА. Результатом этих работ явилось создание распределенной агентно-ориентированной архитектуры СБУН для АНПА обследователя класса. Желаемое поведение робота описывается в терминах агентов, составляющих библиотеку тактического уровня архитектуры [1].

1.1. Интегрированная система управления и моделирования поведения АНПА на базе распределенной программной платформы

Для обеспечения единого информационного взаимодействия между АНПА (или группой аппаратов) и судном сопровождения зачастую приходится использовать избыточную связку протоколов, учитывающих особенности каждого из используемых каналов связи. Кроме того, необходимо обеспечить информационное взаимодействие между программными модулями внутри одного аппарата, а также между модулями системы управления АНПА и программами-имитаторами сенсорных устройств, используемых для проведения модельных экспериментов и предстартовой симуляции [2–4]. Кроме того, зачастую возникает необходимость в интеграции нового обследователя оборудования в существующую систему управления АНПА для

реализации обработки данных в режиме реального времени на борту аппарата [5–7].

С целью унификации информационного взаимодействия различных программных компонентов системы управления АНПА между собой в ИПМТ ДВО РАН была разработана специализированная программная платформа [8]. При разработке платформы учитывались следующие требования:

- кроссплатформенность (возможность функционирования в разных операционных системах, включая ОС реального времени);
- реконфигурируемость (возможность добавления/удаления оборудования и программного обеспечения с минимальными изменениями);
- малая ресурсоемкость и возможность использования в низкопроизводительных встроенных вычислительных сетях;
- возможность сохранения (логирования) всего или избранного потока данных;
- интерфейс пользователя с поддержкой мобильных устройств;
- тесная интеграция с существующими и создаваемыми системами управления АНПА;
- возможность имитации аварийных ситуаций [9] и моделирования поведения АНПА в ускоренном режиме.

Опыт создания АНПА позволяет предложить следующие решения для достижения указанных целей: а) децентрализованная распределенная архитектура (без использования модуля, служащего для установки связи между процессами); б) веб-интерфейс взаимодействия программного обеспечения с пользователями; в) обмен данными между веб-клиентом и веб-сервером моделирования на основе веб-сокетов; г) асинхронная передача данных между симулято-

ром и программным обеспечением АНПА.

При разработке программной среды была использована идеология децентрализованной распределенной системы как наиболее подходящая для перестраиваемой (реконфигурируемой) программной среды СБУН. Использование асинхронного взаимодействия отдельных исполняемых модулей, часто расположенных в разных сегментах сети, позволяет гибко перераспределять вычислительные ресурсы в зависимости от решаемых задач.

Для взаимодействия оператора со средой управления и моделирования АНПА используется веб-интерфейс, который обеспечивает совместимость с мобильными устройствами без установки дополнительного программного обеспечения.

Для организации единого механизма информационного взаимодействия компонентов событийно-ориентированной программной системы СБУН разработан интерфейс взаимодействия процессов (ИВП). ИВП использует децен-

трализованный принцип обмена информацией, когда каждый компонент системы является одновременно поставщиком и потребителем данных. Приведенная на рис. 1 схема демонстрирует структуру информационного взаимодействия некоторых компонент системы управления двух аппаратов.

Обмен между процессами осуществляется посредством сообщений – особым образом структурированных блоков информации, которые посылаются в асинхронном режиме. После публикации сообщения поставщик не блокируется до получения ответного сигнала, а действует по принципу «опубликовал–забыл». Все сообщения обладают уникальным идентификатором (имя сообщения), который равен символьному представлению типа данных. Такой подход позволяет гарантировать отсутствие пересечений идентификаторов у сообщений разных типов. Разные сообщения логически объединены в интерфейсы. Имена интерфейсов, как правило, принадлежат одному программному модулю (например, навигационный модуль, драйвер

устройства и др.) или группе однотипных модулей (например, агенты управления).

С каждым именем сообщения связан определенный порт операционной системы, который вычисляется как хэш-функция от имени сообщения. Все сообщения посылаются в ассоциированный с ними порт и доступны для прослушивания всеми компонентами системы. Как правило, каждая программа подписана на небольшое количество сообщений, поэтому количество слушающих потоков у большинства программ получается относительно невелико (в среднем 1–5). Таким образом, количество «не нужных» принимаемых потоком сообщений крайне мало (только сообщения с коллизией по номеру хэш-функции).

При выборе механизма межпроцессного взаимодействия был проведен ряд численных экспериментов для сравнения с другими системами обмена сообщениями [8]. Результаты экспериментов показывают, что при прочих равных условиях разработанный ИВП поддерживает работу примерно в 2,5 раза

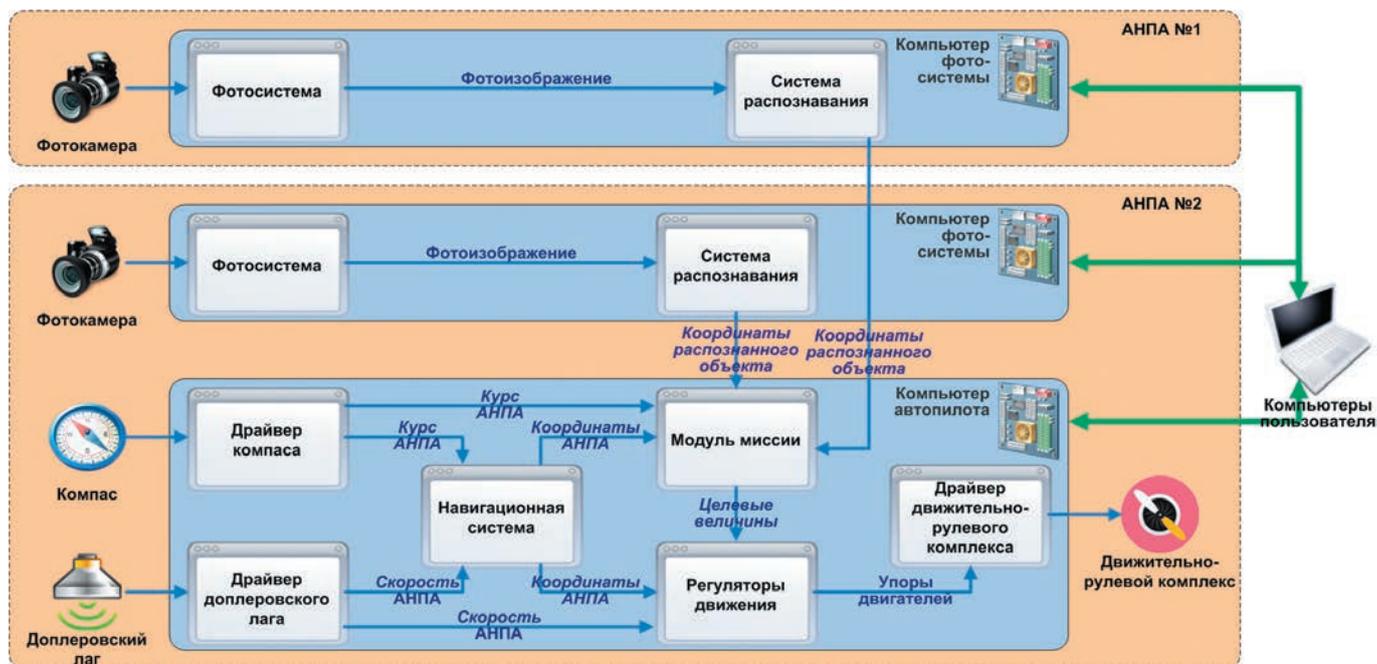


Рис. 1. Структура информационного взаимодействия типовых модулей системы управления двух АНПА

большого количества модулей, чем, например, у системы ИРС [10].

1.2. Интегральная обработка информации и реализация обследовательских задач

Сложившаяся методика выполнения обзорно-поисковых и обследовательских работ с помощью АНПА основана на циклическом повторении однотипных программ-заданий, сборе необходимой информации с помощью обзорно-поисковых систем и ее постобработке по результатам серии запусков. Решение оперативных задач связано с выполнением всего цикла операций в реальном времени и подразумевает коррекцию миссий в автоматическом или супервизорном режимах управления. К числу этих задач можно отнести обнаружение и инспекцию объектов естественного и искусственного происхождения, траекторное обследование физических полей и их аномалий и др.

Выполнение поисково-обследовательских операций предполагают согласованное функционирование в составе СБУН АНПА нескольких агентов, обеспечивающих реализацию обзорной и обследовательской частей работы [1]. При этом группировка агентов, реализующих обнаружение и обследование объектов, находится поочередно в двух состояниях. Рассмотрим для примера процесс обнаружения и обследования локальных объектов. Во время первой (пассивной) фазы происходит обнаружение объектов с использованием информации, поступающей от систем обнаружения (например, на эхограмме гидролокатора бокового обзора (ГБО)). Обнаружение включает этапы предварительной обработки и фильтрации изображения, выделение границ объектов, выделение объектов и подсчет их

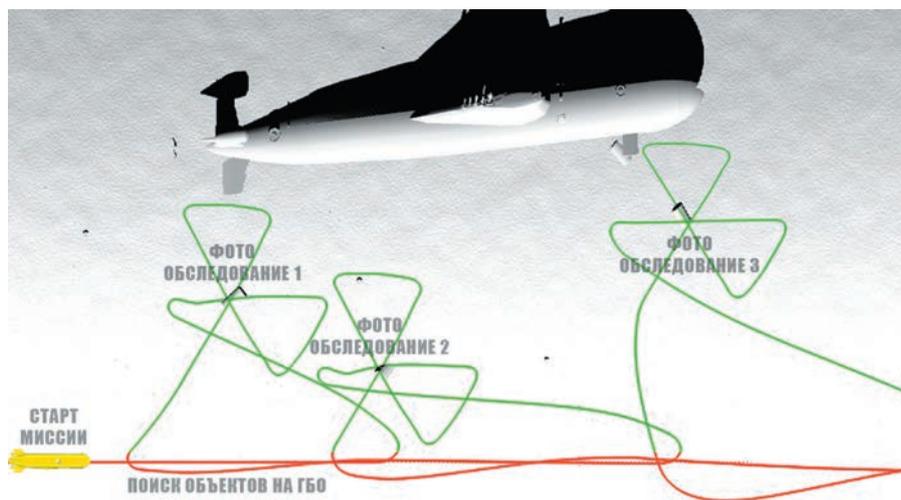


Рис. 2. Результаты модельных экспериментов по поиску и обследованию малоразмерных объектов: фрагмент изображения ГБО по левому борту и траектория движения АНПА

количества (кластеризация), определение параметров и классификация объектов. После обнаружения конкретного объекта активизируется агент, осуществляющий его фотопокрывание (рис. 2).

Для управления маневрированием в локальной области (например, при детальном обследовании объекта) более эффективными являются средства видеонавигации. Обследование может включать этап зависания над выбранным объектом или точкой дна. Для этого активизируется агент, использующий алгоритмы обнаружения и классификации объектов морского дна на основе анализа последовательности фотоизображений [11].

Аналогичная идеология используется при обследовании искусственных протяженных объектов (ИПО), к числу которых относятся кабели и трубопроводы. Цель инспекции ИПО заключается в движении АНПА вдоль объекта с покрытием его по всей длине фото или ГБО-изображениями. Детектирование и обследование протяженных объектов производится на основе разнородной и неполной информации от бортовых сенсорных устройств (ГБО, фотосистемы, электромагнитного искателя (ЭМИ)). Для повышения

вероятности обнаружения информация из различных источников объединяется в «модель среды», которая включает оценку вероятности существования объекта с заданными координатами в текущий момент времени [12]. Траектория аппарата представляет колебательное движение вдоль объекта инспекции, причём амплитуда колебаний уменьшается при улучшении условий обнаружения объекта (вплоть до вырождения в прямую линию). Подобная технология использовалась при обследовании реального подводного кабеля в Уссурийском заливе Японского моря [12].

1.3. Навигационный компонент СБУН

Эффективность решения задач, стоящих перед АНПА, в значительной степени определяется точностью навигационного обеспечения. С учетом существующих требований по навигационной точности технология решения навигационной задачи и состав навигационного оборудования для АНПА к настоящему времени определены достаточно четко – это комплексирование информации от бортовой автономной навигационной системы, включающей доплеровский

лаг, блок пилотажных датчиков и БИНС, с данными от внешних гидроакустических навигационных систем (ГАНС) и спутниковой навигационной системы (СНС) (рис. 3).

В аппаратах ИПМТ ДВО РАН применяется навигационный компонент СБУН – навигационная система (НС) с унифицированным ядром и реконфигурируемой в зависимости от задач периферией. Каждый элемент НС является отдельным программным модулем, осуществляющим взаимодействие с другими модулями СБУН через стандартные интерфейсы, включая ИВП. Такой подход облегчает конфигурирование НС под конкретный аппарат. Рассмотрим далее несколько типовых конфигураций НС.

НС глубоководного АНПА для прецизионной съемки дна и по-

исковых операций Клавесин-1Р включает в себя датчики типовой структуры СБУН, приведенные на рис. 3: модуль пилотажных датчиков (магнитный компас, датчики крена, дифферента, угловых скоростей); датчик глубины; доплеровский и относительный лаги; БИНС; приемник СНС; ГАНС с длинной базой (ДБ); гидроакустическую систему связи (ГАСС). Такой состав НС обеспечивает навигацию в локальном районе с высокой точностью (2–5 м) даже при выполнении миссий продолжительностью несколько суток [13].

Недостатком традиционных ГАНС с длинной базой является необходимость развертывания и калибровки сети придонных маяков-ответчиков перед началом выполнения работ, а также их подъема по завершении работ (в случае использования многоцветных

маяков). Кроме того, дальность действия таких систем обычно не превышает 10–15 км, и при обследовании больших площадей возникает необходимость в многократной переустановке маяков. В ИПМТ ДВО РАН проводятся работы по созданию высокоомобильного гидроакустического навигационного комплекса с синтезированной длинной базой (СДБ), использующего единственный мобильный гидроакустический маяк (МГМ) [14, 15]. Работа такой ГАНС основана на использовании модемной акустической связи, которая позволяет АНПА и МГМ обмениваться пакетами навигационных данных и одновременно измерять время распространения акустического сигнала между ними. Подобная система реализована в АНПА среднего класса “Платформа”. Возможности СДБ

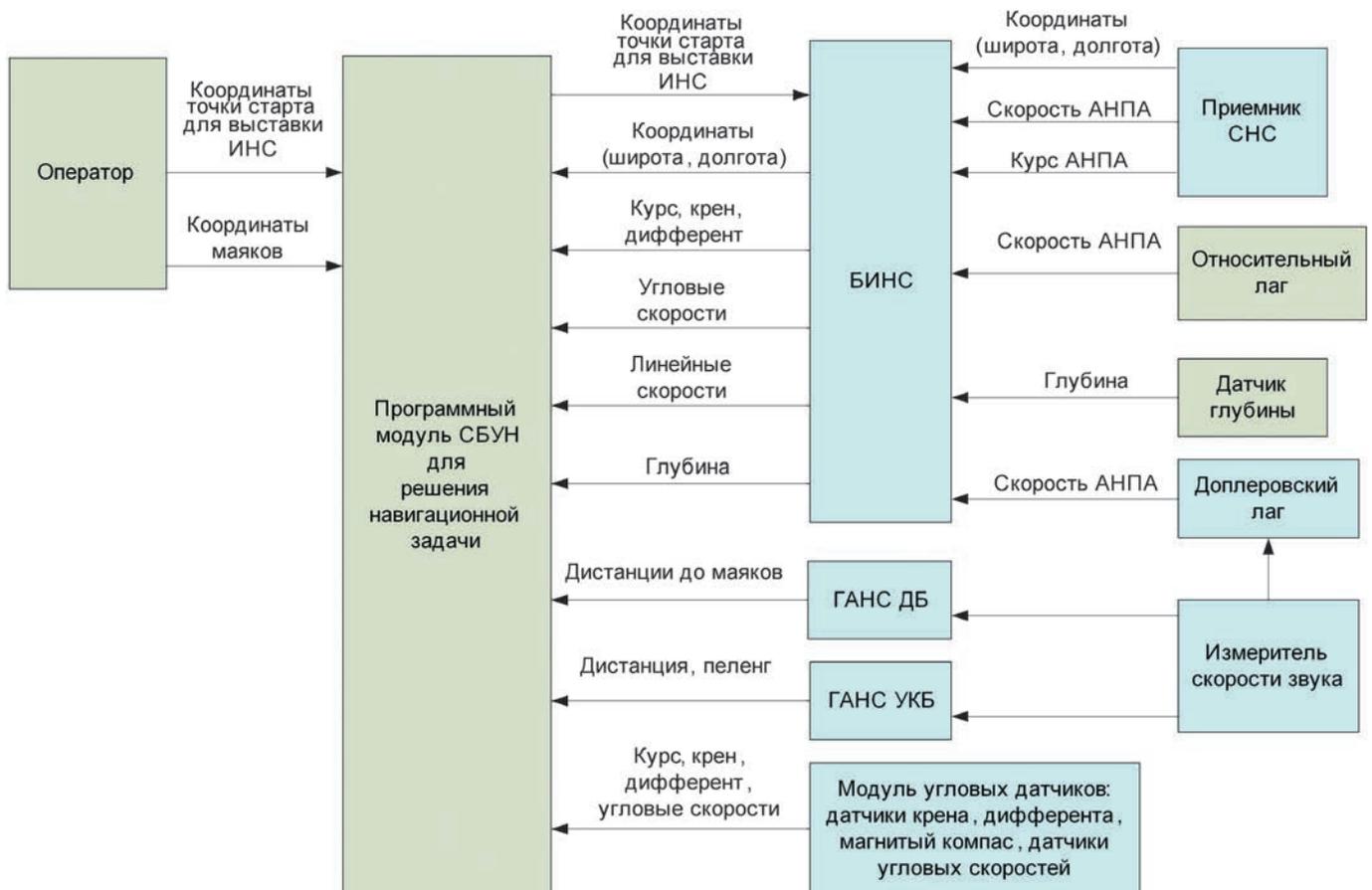


Рис. 3. Обобщенная функциональная схема бортовой навигации СБУН



Рис. 4. Типовая структура СБУН

ГАНС для навигации АНПА подтверждены также при использовании робототехнического комплекса «МАРК», объединяющего в себе надводный и подводный автономные аппараты.

Перспективным направлением развития навигационных систем для подводных аппаратов является создание НС для групп роботов. В ИПМТ ДВО РАН создан робототехнический комплекс МТ-2012, состоящий из группы АНПА и досмотрового телеуправляемого НПА (ТНПА), способных работать в едином навигационном поле маяков [16]. Это позволяет ТНПА с высокой точностью выходить для выполнения досмотра на объекты, обнаруженные АНПА. Одновременно с этим АНПА могут продолжать выполнение поисковой миссии.

Другим направлением в области групповой навигации является создание навигационных алгоритмов для групп АНПА, оснащенных

гидроакустическими модемами с функцией измерения взаимной дистанции [17, 15]. Отдельными элементами таких групп могут являться надводные автономные аппараты и стационарные донные навигационные станции.

2. Типовые конфигурации СБУН

Рассмотрим далее аппаратную компоненту СБУН, служащую базой для реализации алгоритмов и методов формирования поведения АНПА. На рис. 4 приведена типовая структура СБУН в составе АНПА.

СБУН управляет системой энергообеспечения (СЭО), двигательно-рулевым комплексом (ДРК) и другими техническими средствами (ТС) АНПА. В зависимости от назначения АНПА возможны вариации состава СБУН и выбора конкретных функциональных устройств, с целью как обеспечения заданных технических

требований, так и оптимизации массогабаритных характеристик и энергопотребления.

СБУН построена на базе производительного вычислителя и благодаря кроссплатформенному ИВП может работать под управлением широкого спектра операционных систем (в частности, в ИПМТ ДВО РАН используется одна из модификаций ОС QNX Neutrino – изделие КПА 10964-01). Система функционирует в защищенном режиме работы памяти, что позволяет без угрозы нарушения безопасности внедрять пользовательское программное обеспечение в вычислитель. В совокупности с высокой производительностью это позволяет решать широкий круг задач без внедрения в систему дополнительных вычислительных ресурсов.

Важной особенностью СБУН является применение помехозащищенных интерфейсов со специализированными протоколами, обна-

руживающими ошибки, для связи бортового компьютера СБУН со всеми электронными узлами комплекса, а также наличие развитой контрольно-аварийной системы. Для ответственных применений на базе нескольких бортовых компьютеров может быть реализована схема перекрёстного нагруженного (горячего) резервирования.

Для обеспечения контрольно-аварийных функций в СБУН приняты следующие технические решения:

- устройства СБУН сгруппированы в ряд сегментов локальной вычислительной сети (ЛВС) с целью оптимизации информационных потоков;
- устройства СБУН имеют развитые средства программно-аппаратной диагностики (контроль токов, напряжений, целостности и корректности сообщений и т.п.);
- управление электропитанием бортовых устройств СБУН имеет иерархическую структуру, обеспечиваемую контроллером аварийной системы и супервизорами питания бортового компьютера (БК).

С целью унификации конструкции блоков электроники и функциональных модулей АНПА в ИПМТ ДВО РАН была разработана специализированная аппаратная плат-

форма [18] с учетом требований унифицированной конструкции, энергоинформационных интерфейсов, внешних воздействующих факторов, удобства наладки и обслуживания.

Ядром для решения задач СБУН является модуль бортового компьютера (рис. 5).

В состав модуля входят:

- унифицированный одноплатный компьютер на базе процессоров Intel Atom E6xx, E38xx, ARM в формате PC-104 или COM Express Type 10;
- твердотельный накопитель емкостью 8–32 Гб;
- микроконтроллер супервизора питания, обеспечивающий интерфейс компьютера с бортовой ЛВС, коммутацию питания бортовых устройств, диагностику параметров и состояний.

Рассмотрим далее типовые варианты структуры и компоновки СБУН для аппаратов различных классов. В зависимости от модели использования (назначения и решаемых задач) условно АНПА можно разделить на три класса:

- малогабаритные аппараты (массой до 50–150 кг);
- аппараты среднего класса (массой до 1000 кг);
- тяжелые аппараты (массой более 1000 кг).

В основном такая классификация АНПА определяется массогабаритными характеристиками аппаратуры полезной нагрузки, требованиями обеспечения автономности. Соответственно для каждого класса конструктивное исполнение СБУН имеет особенности. При этом основным критерием конструктивных решений создания СБУН является применение унифицированных электронных модулей и типовых прочных контейнеров.

2.1. Легкие аппараты

Вследствие малых габаритов такие АНПА имеют ограниченный набор исполняемых функций (являются специализированными или имеют набор сменных полезных нагрузок) и соответственно усеченную структуру СБУН (во многих случаях с ограничением резервирования).

Особенностью малогабаритных АНПА («Монитор», «Чилим» [19] и «МАРК» [20] (рис. 6)) является компоновка СБУН, ГАСНС, СЭО в едином ПК, являющимся элементом корпуса аппарата. СБУН этих аппаратов не имеет гироскопа, относительного лага, что определяет специфику модели использования.

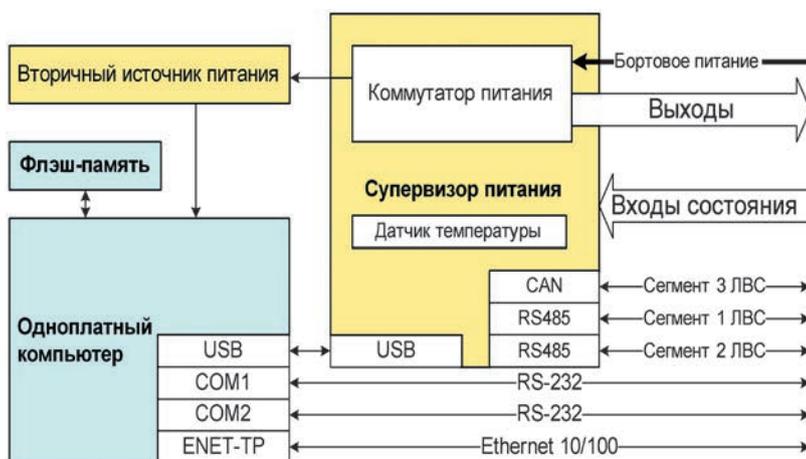


Рис. 5. Модуль бортового компьютера: структура (слева) и внешний вид (справа)



Рис. 6. Внешний вид АНПА «МАРК» и блок электроники СБУН, СЭО и ГАСНС (D 200 × L 700) – центральный отсек

2.2. Аппараты среднего класса

К среднему классу относятся АНПА ММТ-3000 [21], МТ-2010 («Пилигрим») (рис. 7), серия МТ-2014, являющиеся модификацией МТ-2010 («Платформа», «Имитатор»), а также АНПА комплекса для шельфовых работ МТ-2012 [22]. Перечисленные АНПА характеризуются массой 250–350 кг и габаритными размерами D 0,45 × L 3,0–3,5 м.

Создание АНПА среднего класса определилось логическим продолжением развития технологий, отработанных для тяжелых АНПА (например, Клавесин-1Р), а также прогрессом в области миниатюризации электроники. Фактически структура СБУН и функциональный состав полезной нагрузки идентичны таковым тяжелого

Клавесин-1Р. Например, современное поисково-обследовательское средство многолучевой эхолот SeaBat-20-Р может быть установлен в АНПА серии МТ-2014. Исключительные составляют характеристики по максимальной глубине, энергоемкости и точности БИНС.

Особенностью компоновки является размещение аппаратуры СБУН, ГАСНС и БИНС на базе блока чувствительных элементов БЧЭ-501Д (ООО НПК «Оптолинк») в двух унифицированных ПК с внутренним диаметром 150 мм (рис. 7).

2.3. Тяжелые аппараты

К тяжелому классу относятся АНПА серии Клавесин-1Р [23] (рис. 8) и АНПА большой автономности (проект). Как правило, аппараты этого класса являются

многофункциональными, предназначенными для решения как специальных, так и широкого круга поисково-обследовательских задач. Характерные габариты и массы аппаратов: D 0,9 × L 5,3 м при массе 2,5 т и D 1,6 × L 12 м при массе 18 т. СБУН АНПА Клавесин-1Р расположена в ПК D 150 мм и ПК D 254 мм (БИНС Phins). СБУН реализована в полном объеме типовой структуры с элементами аппаратного и функционального резервирования.

Особенностью компоновки АНПА большой автономности является расположение аппаратуры СБУН, а также основной аппаратуры полезной нагрузки (ПН) в носовом негерметичном отсеке (рис. 9). Такое конструктивное решение позволяет применить технологические наработки про-

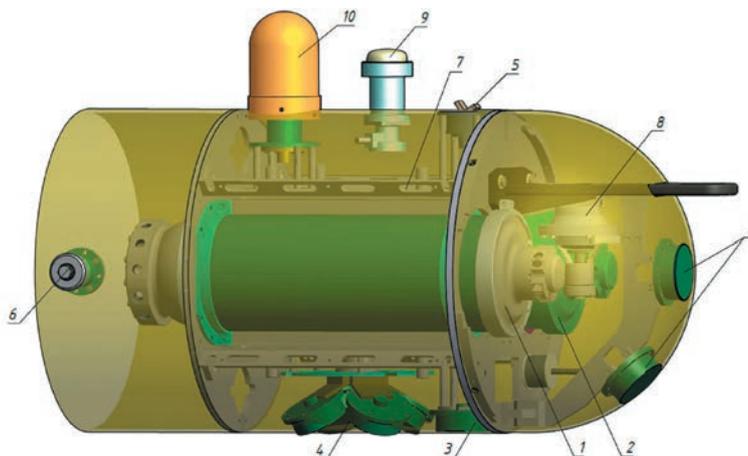


Рис. 7. Внешний вид АНПА «Пилигрим» (слева). Вариант компоновки СБУН в составе АНПА (справа): 1 – ПК СБУН (модули угловых датчиков, БК, ЛВС, ЭЛС, ДЛ, ГАСНС); 2 – ПК БИНС, 3 – антенны ЭЛС, 4 – антенны ДЛ, 5 – ВЛ, 6 – герморазъединитель пульта, 7 – ДГ, 8 – КД, 9 – приемник СНС с проблесковым маяком, 10 – антенна ГАСНС

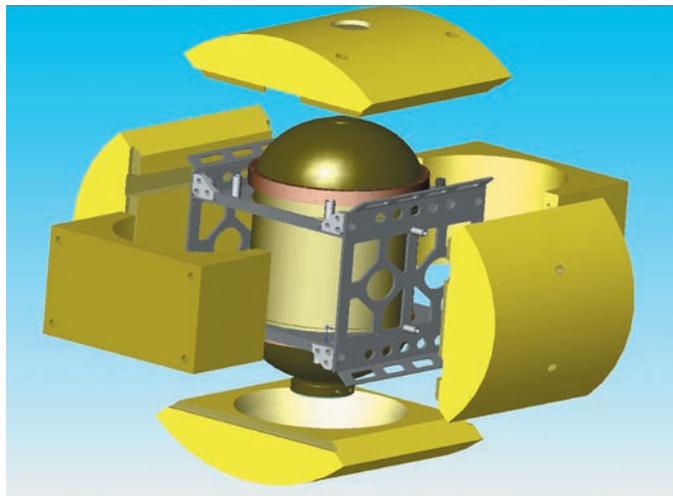


Рис. 8. Внешний вид АНПА Клавесин-1Р (слева). Унифицированная конструкция отсека (справа)

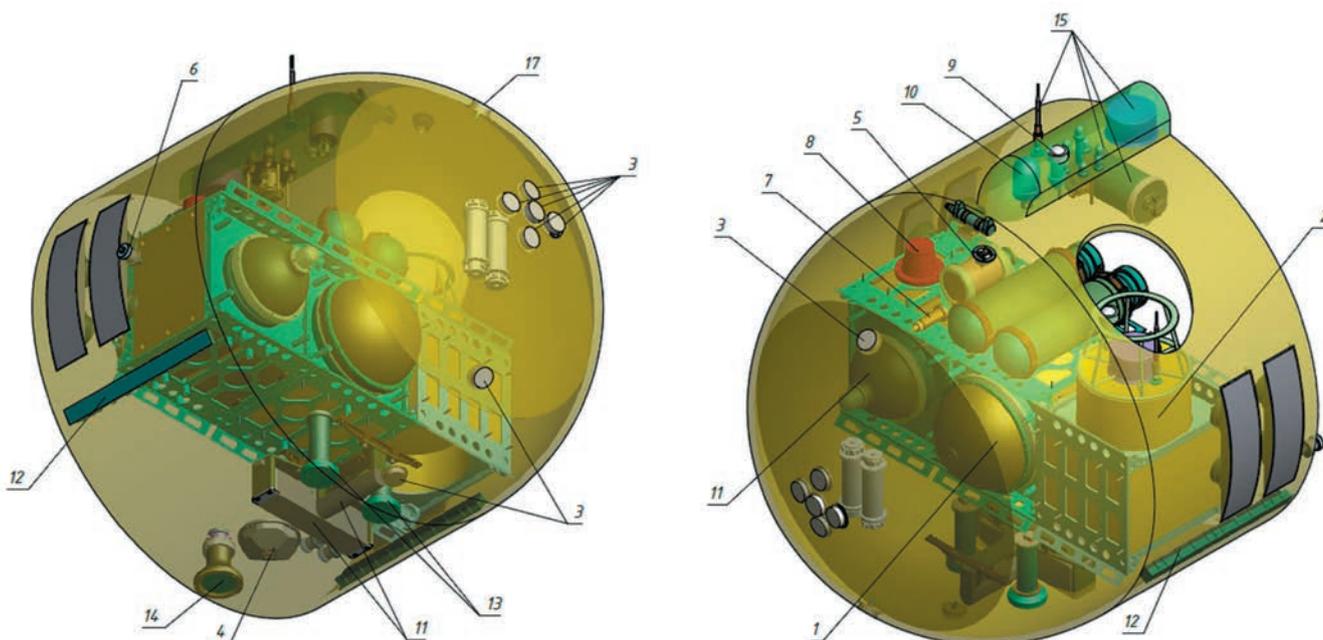


Рис. 9. Компоновка аппаратуры СБУН в составе АНПА большой автономности, включая полезную нагрузку: 1 – ПК СБУН, ГАСНС и БИНС, 2 – всплывающий радионавигационный буй, 3 – антенны ЭЛС, 4 – антенны ДЛ, 5 – ВЛ, 6 – герморазъединитель пульта, 7 – ДГ, 8 – КД, 9 – приемник СНС с проблесковым маяком, 10 – антенна ГАСНС

екта Клавесин-1Р (типичные отсеки и соответственно унифицированные прочные контейнеры) для компоновки аппаратуры СБУН и ПН. Носовой отсек сопрягается информационно и энергетически с другими отсеками АНПА с помощью двух герморазъединителей, обеспечивая удобство автономной отладки, технического обслуживания и ремонта.

Аппаратура СБУН и ГАСНС, включая блок БИНС ГЛ-150 (ООО

«Гиролаб»), расположены в одном ПК с внутренним диаметром 340 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность применения типовых конфигураций СБУН для АНПА различных классов подтверждается многолетним опытом разработок и успешной практикой ИПМТ ДВО РАН в области использования АНПА. В качестве приме-

ров можно привести выполненные работы по обследованию подводного кабеля в Уссурийском заливе, работы по поиску взрывоопасных объектов в акваториях о-ва Русский во время строительства объектов саммита АТЭС-2012, поиск потенциально опасного объекта у о-ва Сахалин, в Карском море и многие другие. При этом для выполнения перечисленных работ использовались АНПА различных классов.

Развитие СБУН ведется в направлениях «интеллектуализации» АНПА, создания средств для групповой работы АНПА (в том числе для гетерогенной группировки роботов), модернизации модулей и датчиков СБУН, разрабатываемых в ИПМТ ДВО РАН (уменьшение массогабаритных характеристик, расширение функциональных

возможностей и функциональная интеграция) с целью повышения отказоустойчивости и адаптации для решения новых задач.

Ряд результатов, использованных в работе, получен при поддержке гранта РФФИ № 14-50-00034 (в части разработки алгоритмов автоматизированного планирования и коррекции обследователь-

ских траекторий движения АНПА при выполнении мониторинга и обзорно-поисковых операций) и гранта РФФИ № 16-07-00350 (в части разработки алгоритмов обнаружения донных объектов с заданными характеристиками на гидролокационных изображениях и организации модельных экспериментов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В. Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 1 (15). С. 4–16.
2. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' RealTime Behavior // Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference. Washington DC, USA, 2015.
3. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G., Lebedko O., Panin M. A Reconfigurable Webbased Simulation Environment for AUV // Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference. Washington DC, USA, 2015.
4. Инзарцев А.В., Павин А.М., Елисеенко Г.Д., Родькин Д.Н., Сидоренко А.В., Лебедко О.А., Панин М.А. Реконфигурируемая кроссплатформенная среда моделирования поведения необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2 (20). С. 28–34.
5. Pavin A. Underwater Object Recognition in Photo Images // Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference. Washington DC, USA, 2015.
6. Инзарцев А.В., Павин А.М., Лебедко О.А., Панин М.А. Распознавание и обследование малоразмерных подводных объектов с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2 (22). С. 36–43.
7. Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Рылов Н.И. Мониторинг морского дна с применением технологий интеллектуальной обработки данных поисковых устройств на борту автономного необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2 (20). С. 20–27.
8. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G. Reconfigurable Distributed Software Platform for a Group of UUVs (Yet Another Robot Platform) // Proceedings of the OCEANS'16 MTS/IEEE Conference. Monterey, USA, 2016.
9. Inzartsev A., Pavin A., Kleshev A., Gribova V., Eliseenko G. Application of Artificial Intelligence Techniques for Fault Diagnostics of Autonomous Underwater Vehicles // Proceedings of the OCEANS'16 MTS/IEEE Conference. Monterey, USA, 2016.
10. Inter Process Communication (IPC) [Электронный ресурс] // Carnegie Mellon School of Computer Science. URL: <http://www.cs.cmu.edu/~ipc/> (дата обращения: 27.03.2017).
11. Костенко В.В., Павин А.М. Автоматическое позиционирование необитаемого подводного аппарата над объектами морского дна с использованием фотоизображений // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1(17). С. 39–47.
12. Inzartsev A., Pavin A. AUV Application for Inspection of Underwater Communications // Underwater Vehicles / ed. by A. Inzartsev. In-Tech Publishers, 2009. P. 215–234.
13. Ваулин Ю.В., Матвиенко Ю.В., Каморный А.В. Оценка характеристик навигационных средств подводных роботов в условиях полигона // Материалы 6-й Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток, 2015.
14. Scherbatyuk A. Ph., Dubrovin F.S. Some Algorithms of AUV Positioning Based on One Moving Beacon // Proceedings of the IFAC Workshop Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles. Portugal, Porto, 2012.
15. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. Studying some algorithms for AUV navigation using a single beacon: The results of simulation and sea trials // Gyroscopy and Navigation. 2016. V. 7, Is. 2. P. 189–196.
16. Борейко А.А., Ваулин Ю.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М. Особенности навигационного и алгоритмического обеспечения комплекса АНПА-ТНПА при решении задач мониторинга донной поверхности // Изв. Юж. федерал. ун-та. Технические науки. 2014. № 3 (152). С. 112–127.
17. Webster S.E., Whitcomb L.L., Eustice R.M. Advances in Decentralized Single-Beacon Acoustic Navigation for Underwater Vehicles: Theory and Simulation // Proceedings of IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Conference. Monterey, USA, 2010.
18. Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Сидоренко А.В., Хмельков Д.Б. Архитектурные конфигурации систем управления АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 1 (1). С. 18–30.
19. Гой В.А., Костенко В.В., Найдено Д.Н., Михайлов Д.Н., Родькин Д.Н. Опыт разработки и испытаний телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с автономным источником питания // Материалы 6-й науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, 2015. С. 101–106.
20. Гой В.А., Дубровин Ф.С., Кушнерик А.А., Михайлов Д.Н., Сергеев Н.С., Туфанов И.Е., А.Ф. Щербатюк. Морской робототехнический комплекс, включающий автономные необитаемые подводный и водный аппараты // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 3. С. 67–72.
21. Gornak V.E., Lvov O. Yu., Matvienko Yu.V., Scherbatyuk A. Ph. MMT 3000 – Small AUV of New Series of IMTP FEB RAS // Proceedings of OCEANS'06 MTS/IEEE. Boston, USA, 2006.
22. Матвиенко Ю.В., Борейко А.А., Костенко В.В., Ваулин Ю.В. Комплекс робототехнических средств для выполнения поисковых работ и обследования подводной инфраструктуры на шельфе // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1 (19). С. 4–15.
23. Инзарцев А.В., Каморный А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 2 (4). С. 5–14.