

СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ТЯЖЁЛОГО КЛАССА

В.С. Быкова, А.И. Машошин

Работа посвящена системе управления АНПА тяжёлого класса, которые отличаются от АНПА других классов более широким спектром решаемых задач, в том числе на больших глубинах и на большом удалении от пункта базирования, что потребовало оснащения их большой номенклатурой специального оборудования и высокой энерговооружённостью. Данные отличия налагают более высокие требования к системе управления АНПА. Система управления АНПА строится по мультиагентному принципу, позволяющему понизить её сложность путём передачи части её функций системам АНПА. Ядром мультиагентной системы управления АНПА является программный комплекс управления (ПКУ), на который возлагается координация функционирования всех систем АНПА в интересах максимально точного выполнения маршрутного задания путём своевременной выдачи команд системам АНПА и проверки их выполнения, при необходимости корректировки маршрутного задания, контроля текущего состояния АНПА с принятием соответствующих мер в случае возникновения критической ситуации, организации радио и гидроакустической связи с командным пунктом и взаимодействующими средствами. Целью работы является описание структуры ПКУ, разработанной авторами и отличающейся простотой, обеспечивающей надёжность функционирования ПКУ и универсальностью, позволяющей использовать разработанный ПКУ в АНПА различного назначения. В основе разработанной структуры лежит мультиагентный принцип построения ПКУ, заключающийся в том, что предусмотрены набор независимых программ-агентов, каждая из которых управляет АНПА при решении конкретной задачи, и программа координатор, которая передаёт управление соответствующей программе-агенту при возникновении соответствующих условий. Данный подход позволяет упростить ПКУ и тем самым повысить его надёжность. Также в статье приводится ряд дополнительных технических решений, направленных на упрощение и универсализацию системы управления.

Ключевые слова: система управления АНПА, программный комплекс управления, алгоритмы управления.

Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективным средством изучения и освоения Мирового океана [1]. На сегодняшний день в мире создано несколько сотен проектов АНПА различного размера и назначения [2]. Среди них особое место занимают АНПА тяжёлого класса, существенно отличающиеся от АНПА других классов [3–5]. В частности:

- АНПА тяжёлого класса предназначены для решения широкого спектра задач, включающих поиск различных донных объектов,

в том числе на больших глубинах, доставку грузов, прокладку подводных кабелей связи, контроль и защиту назначенных районов от вторжения нарушителей, участие в специальных операциях;

- для решения перечисленных задач АНПА тяжёлого класса оснащены большой номенклатурой радиоэлектронного и технического оборудования. Например, навигационная система включает высокоточную инерциальную систему, эхолот, абсолютный и относительный лаги, все возможные средства обсервации. Для поиска донных объектов

АНПА тяжёлого класса оснащены четырьмя–пятью независимыми поисковыми системами, функционирующими на разных физических принципах. Для обнаружения нарушителей на АНПА устанавливается гидроакустический комплекс с широкоапертурными конформными антеннами и низкочастотный гидролокатор большой дальности действия;

- ввиду необходимости решения задач в течение длительного времени и на больших удалениях от пункта базирования АНПА тяжёлого класса имеют повышенную энерговооружённость за счёт оснащения их гибридной системой генерации и распределения электроэнергии.

В целом АНПА тяжёлого класса по решаемым задачам, оборудованию и энерговооружённости практически не отличаются от подводных лодок, за исключением одного – отсутствия экипажа, все функции которого передаются системе управления, реализованной на программном уровне. Система управления АНПА вообще и АНПА тяжёлого класса в особенности является системой управления высокой сложности, поскольку она должна в реальном масштабе времени в сложных, зачастую агрессивных, условиях в полностью автоматическом режиме одновременно решать широкий круг задач путём управления разнородными техническими средствами. Создание эффективной системы управления АНПА – основная проблема развития подводной робототехники.

Ввиду этого к системе управления АНПА тяжёлого класса предъявляются повышенные требования. Она должна:

- обеспечивать решение поставленных задач;
- эффективно противодействовать внешним и внутренним дестабилизирующим факторам, в том числе преднамеренному и непреднамеренному противодействию со стороны различных сил и средств, неисправностям аппаратной части;
- позволять без существенных переделок наращивать перечень задач, решаемых АНПА, в том числе с использованием дополнительного оборудования;
- обладать высокой надёжностью функционирования.

Первые два требования влекут за собой создание сложных алгоритмов управления, а выполнение двух последних требований должно обеспечиваться простой и прозрачной структурой системы управления.

Система управления АНПА тяжёлого класса, как правило, строится по мультиагентному принципу [1, 6–22], что позволяет:

- осуществить декомпозицию системы управления на подсистемы, каждая из которых управляет отдельной системой АНПА, и тем самым распределить сложность системы управления между подсистемами;
- упростить разработку системы управления путём привлечения к созданию каждой подсистемы управления специалистов в соответствующей предметной области.

Структура мультиагентной системы управления АНПА тяжёлого класса приведена на рис. 1. Она включает системы управления радиоэлектронными и техническими системами АНПА, являющимися подсистемами системы управления, и программный комплекс управления (ПКУ), являющийся диспетчером, организующим совместную работу всех систем АНПА в интересах наиболее точного выполнения маршрутного задания.



Рис. 1. Мультиагентная структура системы управления (СУ) АНПА

На ПКУ возлагается:

- своевременная (в соответствии с маршрутным заданием) выдача команд системам АНПА (точнее, их системам управления) на выполнение того либо иного действия;
- анализ результатов выполнения каждой команды. При её успешном выполнении переход к выполнению следующего этапа миссии. В противном случае внесение изменений в маршрутное задание;
- контроль текущего состояния АНПА в части безопасности плавания, точности контроля своего местоположения, исправности оборудования и оставшегося запаса электроэнергии с принятием соответствующих мер в случае возникновения критической ситуации;
- осуществление радио- и гидроакустической связи с командным пунктом и взаимодействующими средствами.

Из литературы известен ряд подходов к построению алгоритмов управления робототехническими комплексами. Однако среди них выделяется так называемый гибридный подход [13], который предполагает размещение алгоритмов управления по вертикальным уровням. Количество уровней может быть любым, но наиболее часто в литературе упоминаются трехуровневые архитектуры.

Наиболее подробно структура ПКУ АНПА, построенная на основе данной трёхуровневой модели, описана в работах специалистов ИПМТ ДВО РАН (например, [1]).

Предпринятая авторами представляемой статьи попытка создать ПКУ для АНПА тяжёлого класса со структурой, предложенной в работе [1], выявила ряд трудностей при её реализации. Основная трудность встретилась при внедрении в ПКУ и отладки алгоритмов решения новых функциональных задач АНПА тяжелого класса. Внедрение новых агентов тактического уровня требовало внесения изменений в алгоритмы агентов оперативного уровня, увеличения количества информационных потоков и сложной отладки функционирования системы.

Также вопросы вызвало обеспечение надёжности функционирования ПКУ при одновременном решении нескольких функциональных задач.

Ввиду этого были проведены исследования по поиску более простой и, как следствие, более надёжной структуры ПКУ. Целью работы является описание структуры ПКУ, разработанной авторами.

■ Описание предлагаемой структуры ПКУ

Разработка новой структуры ПКУ велась с учётом двух основных критериев:

- 1) надёжность функционирования ПКУ, которая, учитывая многозадачность ПКУ, тесно связана с простотой его структуры;
- 2) универсальность, которая позволит применять однажды созданный ПКУ при проектировании АНПА различного назначения.

В основу построения ПКУ, как и всей системы управления АНПА, положен мультиагентный принцип. Для этого вводится понятие «состояние АНПА». В процессе выполнения миссии АНПА может находиться в одном из следующих состояний:

- движение и выполнение функций в режиме телеуправления, в котором функции ПКУ ограничены трансляцией в системы АНПА команд, поступивших по радио/гидроакустическому каналу связи с пункта управления, расположенного на берегу либо на судне сопровождения. Режим телеуправления в АНПА тяжёлого класса предназначен для управления его движением на стадии подводки АНПА к судну-носителю для поднятия его на борт, а также для решения других аналогичных задач;
- аварийное прекращение миссии, обусловленное выходом из строя систем АНПА либо преждевременным израсходованием запаса электроэнергии, а также получением соответствующей команды с пункта управления;
- расхождение с обнаруженным подвижным подводным/надводным объектом;
- обход обнаруженного неподвижного препятствия;
- выполнение специальной программы в назначенном районе, например, контроль подводной обстановки, поиск назначенного донного объекта, мониторинг химического состава воды;
- выполнение обсервации одним из следующих способов: по сигналам спутниковой навигационной либо радионавигационной системы, региональной гидроакустической навигационной системы, донных и корабельных маяков-ответчиков, а также по подводным пассивным ориентирам, естественным геофизическим полям – батиметрическому, магнитному, гравитационному;
- выполнение сеанса радиосвязи;

- движение по маршруту в соответствии с маршрутным заданием.

Каждому состоянию АНПА присваивается свой приоритет. Состояния АНПА приведены в порядке убывания их приоритета. Если при нахождении АНПА в определенном состоянии возникают условия для перехода в состояние с более высоким приоритетом, то этот переход осуществляется незамедлительно, до нормального выхода из текущего состояния. Если же возникают условия для перехода в состояние с более низким приоритетом, он откладывается и осуществляется только после нормального выхода из текущего состояния.

В каждом состоянии АНПА управляется отдельной программой, являющейся одним из агентов ПКУ. При этом программа, которой передано управление, самостоятельно (в соответствии с содержащимися в маршрутном задании инструкциями) определяет целевую функцию управления, состав систем АНПА, участвующих в решении данной задачи, последовательность действий, критерии успешности/неуспешности управления.

Для координации работы программ-агентов в составе ПКУ предусмотрена специальная программа-координатор (ПК), которая на основании маршрутного задания и с учётом сложившейся обстановки принимает решение о передаче управления той

либо другой программе управления АНПА. Данные о сложившейся обстановке ПК получает от постоянно функционирующих в фоновом режиме программ, реализующих алгоритмы контроля:

- подводной и надводной обстановки в интересах своевременного обнаружения опасных ситуаций столкновения с неподвижными препятствиями и подвижными объектами;
- технического состояния систем АНПА;
- оставшегося запаса электроэнергии;
- круговой ошибки определения текущего числимого места АНПА;
- получения сообщений по гидроакустическому каналу.

В результате мультиагентного подхода осуществляется декомпозиция ПКУ в виде набора последовательно функционирующих программ, что значительно упрощает создание ПКУ и повышает надёжность его функционирования.

Структура ПКУ, построенная по мультиагентному принципу, приведена на рис. 2.

ПКУ включает программу-координатор (ПК), программы контроля возникновения критических ситуаций и программы-агенты, управляющие АНПА в каждом его состоянии. При расширении перечня функциональных задач АНПА соответственно



Рис. 2. Структура программного комплекса управления

увеличивается количество состояний АНПА и в состав ПКУ включаются новые независимые программы-агенты, которые управляют АНПА в соответствующем новом состоянии.

Поскольку ядром ПКУ, построенного по мульти-агентному принципу, является программа-координатор, рассмотрим организацию её функционирования (рис. 2).

ПК, как и вся система управления, функционирует циклически с длительностью цикла порядка 1с. Функционирование ПК осуществляется по двум направлениям. Первое направление состоит в организации выполнения маршрутного задания путём определения, в каком состоянии должен находиться АНПА при выполнении текущего элемента маршрутного задания и передачи управления программе-агенту, управляющей АНПА в этом состоянии.

Второе направление функционирования ПК заключается в обработке сообщений, поступающих от программ контроля возникновения ситуаций, требующих определённых действий (рис. 2). Анализ сообщений осуществляется в соответствующем блоке ПК и завершается выработкой варианта реакции на сообщение.

Поскольку одновременно может поступить несколько сообщений от разных программ контроля, в блоке определения состояния АНПА осуществляется их арбитраж, состоящий в ранжировании сообщений по степени опасности для АНПА. Ранжирование осуществляется следующим образом:

1. Проверяется поступление сообщений от программ контроля, требующих мгновенной реакции. К таким программам относятся программа освещения подводной и надводной обстановки и программа контроля технического состояния систем АНПА.

Если программа освещения подводной и надводной обстановки сообщила об обнаружении нового объекта, ПК определяет необходимость совершения манёвра АНПА для расхождения с подвижным объектом либо обхода неподвижного препятствия и, если необходимость подтверждается, передаёт управление АНПА программе управления расхождением с обнаруженным подвижным подводным/надводным объектом либо программе управления обходом обнаруженного неподвижного препятствия [14].

При получении сообщения от программы контроля технического состояния систем АНПА о возникшей неисправности ПК с использованием являющейся частью маршрутного задания таблицы возможных неисправностей систем АНПА определяет действия, которые необходимо предпринять либо ограничения на выполнение отдельных действий, которые необ-

ходимо учесть при возникновении данной неисправности. Если определена необходимость совершить определённое действие, ПК передает управление соответствующей программе, например, программе аварийного прекращения миссии.

2. Проверяется поступление сообщений от программы приёма сообщений от пункта управления, поступающих по каналам связи. Приём сообщений по гидроакустическому каналу осуществляется непрерывно в дежурном режиме. Приём сообщений по радиоканалу производится в процессе указанных в маршрутном задании плановых всплытий АНПА на обсервацию и приём/передачу сообщений по радиоканалу. Если сообщения поступили и являются командами, требующими незамедлительного исполнения, ПК принимает соответствующие меры. Например, если команда предписывает прекратить выполнение миссии, ПК передаёт управление программе управления плановым завершением миссии. Если команда предписывает откорректировать маршрутное задание, начиная с указанного этапа его выполнения, ПК заменяет ранее составленный план выполнения маршрутного задания, начиная с указанного этапа, на полученный новый план. Если команда содержит указание сообщить о ходе выполнения миссии, ПК готовит стандартное сообщение, включающее: текущее время, свои координаты, время последней обсервации, оставшийся запас электроэнергии, перечень возникших неисправностей, номер выполняемого элемента маршрутного задания либо признак аварийного прекращения миссии. Затем ПК передаёт управление программе, управляющей осуществлением связи АНПА с командным пунктом, сопровождая передачу управления подготовленным сообщением и условным номером канала связи.

3. Проверяется поступление сообщения от программы, в текущий момент управляющей АНПА. Эти сообщения могут быть следующими: а) продолжается выполнение задания. Такие сообщения программа, осуществляющая управление АНПА в данный момент, должна посылать периодически, чтобы ПК имела возможность контролировать её работу. Реакции ПК на данное сообщение не требуется. Однако, если очередное сообщение не поступило, ПК начинает периодически посылать запросы о состоянии управляющей программы. При отсутствии ответа на запрос в течение заданного времени, ПК принимает решение о «зависании» управляющей программы и даёт команду на её перезагрузку с дальнейшей передачей ей управления для выполнения текущего элемента маршрутного задания; б) выполнение задания завершено с указанием результата

выполнения задания. Получив это сообщение, ПК реализует результат выполнения задания, например, передаёт навигационной системе результаты обсервации, а затем в соответствии с планом выполнения маршрутного задания передаёт управление программе, обеспечивающей выполнение следующего элемента маршрутного задания; в) выполнить задание не представляется возможным. Получив данное сообщение, ПК в соответствии с формализованными рекомендациями, содержащимися в маршрутном задании, корректирует план выполнения маршрутного задания. При этом ПК периодически сравнивает время завершения выполнения текущего элемента маршрутного задания с плановым временем. Если разница между этими временами находится в указанных в маршрутном задании допустимых пределах, ПК ничего не предпринимает. Если появилось отставание, не превышающее критического предела, ПК принимает указанные в маршрутном задании меры по сокращению отставания, например, увеличение скорости АНПА, исключение запланированной обсервации либо запланированного сеанса радиосвязи. При появлении отставания, превышающего указанный критический предел, ПК готовит формализованное сообщение на пункт управления, информирующее о ситуации, и передаёт управление АНПА программе, организующей проведение сеанса связи с пунктом управления.

4. Проверяется поступление сообщения от программы расчёта предполагаемой круговой ошибки текущего счислимого места АНПА. Если данная ошибка превышает допустимую величину, указанную в маршрутном задании, ПК определяет возможные способы проведения обсервации с учётом содержащегося в маршрутном задании навигационно-гидрографического описания района плавания и наличия неисправностей средств обсервации. Из возможных способов выбирается способ по критерию, указанному в маршрутном задании. Этими критериями могут быть: наименьшее время выполнения обсервации, наименьший расход электроэнергии, наибольшая скрытность АНПА. Выбрав способ обсервации, ПК передаёт управление программе управления выполнением обсервации с указанием способа обсервации. Если выполнение обсервации в данный момент не представляется возможным, ПК периодически повторяет попытку осуществить её, при этом сравнивает рассчитанную круговую ошибку с указанной в маршрутном задании предельно допустимой ошибкой. При превышении предельно допустимой ошибки ПК готовит сообщение об этом на пункт управления с запросом дальнейших инструкций и передаёт

управление АНПА программе, организующей передачу сообщения указанным способом.

5. Проверяется наличие сообщения от программы контроля за расходом запаса электроэнергии. Это сообщение периодически поступает от системы управления техническими средствами АНПА. При поступлении очередного сообщения ПК сравнивает оставшийся запас электроэнергии с плановым запасом на данном этапе выполнения миссии. Если текущий запас находится в допустимых пределах от планового запаса, ПК никаких действий не предпринимает. Если текущий запас меньше допустимого предела, ПК вводит ограничения на использование технических средств, указанные в маршрутном задании. Если текущий запас меньше указанного в маршрутном задании предельно допустимого предела, ПК принимает решение об аварийном прекращении миссии и передаёт управление АНПА программе, организующей аварийное прекращение миссии, включающее всплытие (покладку на грунт) с отправкой соответствующего сообщения на пункт управления.

Для внедрения в ПКУ решения новой функциональной задачи, возлагаемой на АНПА, разрабатывается новая независимая программа управления АНПА при решении этой задачи и в маршрутном задании указывается элемент, предусматривающий её выполнение. Когда время выполнения данного элемента настанет, ПК передаст управление этой программе.

■ Описание маршрутного задания

Важным элементом, обеспечивающим эффективное функционирование системы управления АНПА, является маршрутное задание, загружаемое в процессе подготовки миссии в память ПКУ. Рассмотрим его структуру.

Маршрутное задание содержит следующие формализованные документы:

1. План выполнения миссии.

Поскольку миссия в абсолютном большинстве случаев состоит из трёх этапов (движение в назначенный район, выполнение заданных действий в назначенном районе, возвращение на базу), план выполнения миссии состоит из двух частей:

- описание маршрута движения АНПА в назначенный район выполнения работ и обратно в виде последовательности галсов, на которых аппарат движется с постоянными курсом, скоростью и глубиной погружения. Протяженность галсов не ограничена, что дает возможность в районах открытого моря

описывать маршрут их небольшим количеством (вплоть до одного). Время и точность прибытия в каждую точку маршрута указываются с допусками, что дает возможность не перестраивать маршрут при незначительном отклонении от него по времени и/или координатам в силу разных обстоятельств. В описание каждого галса при необходимости могут быть включены специальные задания, которые АНПА должен на нем выполнить, например, обсервация различными способами, прием/передача сообщений по радио/гидроакустическому каналу;

- описание действий АНПА в назначенном районе. Поскольку количество целевых заданий, решаемых АНПА в назначенном районе ограничено небольшим количеством типовых задач (поиск подвижных и неподвижных объектов, выполнение измерений различных физических полей и др.) подробные инструкции ПКУ по маневрированию АНПА и использованию технических средств описываются в специальной базе вариантов решения каждой задачи, ранжированных по приоритету. Выбор наиболее приемлемого варианта осуществляет ПКУ в соответствии со складывающейся обстановкой. В результате описание действия АНПА в назначенном районе включает условный номер решаемой задачи, необходимые исходные данные (например, параметры и предположительные координаты объекта поиска и др.), предпочтительный вариант её решения, допустимое время решения задачи.

2. Названная в предыдущем пункте база вариантов решения типовых задач в назначенном районе.

3. База формализованных инструкций по управлению АНПА при возникновении критических ситуаций.

4. Таблица констант, обеспечивающих работу алгоритмов управления (допустимая глубина погружения, максимально допустимая скорость хода, оптимальное отстояние от дна при поиске донных объектов с помощью разных средств, максимально допустимое время выполнения каждого действия и т.п.). Всего несколько десятков констант.

5. Формализованное географическое, навигационно-гидрографическое и гидрометеорологическое описание района планируемого маршрута АНПА (границы береговой черты, глубины, параметры течений, гидроакустические условия, перечень доступных средств навигации).

6. График планового расходования электроэнергии при выполнении миссии.

7. Таблица возможных неисправностей систем АНПА и действий, которые необходимо предпринять либо ограничить при возникновении этих неисправностей.

■ Требования к алгоритмам, входящим в состав ПКУ, и к их программной реализации

Учитывая значимость ПКУ для эффективного решения задач, стоящих перед АНПА, алгоритмы, входящие в состав ПКУ, и их программная реализация должны удовлетворять ряду количественных требований. К этим требованиям относятся:

1. Требования по назначению, под которыми понимаются количественные показатели эффективности решения алгоритмом поставленной перед ним задачи. В частности:

- для алгоритма управления движением АНПА в режиме телеуправления показателями эффективности являются точность и время выполнения команд, поступивших с пункта управления;
- для алгоритма управления аварийным прекращением миссии – полнота, точность и время выполнения всех функций, связанных с прекращением миссии;
- для алгоритма управления расхождением с обнаруженным подвижным подводным/надводным объектом – дистанция и время расхождения;
- для алгоритма управления обходом обнаруженного неподвижного препятствия – минимальное расстояние сближения с препятствием и время его обхода;
- для алгоритма управления выполнением специальной программы в назначенном районе – показатели эффективности решения поставленной задачи. Например, при поиске назначенного донного объекта – вероятность и время его обнаружения;
- для алгоритма управления выполнением обсервации назначенным способом – вероятность успешного выполнения обсервации и затраченное время;
- для алгоритма управления выполнением сеанса связи по радиоканалу – вероятность успешного выполнения сеанса связи и затраченное время;
- для алгоритма управления движением по маршруту – максимальное отклонение от маршрута по расстоянию и времени.

2. Требования устойчивости к воздействию внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. В частности:

- для алгоритма управления движением АНПА в режиме телеуправления дестабилизирующими факторами являются помехи в канале связи, которые могут исказить поступающие команды либо временно ограничить их поступление. Алгоритм управления должен анализировать поступающие команды и исправлять либо блокировать ошибочные команды, либо запрашивать у командного пункта потерянные команды;
- для алгоритма управления аварийным прекращением миссии – это ограничения, связанные с неисправностями отдельных систем АНПА, которые не позволяют выполнить все необходимые действия по прекращению миссии. Алгоритм управления должен задействовать все возможные альтернативные варианты;
- для алгоритма управления расхождением с обнаруженным подвижным подводным/надводным объектом – это возможное маневрирование подвижного объекта в процессе расхождения либо появление второго (третьего) опасного объекта. На эти события алгоритм управления должен правильно реагировать;
- для алгоритма управления обходом обнаруженного неподвижного препятствия – это сложная форма препятствия как по горизонтали, так и по вертикали. Алгоритм управления должен при любой форме препятствия обеспечить обход его за минимальное время, не приближаясь к препятствию ближе, чем указано в маршрутном задании;
- для алгоритма управления выполнением специальной программы в назначенном районе дестабилизирующие факторы зависят от решаемой задачи. Например, при поиске назначенного донного объекта ими являются различные посторонние донные объекты, на классификацию которых требуется время. Также дестабилизирующими факторами являются значительные неровности дна, которые нужно отслеживать, чтобы избежать столкновения с ними;
- для алгоритма управления выполнением обсервации назначенным способом дестабилизирующими факторами выступают различные внешние и внутренние причины, не позволяющие выполнить обсервацию назначенным способом. Алгоритм управления должен найти альтернативный способ, например, повторить

обсервацию предписанным способом позже либо воспользоваться другим способом;

- для алгоритма управления выполнением сеанса связи по радиоканалу дестабилизирующими факторами выступают различные внешние и внутренние причины, не позволяющие выполнить сеанс связи. Алгоритм управления должен попытаться найти возможность выполнить сеанс связи, например, повторить его позже либо перейти на другой канал связи;
- для алгоритма управления движением по маршруту дестабилизирующими факторами являются ошибки навигации, а также различные причины, требующие изменить параметры движения АНПА (например, расхождение с подвижными и неподвижными препятствиями, возникшие неисправности в системе генерации электроэнергии, двигательно-рулевым комплексом). Алгоритм управления должен так перестроить маршрут, чтобы максимально обеспечить достижение цели миссии.

3. Требования к надёжности алгоритма управления и программы, реализующей алгоритм. Алгоритм не должен иметь тупиковых веток, бесконечных циклов. Программа должна адекватно реагировать на поступление на вход некорректных данных и т.д.

4. Требования к ресурсоёмкости алгоритма и программы, т.е. программа, реализующая алгоритм, должна функционировать в реальном масштабе времени на штатном вычислителе совместно с другими программами.

Оценка выполнения этих требований проверяется сначала путём моделирования функционирования АНПА на цифровом полигоне [23], а затем при испытаниях АНПА в реальных условиях [24].

ПКУ с описанной структурой был опробован путём моделирования [10], а затем использован при создании системы управления АНПА тяжёлого класса, которое показало удобство коллективной разработки системы управления АНПА и продемонстрировало возможность применения разработанного ПКУ при создании АНПА различного назначения.

Выводы

1. АНПА тяжёлого класса имеют ряд существенных отличий от АНПА других классов, что накладывает более высокие требования к её системе управления, имеющей мультиагентную структуру, ядром которой является программный комплекс управления (ПКУ), отвечающий за наиболее точное выполнение

маршрутного задания путём координации функционирования всех систем АНПА.

2. В работе приведена разработанная авторами структура ПКУ АНПА тяжёлого класса, отличающаяся простотой, обеспечивающей надёжность функци-

онирования ПКУ, и универсальностью, позволяющей использовать разработанный ПКУ в АНПА различного назначения.

3. Изложены требования к алгоритмам, входящим в состав ПКУ и к их программной реализации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / [отв. ред. Л.В. Киселев]; ФГБУН Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН. Владивосток, 2018. 368 с.
2. Jane's unmanned maritime vehicle. 2022–2023 / Ed. Kelvin Wong. IHS Markit. Coulsdon, Surrey, UK. 2023.
3. Борейко А.А., Илларионов Г.Ю., Коноплин А.Ю., Лаптев К.З. Автономные необитаемые подводные аппараты большого и сверхбольшого водоизмещения в иностранных военно-морских флотах. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2025. 53 с.
4. Ржевский Г.А., Скобелев П.О. Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. Самара: Офорт, 2015. 290 с.
5. Пшихопов В.Х., Костюков В.А., Медведев М.Ю. Алгоритмы планирования сглаженных индивидуальных траекторий движения наземных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 11. С. 585–595.
6. Innocenti B. A multi-agent architecture with distributed coordination for an autonomous robot: Ph.D. dissertation. Universitat de Girona, 2009.
7. Kim T.W., Yuh J. Development of a real-time control architecture for a semiautonomous underwater vehicle for intervention missions // Autonomous Systems Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Hawaii, 2003. P. 1521–1530.
8. Sutarto H., Budiyo A. Development of linear parameter varying control system for autonomous underwater vehicle // Indian J. Geo-Marine Sci. 2011. Vol. 40. P. 275–286.
9. Курочкин С.Ю., Тачков А.А. Методы управления групповым движением мобильных роботов (обзор на англ.) // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 6. С. 304–312.
10. Быкова В.С., Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В. Диспетчер мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата: структура, алгоритмы, результаты моделирования // Гирокоспия и навигация. 2020. Т. 28, № 3 (110). С. 109–121. DOI: 10.17285/0869-7035.0041
11. Goldberg D. Huxley: A Flexible Robot Control Architecture for Autonomous Underwater Vehicles // OCEANS 2011 IEEE. Spain, 2011.
12. Быкова В.С., Машошин А.И., Пашкевич И.В. Алгоритм обеспечения безопасности плавания автономного необитаемого подводного аппарата // Гирокоспия и навигация. 2021. Том 29, № 1 (112). С. 97–110.
13. Мартынова Л.А. Мультиагентные технологии в морской робототехнике // Тр. междунар. конф. по морской робототехнике для освоения океана. Санкт-Петербург, 2019. С. 278–291.
14. Мартынова Л.А. Метод разрешения конфликта в мультиагентной системе управления автономного необитаемого подводного аппарата с использованием распределенных вычислений // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2018. №8 (202). С. 69–83.
15. Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Мысливый А.А. Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. 2020. № 4. С. 31–41. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-4-31-41
16. Мартынова Л.А. Выбор мультиагентной архитектуры при разработке системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2019. № 7 (209). С. 18–35.
17. Zhang L., Jiang D., Zhao J., Ma S. An AUV for Ocean Exploring and its Motion Control System Architecture // The Open Mechanical Engineering Journal. 2013. Vol. 7. P. 40–47.
18. Yang R., Liu Y., Utne I. B., Paltrinieri N. Dynamic Risk Analysis of Operation of the Autonomous Underwater Vehicle // The 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management. Italy, 2020. DOI:10.3850/978-981-14-8593-0_4118-cd.
19. Navy Large Unmanned Surface and Undersea Vehicles: Background and Issues for Congress. 2020. URL: <https://sgp.fas.org/crs/weapons/R45757.pdf>. (Дата обращения: 24.05.2025).
20. Теория управления (Дополнительные главы): уч.пособие / под ред. Д.А.Новикова. М.:ЛЕНАНД, 2019. 552 с.
21. Гуренко Б.В. Разработка системы управления и навигации автономного необитаемого подводного аппарата. URL: <http://rirpc.ru/razrabotka-sistem-upravleniya-i-navigacii-avtonomnymi-neobitaemymi-podvodnymi-apparatami/>.
22. Sprague Ch.I., Özkahraman Ö, Munafo A., Marlow R., Phillips A., Ögren P. Improving the Modularity of AUV Control Systems using Behaviour Trees // Submitted to 2018 IEEE OES Autonomous Underwater Vehicle Symposium. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.00426>
23. Быкова В.С., Машошин А.И. Цифровой полигон для отработки системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Морская радиоэлектроника. 2023. № 2 (84). С. 32–26
24. Машошин А.И. Предложения по совершенствованию организации разработки и испытаний автономных необитаемых подводных аппаратов тяжёлого класса // Морское оборудование и технологии. 2024. № 2 (39). С. 49–55.

Сведения об авторах

БЫКОВА Валентина Сергеевна, начальник научно-исследовательского сектора
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30
Область научных интересов: разработка систем управления АНПА
E-mail: zvs2011@yandex.ru.
Тел. (моб.): +79213502293
ORCID: 0000-0003-1633-2758.

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

THE STRUCTURE OF THE SOFTWARE CONTROL PACKAGE FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

V.S. Bykova, A.I. Mashoshin

The work is devoted to the control system of heavy-class AUV, which differ from AUV of other classes in a wider range of tasks, including sailing at great depths and at a large distance from their base, which required equipping them with a large range of special equipment and high power capacity. These differences impose higher requirements on the heavy-class AUV control system. The AUV control system is based on a multi-agent principle, which makes it possible to reduce its complexity by transferring some of its functions to AUV systems, or rather their control systems. The core of the AUV multi-agent control system is the software control package (SCP), which is responsible for coordinating the functioning of all AUV systems in order to perform a mission assignment as accurately as possible by issuing commands to AUV systems and verifying their implementation, if necessary, adjusting the mission assignment, monitoring the current state of the AUV in terms of safety navigation, the accuracy of monitoring its location, the serviceability of equipment and the remaining supply of electricity, taking appropriate measures in case of a critical situation, radio and sonar communications with the command post and interoperable facilities. The purpose of the work is to describe the structure of the SCP, developed by the authors and characterized by simplicity, ensuring reliable operation of SCP, and versatility, allowing the use of the developed SCP in AUV for various purposes. The developed structure is based on the multi-agent principle of SCP, which consists in the provision of a set of independent agent programs, each of which controls AUV when solving a specific task, and a coordinator program that transfers control to the appropriate program when appropriate conditions arise. This approach makes it possible to simplify the SCP and thereby increase its reliability.

Keywords: AUV control system, software control package, control algorithms.

References

1. Podvodnie robototekhnicheskie kompleksi: sistemi, tehnologii, primeneniye (Underwater robotic complexes: systems, technologies, applications) / A.V. Inzartsev, L.V. Kiselev, V.V. Kostenko, Yu.V. Matvienko, A.M. Pavin, A.F. Shcherbatyuk. [ed. by L.V. Kiselyov]; FSBI Institute of Problems of Marine Technologies, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 2018. 368 p.
2. Jane's unmanned maritime vehicle. 2022-2023. Ed. Kelvin Wong. IHS Markit. Coulsdon, Surrey, UK. 2023.
3. Yang R., Liu Y., Utne I. B., Paltrinieri N. Dynamic Risk Analysis of Operation of the Autonomous Underwater Vehicle. The 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management. Italy. June 2020. DOI:10.3850/978-981-14-8593-0_4118-cd.
4. Navy Large Unmanned Surface and Undersea Vehicles: Background and Issues for Congress. 2020. <https://sgp.fas.org/crs/weapons/R45757.pdf>. (Date of access: 24.05.2025).
5. Avtonomnyye neobitayemye podvodnyye apparaty bolshogo i sverkhbolshogo vodoizmeshcheniya v inostrannykh voyenno-morskikh flotakh. (Autonomous underwater vehicles of large and extra-large displacement in foreign navies) / A.A. Boreyko, G.Yu. Illarionov, A.Yu. Konoplin, K.Z. Laptev K.Z., IMTP FEB RAS, Vladivostok, 2025. 53 p.
6. Rzhnevsky G.A., Skobelev P.O. Kak upravlyat slozhnymi sistemami? Multiagentnie tehnologii dlya sozdaniya intellektualnykh sistem upravleniya predpriyatiyami (How to manage complex systems? Multi-agent technologies for creating intelligent enterprise management systems). Samara: Etching, 2015, 290 p.
7. Pshikhopov V., Medvedev M., Kostjukov V., Houssein F., Kadhim A.T. Trajectory Planning Algorithms in Two-Dimensional Environment with Obstacles. Informatics and Automation. 2022. Vol.21, No. 3. P. 459-492.
8. Innocenti, B., A multi-agent architecture with distributed coordination for an autonomous robot. Ph.D. dissertation, Universitat de Girona, 2009.
9. Kim, T.W., Yuh, J., Development of a real-time control architecture for a semi-autonomous underwater vehicle for intervention missions, Autonomous Systems Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Hawaii, 2003, pp. 1521-1530.
10. Sutarto H., Budiyo A. Development of linear parameter varying control system for autonomous underwater vehicle, Indian J. Geo-Marine Sci., 2011, vol. 40, pp. 275-286.
11. Kurochkin S.Yu., Tachkov A.A. Metody upravleniya gruppovim dvizheniem mobilnykh robotov (obzor). Mehatronika, avtomatizatsia, upravlenie. 2021. Vol. 22, No. 6. P. 304-312.
12. Bykova V.S., Martynova L.A., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V. A Dispatcher for a Multi-Agent Control System of an Autonomous Underwater Vehicle: Structure, Algorithms, and Simulation Results. Gyroscopy and Navigation. 2020. Vol. 10, No. 4. P. 341-349. DOI: 10.1134/S2075108720040033.

13. Goldberg D. Huxley: A Flexible Robot Control Architecture for Autonomous Underwater Vehicles. OCEANS 2011 IEEE - Spain. 2011.

14. Bykova V.S., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V. Safe Navigation Algorithm for Autonomous Underwater Vehicles. Gyroscopy and Navigation. 2021. Vol. 12, No. 1. P. 86-95 (DOI: 10.1134/S2075108721010028).

15. Martynova L.A. Multiagentnyye tekhnologii v morskoy robototekhnike (Multi-agent technologies in marine robotics). International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics, 2019, September 17-19, Saint-Petersburg, Russia. 2019. P. 278-291.

16. Martynova L.A. Metod razresheniya konflikta v multiagentnoy sisteme upravleniya avtonomnogo neobitayemogo podvodnogo apparata s ispolzovaniyem raspredelennykh vychisleniy (The method of resolution of the conflict in the multiagent control system of the autonomous underwater vehicle with the use of distributed calculations). Izvestiya SFEDU. Engineering sciences. 2018. No. 8(202). P. 69-83.

17. Martynova L.A., Kiselev N.K., Mysliviy A.A. Metod vybora arkhitektury multiagentnoy sistemy upravleniya avtonomnogo neobitayemogo podvodnogo apparata (Choice of architecture for a multi-agent control system of an autonomous underwater vehicle). Information and control systems. 2020. No. 4, P. 31-41. (DOI: 10.31799/1684-8853-2020-4-31-41)

18. Martynova L.A. Vybor multiagentnoy arkhitektury pri razrabotke sistemy upravleniya avtonomnogo neobitayemogo podvodnogo apparata (Selection of multi-agent architecture when developing a control system for an autonomous underwater vehicle). Izvestiya SFEDU. Engineering sciences. 2019. No. 7(209). P. 18-35.

19. Zhang L, Jiang D, Zhao J and Ma S An AUV for Ocean Exploring and its Motion Control System Architecture. The Open Mechanical Engineering Journal, 2013, 7, 40-47.

20. Novikov D.A. (Ed.). Theory of Control (Additional Chapters). Moscow: LENAND. 2019, P. 552.

21. Gurenko B.V. Razrabotka sistemy upravleniya i navigatsii avtonomnogo neobitayemogo podvodnogo apparata (Development of a control and navigation system for an autonomous uninhabited underwater vehicle) // <http://rirpc.ru/razrabotka-sistem-upravleniya-i-navigatsii-avtonomnymi-neobitaemymi-podvodnymi-apparatami/>.

22. Sprague Ch.I., Özkahraman Ö, Munaf A., Marlow R., Phillips A., Ögren P. Improving the Modularity of AUV Control Systems using Behaviour Trees. Submitted to 2018 IEEE OES Autonomous Underwater Vehicle Symposium, DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.00426>

23. Bykova V.S., Mashoshin A.I. Tsifrovoy polygon dlya otrabotki sistem upravleniya avtonomnogo neobitayemogo podvodnogo apparata (Digital test site for testing the control system of an autonomous uninhabited underwater vehicle). Marine radioelectronics. 2023, No. 2 (84). Pp. 32-26.

24. Mashoshin A.I. Predlozheniya po sovershenstvovaniyu organizatsii razrabotki i ispitaniy avtonomnykh neobitaemih podvodnykh apparatov tyazhelogo klassa (Proposals for improving the organization of development and testing of autonomous uninhabited heavy-class underwater vehicles). Marine equipment and Technologies. 2024. No. 2 (39). Pp. 49-55.

Information about authors

BYKOVA Valentina Sergeevna, chief of the research sector
JSC «Concern «Elektropribor»

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

Scientific interests: in AUV control systems

E-mail: zvs2011@yandex.ru

Phone: +79213502293

ORCID: 0000-0003-1633-2758

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

JSC «Concern «Elektropribor»

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

Scientific interests: in underwater acoustic, AUV control systems

E-mail: aimashoshin@mail.ru

Phone: +79217632345

ORCID: 0000-0002-4785-966X

